



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Dirección General de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería Geológica, Minera,
Metalúrgica y Geográfica

Unidad de Posgrado

La geografía del riesgo sísmico en las ciudades de la Costa y Sierra del Perú

TESIS

Para optar el Grado Académico de Magíster en Ciencias
Ambientales con mención en Gestión y Ordenamiento Ambiental
del Territorio

AUTOR

Jose Angel OSEJO MAURY

ASESOR

Dr. Carlos Francisco CABRERA CARRANZA

Lima, Perú

2026



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Osejo, J. (2026). *La geografía del riesgo sísmico en las ciudades de la Costa y Sierra del Perú*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Unidad de Posgrado]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Jose Angel Osejo Maury
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	07730701
URL de ORCID	https://orcid.org/0009-0000-1334-2710
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Dr. Carlos Francisco Cabrera Carranza
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	17402784
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-5821-5886
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Dr. Walter Javier Díaz Cartagena
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	25726173
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Dr. Juan Carlos Montero Chirito
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	09493599
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Dr. Jorge Leonardo Jave Nakayo
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	01066653
Miembro del jurado 3	
Nombres y apellidos	Dr. Jorge Luis Lopez Bulnes
Tipo de documento	DNI

Número de documento de identidad	08153969
Datos de investigación	
Línea de investigación	E.4.1.5. Estudios y Gestión de Riesgos y Vulnerabilidad
Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Departamentos de Costa y Sierra del Perú
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2024 - 2025
URL de disciplinas OCDE	Geografía física https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.05 Geología https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.06 Ciencias del medio ambiente https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.08



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

SUSTENTACIÓN PÚBLICA

En la Universidad Nacional Mayor de San Marcos - Lima, a los veinticuatro días del mes de febrero del año dos mil veintiséis, siendo las 11.30 horas, se reúnen los suscritos Miembros del Jurado Examinador de Tesis, nombrado mediante Dictamen N° 000090-2026-UPG-VDIP-FIGMMG/UNMSM del 05 de febrero del 2026, con la finalidad de evaluar la sustentación oral de la siguiente tesis:

TÍTULO

«LA GEOGRAFÍA DEL RIESGO SÍSMICO EN LAS CIUDADES DE LA COSTA Y SIERRA DEL PERÚ»

Presentado por el Bach. **JOSE ANGEL OSEJO MAURY**, para optar el **GRADO ACADÉMICO DE MAGISTER** en **CIENCIAS AMBIENTALES** con mención en **GESTIÓN Y ORDENAMIENTO AMBIENTAL DEL TERRITORIO**.

El Secretario del Jurado Examinador de la Tesis, analiza el expediente N° F16A1-20250000681, de fecha 23 de octubre del 2025, en el marco legal y Estatutario de la Ley Universitaria, acreditando que tiene todos los documentos y que cumplió con las etapas del trámite según el «Reglamento General de Estudios de Posgrado», aprobado con Resolución Rectoral N° 00301-R-09 del 22 de enero del 2009.

Luego de la Sustentación, se procede con la calificación de la Tesis, de acuerdo al procedimiento respectivo y se registra en el acta correspondiente de conformidad al Art. 61 del precitado Reglamento, correspondiéndole al graduando la siguiente calificación:

Muy Bueno (14)

Habiendo sido aprobada la sustentación de la Tesis, el Presidente recomienda a la Facultad se le otorgue el **GRADO ACADÉMICO DE MAGISTER** en **CIENCIAS AMBIENTALES** con mención en **GESTIÓN Y ORDENAMIENTO AMBIENTAL DEL TERRITORIO** al Bach. **JOSE ANGEL OSEJO MAURY**.

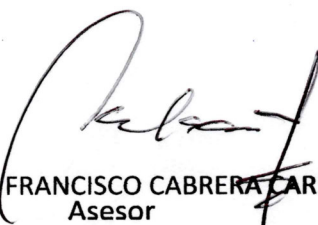
Siendo las 12:30 horas, se dio por concluido al acto académico.


DR. WALTER JAVIER DÍAZ CARTAGENA
Presidente


DR. JUAN CARLOS MONTERO CHIRITO
Secretario


DR. JORGE LEONARDO JAVE NAKAYO
Miembro


DR. JORGE LUIS LÓPEZ BULNES
Miembro


DR. CARLOS FRANCISCO CABRERA CARRANZA
Asesor



Anexo 1

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, **CARLOS FRANCISCO CABRERA CARRANZA** en mi condición de asesor acreditado con el Dictamen Nº 000344-2025-UPG-VDIP-FIGMMG/UNMSM de la tesis, cuyo título es «**LA GEOGRAFÍA DEL RIESGO SÍSMICO EN LAS CIUDADES DE LA COSTA Y SIERRA DEL PERÚ**», presentado por el Bach. **JOSE ANGEL OSEJO MAURY** para optar el grado académico de **MAGISTER EN CIENCIAS AMBIENTALES CON MENCIÓN EN GESTIÓN Y ORDENAMIENTO AMBIENTAL DEL TERRITORIO**, CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el **12%** de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del grado académico de **MAGISTER EN CIENCIAS AMBIENTALES CON MENCIÓN EN GESTIÓN Y ORDENAMIENTO AMBIENTAL DEL TERRITORIO**.

Lima, 8 de junio del 2026

Firma del Asesor: _____

Nombres y Apellidos del asesor: Carlos Francisco Cabrera Carranza

DNI: 17402784

* Según corresponda: bachiller, magíster, doctor; título profesional o título de segunda especialidad

La vigencia del presente certificado corresponde a un período de noventa (90) días desde la fecha de su emisión; siempre que no haya observaciones en el texto durante el proceso de revisión por el jurado informante o surja alguna contingencia.

DEDICATORIAS

A mi alma mater, la Universidad Nacional Mayor de San Marcos y su carrera de Geografía, que me han dado la satisfacción de ser quien soy

Al Instituto Francés de Estudios Andinos (IFEA), institución cuya invaluable y prestigiosa biblioteca me hizo geógrafo y amar la geografía

Al Dr. Pierre Usselman, por el gran apoyo que me dio en mi formación

A la empresa Walsh Perú S.A. la cual me permitió progresar y forjar mi familia

A la memoria de mis padres, Cesar y Carlota

A mi familia, mi esposa Haydé, mis hijos Adriana, Raquel, César y mi nieta, Lucianita

AGRADECIMIENTOS

Mi mayor agradecimiento a mi Asesor en la presente tesis, el Dr. Carlos Cabrera Carranza, Vicerrector Académico de la Universidad y dilecto amigo personal, por sus valiosas opiniones y apoyo, sin los cuales no habría concluido esta investigación.

Reconocimiento especial a la estudiante de Ingeniería Geográfica, Patricia Parra Cruz, por su apoyo y asistencia constante a lo largo de toda esta investigación; a ella mi mayor agradecimiento, estando seguro que será una excelente profesional.

A mi yerno, Renzo Lizárraga Odicio, técnico en electrotecnia, ingeniero electrónico y magíster. Sin su invaluable apoyo, tampoco habría concluido esta tesis. Le quedo siempre agradecido.

ÍNDICE

<i>DEDICATORIAS</i>	I
<i>AGRADECIMIENTOS</i>	II
ÍNDICE.....	III
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VI
ÍNDICE DE CUADROS.....	IX
LISTA DE ACRÓNIMOS.....	X
RESUMEN.....	XI
ABSTRACT.....	XII
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Situación Problemática.....	1
1.2. Formulación del problema.....	5
1.2.1. Problema General:.....	5
1.2.2. Problemas específicos.....	6
1.3. Justificación de la Investigación.....	6
1.3.1. Justificación Teórica.....	6
1.3.2. Justificación Práctica.....	8
1.4. Objetivos.....	9
1.4.1. Objetivo general.....	9
1.4.2. Objetivos específicos.....	9
1.5. Hipótesis de investigación.....	10
1.5.1. Hipótesis general.....	10
1.5.2. Hipótesis específicas.....	10
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	11
2.1. Antecedentes de Estudio.....	11
2.1.1. Antecedentes Internacionales.....	11
2.1.2. Antecedentes Nacionales.....	13
2.2. Bases Teóricas.....	14
2.2.1. La Geografía del Riesgo.....	14
2.2.1.1. Definiciones Sobre Riesgo Físico y sus Componentes.....	15
2.2.1.2. El Peligro y la Vulnerabilidad.....	17
2.2.2. El Peligro Sísmico: Sismos y Ondas Sísmicas.....	20
2.2.2.1. Los sismos y la constitución interna del planeta.....	21

2.2.2.2. Fallas y fallas activas	24
2.2.2.3. Vibración del Terreno y Naturaleza de las Ondas Sísmicas	27
2.2.2.3.1. Longitud, Amplitud, Frecuencia y Velocidad de Ondas .	29
2.2.2.4. Medición de la Actividad Sísmica: Intensidad y Magnitud	34
2.2.2.4.1. Intensidad	34
2.2.2.4.2. Magnitud.....	37
2.2.3. Factores de la Mayor o Menor Severidad de los Sismos.....	39
2.2.3.1. Profundidad	40
2.2.3.2. Distancia	41
2.2.3.3. Directividad	41
2.2.3.4. Duración.....	42
2.2.3.5. El Substrato Geológico.....	43
2.2.3.5.1. Las rocas, sus clases y estructuras	44
2.2.3.6. Los suelos, sus clases e influencias en el riesgo sísmico	55
2.2.3.6.1. Los suelos gruesos. Licuación y otros procesos.....	62
2.2.3.6.2. Suelos finos o cohesivos. Plasticidad y liquidez	68
2.2.3.7. Caracteres Geomorfológicos, Clima y Riesgo Sísmico	73
2.2.4. La Aceleración Sísmica y Zonas Sismorresistentes	78
2.2.5. Sistemas de Alerta Sísmica.....	85
2.2.5.1. Sistemas de Alerta Sísmica en Tiempo Real	88
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA	95
3.1. Tipo y Diseño de Investigación.....	95
3.1.1. Tipo de Investigación	95
3.1.2. Diseño de Investigación.....	96
3.1.3. Nivel de Investigación	97
3.1.4. Enfoque de la Investigación.....	97
3.2. Variable de investigación.....	98
3.2.1. Matriz de Operacionalización de variables.	99
3.3. Unidad de Análisis.....	101
3.4. Población y Muestra	101
3.4.1. Población.	101
3.4.2. Muestra.....	101
3.4.3. Selección de la Muestra / Muestreo.....	101
3.4.3.1. Matriz de Instrumentos.....	102
3.4.4. Técnicas de Investigación.....	105
3.4.5. Instrumentos de investigación	106
CAPÍTULO IV. RESULTADOS	107

4.1. Los Sismos en el Perú, Caracteres y Efectos	107
4.1.1. El Sismo y Erupción Volcánica de 1600 en Moquegua	118
4.1.2. El Sismo y Tsunami de Lima de 1746.....	125
4.1.2.1. El Terremoto.....	125
4.1.2.2. El Tsunami	129
4.1.3. El Sismo y Tsunami de Arica de 1868	133
4.1.4. El Sismo de Piura de 1912	146
4.1.5. Los Terremotos de Lima de 1940, 1966 y 1974	150
4.1.5.1. El terremoto de 1940.....	151
4.1.5.2. El terremoto de 1966.....	157
4.1.5.3. El terremoto de 1974.....	162
4.1.5.4. Lima actual y otras ciudades ante un sismo severo	168
4.1.6. El Terremoto de Ancash de 1946	173
4.1.7. El Terremoto de Ancash de 1970	176
4.1.7.1. El sismo en la Costa.....	179
4.1.7.2. El sismo en la Sierra	188
4.1.7.2.1. Los efectos directos del sismo en la Sierra.....	194
4.1.7.2.2. Efectos indirectos del sismo en la Sierra	200
4.1.8. Los sismos de Arequipa e Ica del presente siglo.....	210
4.1.8.1. 4.1.8.1 El sismo de Arequipa (2001)	210
4.1.8.1.1. Efectos indirectos del sismo, el Tsunami de Camaná .	219
4.1.8.2. El sismo de Ica de 2007	227
4.2. Riesgo Sísmico en las Ciudades más pobladas del País.....	234
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES	- 245 -
BIBLIOGRAFÍA.....	- 249 -

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Localización de los sismos a nivel mundial.</i>	2
<i>Figura 2. Sismos en el Perú durante el Siglo XX</i>	3
<i>Figura 3. Placas de la corteza terrestre</i>	22
<i>Figura 4. Esquema del movimiento de placas, sismos y subducción</i>	23
<i>Figura 5. Falla San Andrés (USA)</i>	24
<i>Figura 6. Falla inversa en un acantilado rocoso cerca de Marcona (Ica)</i>	25
<i>Figura 7. Ondas producidas por un sismo y su propagación</i>	27
<i>Figura 8. Ondas profundas y sentido de avance y deformación</i>	28
<i>Figura 9. Ondas superficiales y sentido de avance y deformación</i>	29
<i>Figura 10. Parámetros Físicos de una Onda Sinusoidal</i>	30
<i>Figura 11. Variación de la amplitud de ondas según medios rocosos</i>	31
<i>Figura 12. Constitución general de la corteza y superficie terrestre</i>	32
<i>Figura 13. Reflexión y Refracción de las Ondas Sísmicas</i>	33
<i>Figura 14. Mapa de intensidades sísmicas máximas.</i>	36
<i>Figura 15. Estructuras de los continentes.</i>	43
<i>Figura 16. Ejemplos de estructuras geológicas diversas.</i>	50
<i>Figura 17. Mapa geológico de un sector de Cajamarca</i>	51
<i>Figura 18. Estructuras plegadas de calizas (Cuenca del río Cañete)</i>	53
<i>Figura 19. Estructura geológica de un sector de Cajamarca.</i>	54
<i>Figura 20. Estructura geológica de un sector de la Selva en Cusco</i>	54
<i>Figura 21. Clasificación de suelos mediante tamices</i>	60
<i>Figura 22. Suelo mal graduado y Proceso de licuación por sismos</i>	64
<i>Figura 23. Proceso de licuación por sismos y efectos</i>	65
<i>Figura 24. Curvas de granulometría en suelos licuables y no licuables</i>	65
<i>Figura 25. Vista microscópica de una partícula de arcilla</i>	69
<i>Figura 26. Esquema de límites de Atterberg</i>	69
<i>Figura 27. Zonificación de suelos expansivos en el norte del país</i>	72
<i>Figura 28. Influencia de la fisiografía local en la respuesta sísmica.</i>	74
<i>Figura 29. Tensiones de aceleración horizontal en edificaciones</i>	78
<i>Figura 30. Isoaceleraciones para 10% de excedencia en 50 años</i>	80
<i>Figura 31. Antecedentes de la Norma E.030 Diseño Sismorresistente.</i>	81
<i>Figura 32. Esquema Sismotectónico del Territorio Peruano</i>	83
<i>Figura 33. Períodos de retorno para las asperezas en la Costa</i>	87

<i>Figura 34. Amortiguador en un edificio nuevo.....</i>	94
<i>Figura 35. Ubicación de sismos en la Costa central</i>	112
<i>Figura 36. Mapa de Principales Sismos.....</i>	117
<i>Figura 37. Esquema de la erupción del volcán Huaynaputina (1600) ..</i>	120
<i>Figura 38. Área geográfica del volcán Huaynaputina.....</i>	121
<i>Figura 39. Plano de Lima para el año 1746.....</i>	128
<i>Figura 40. Mapa de inundación modelizada para el Callao.....</i>	130
<i>Figura 41. Arica antes del terremoto y tsunami de 1868.....</i>	133
<i>Figura 42. Fotos de Arica, luego del sismo y tsunami de 1868</i>	143
<i>Figura 43. Corbeta peruana “América” varada por el tsunami de 1868</i>	144
<i>Figura 44. Foto de Arica, luego del sismo y tsunami de 1877</i>	144
<i>Figura 45. Cortes estructurales en Piura y La Libertad.....</i>	148
<i>Figura 46. Mapa de Lima y Callao en 1940</i>	151
<i>Figura 47. Isosistas de los terremotos de Lima de 1940 y 1966</i>	153
<i>Figura 48. Relaciones de daños por sismos y tipos de construcción .</i>	156
<i>Figura 49. Mapa de Lima y Callao en 1970</i>	159
<i>Figura 50. Ámbito urbano de Lima Metropolitana en 1974 y 2018</i>	165
<i>Figura 51. Comparativo de aceleraciones habidas en sismos</i>	167
<i>Figura 52. Mapa de isosistas en Lima y Callao por el sismo de 1974..</i>	168
<i>Figura 53. Mapa de Zonificación de suelos para Lima Metropolitana..</i>	170
<i>Figura 54. Crecimiento del PBI del Perú de 1950 a 2019.....</i>	171
<i>Figura 55. Crecimiento % de población regional entre 1940 y 2017</i>	171
<i>Figura 56. Isosistas del sismo de 1946 y zona de la falla Quiches</i>	174
<i>Figura 57. Mapa de Microzonificación sísmica de Chimbote.....</i>	182
<i>Figura 58. Imagen satelital de Chimbote y alrededores</i>	183
<i>Figura 59. Licuación y desplazamiento lateral en Chimbote</i>	186
<i>Figura 60. Severa destrucción en viviendas precarias en Chimbote...</i>	186
<i>Figura 61. La Ciudad de Casma, luego del sismo de 1970</i>	187
<i>Figura 62. Bloques geológicos de la Sierra de Ancash</i>	191
<i>Figura 63. Vista de la ciudad de Huaraz, antes del terremoto</i>	195
<i>Figura 64. Vista de la ciudad de Huaraz, después del terremoto</i>	196
<i>Figura 65. Una calle de Huaraz, después del terremoto.....</i>	196
<i>Figura 66. Características de un suelo céntrico (Barrio de Belén).....</i>	197
<i>Figura 67. Alud – aluviones de 1962 y 1970 sobre Ranrahirca</i>	201
<i>Figura 68. Alud a causa del sismo de 1970 sobre Ranrahirca.....</i>	202
<i>Figura 69. Bloque rocoso de aproximadamente 200 ton)</i>	203

<i>Figura 70. Yungay vista después del aluvión de Ranrahirca (1966)</i>	204
<i>Figura 71. Mapa geomorfológico de Huaraz.....</i>	207
<i>Figura 72. Sismo de Arequipa, epicentro e isosistas generales</i>	211
<i>Figura 73. Efectos del sismo en una vivienda en Tacna</i>	212
<i>Figura 74. Número de viviendas afectadas por departamento.....</i>	212
<i>Figura 75. Calle céntrica de Moquegua, a días de ocurrido el sismo ..</i>	213
<i>Figura 76. Mapa de Zonificación Sísmica – Geotécnica de Camaná....</i>	217
<i>Figura 77. Abanico aluvial del río Camaná y zona del tsunami</i>	220
<i>Figura 78. Daños causados por el tsunami en el balneario La Punta..</i>	221
<i>Figura 79. Imagen del área inundada por el tsunami, Camaná.....</i>	221
<i>Figura 80. Isosistas del Sismo de Ica, 2007</i>	227
<i>Figura 81. Efectos del sismo en edificaciones de Tambo de Mora</i>	230
<i>Figura 82. Efectos del sismo en edificaciones de Pisco e Ica</i>	231
<i>Figura 83. Mapa de Peligros de Pisco.....</i>	232

ÍNDICE DE CUADROS

<i>Cuadro 1. Fallas activas y sus características en el Perú.....</i>	26
<i>Cuadro 2. Velocidad de las ondas P en medios rocosos (m/s)</i>	30
<i>Cuadro 3. Relación de magnitud, desplazamiento y energía en sismos</i>	38
<i>Cuadro 4. Calificaciones para las distintas RCS de las rocas</i>	45
<i>Cuadro 5. Clasificación de Suelos Según el Sistema SUCS.....</i>	59
<i>Cuadro 6. Matriz de Operacionalización de Variables</i>	99
<i>Cuadro 7. Matriz de Instrumentos</i>	102
<i>Cuadro 8. Sismos habidos en el Perú desde el Siglo XVI (> M:6.0)</i>	108
<i>Cuadro 9. Crecimiento poblacional de la gran Lima en el país</i>	152
<i>Cuadro 10. Registros de aceleración del sismo de 2007 en Ica</i>	228
<i>Cuadro 11. Ciudades más pobladas, Caracteres y Riesgo Sísmico</i>	236

LISTA DE ACRÓNIMOS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ASTM	American Society for Testing and Materials.
CDMEX	Ciudad de México.
CENEPRED	Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres.
CISMID	Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres.
CPI	Compañía Peruana de Estudios de Mercados y Opinión Pública
GORE	Gobierno Regional.
GPS	Sistema de Posicionamiento Global.
IGP	Indicación Geográfica Protegida.
IGP	Instituto Geofísico del Perú
INACAP	Instituto Nacional de Capacitación Profesional.
INAIGEM	Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña.
INDECI	Instituto Nacional de Defensa Civil.
INEI	Instituto Nacional de Estadística e Informática.
INGEMMET	Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.
MM	Mercalli Modificada.
MVCS	Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.
ONU	Organización de las Naciones Unidas.
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.
SASMEX	Sistema de Alerta Sísmica Mexicano.
SIG	Sistema de Información Geográfico
SUCS	Sistema Unificado de Clasificación del Suelo.
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.
UNISDR	Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres
UNMSM	Universidad Nacional Mayor de San Marcos

RESUMEN

La presente investigación examina la problemática sísmica de las ciudades de la Costa y Sierra del país, teniendo en cuenta que el Perú es uno de los países altamente sísmicos del planeta, y la Costa y Sierra, sus regiones más amenazadas, donde se hallan sus mayores ciudades y población del país. La actividad sísmica que usualmente ocurre en Perú, se debe principalmente a que su borde occidental es una zona en que convergen tectónicamente las placas Nazca y Sudamericana, proceso que genera grandes fricciones en el interior de la corteza, con las consiguientes rupturas internas y sismos. En el país ocurren algunos sismos muy graves cada algunas décadas y sismos graves en unos pocos años. Hasta las primeras décadas del siglo pasado casi la mitad de la población nacional era rural, y los sismos afectaban a ciudades pequeñas. Actualmente, la población urbana nacional supera el 80%, y sus ciudades, especialmente las de la Costa, que es la región más sísmica, han crecido a ritmos poblacionales casi explosivos. Por ello, la amenaza sísmica se ha tornado más peligrosa por el aumento de vulnerabilidades y exposición. Esta investigación, parte del análisis de la fenomenología sísmica y de la realidad de las ciudades costeras y andinas, a través del examen de once de los más violentos sismos habidos desde 1600 hasta el presente, los cuales incluyen desde grandes sismos de origen volcánico o tectónico, unos con ocurrencia de tsunamis, otros con grandes movimientos de masa, diurnos y nocturnos, sismos severos de efectos locales y otros de efectos en grandes áreas; es decir, es un análisis geográfico que pretende ser integral, en la medida del carácter de esta ciencia, desarrollando así la Geografía del Riesgo, centrada en los peligros sísmicos y sus efectos en las ciudades. Se señala que la geografía y, particularmente, la geografía del riesgo, es una disciplina que no se viene empleando en la medida necesaria, en desmedro de la calidad de las evaluaciones y gestión del riesgo físico en el país.

ABSTRACT

This research examines the seismic problems of cities in the coastal and highland regions of Peru, considering that Peru is one of the most seismically active countries on the planet, and that the coast and highlands are its most threatened regions, home to the country's largest cities and population. The seismic activity that commonly occurs in Peru is primarily due to the fact that its western border is an area where the Nazca and South American plates converge tectonically, a process that generates significant friction within the Earth's crust, resulting in internal ruptures and earthquakes. The country experiences some very severe earthquakes every few decades and severe earthquakes every few years. Until the early decades of the last century, almost half of the national population was rural, and earthquakes primarily affected small towns. Currently, the urban population exceeds 80%, and its cities, especially those on the coast, the most seismically active region, have grown at almost explosive rates. Therefore, the seismic threat has become more dangerous due to increased vulnerabilities and exposure. This research, based on an analysis of seismic phenomena and the realities of coastal and Andean cities, examines eleven of the most violent earthquakes that have occurred from 1600 to the present. These include large earthquakes of volcanic or tectonic origin, some with tsunamis, others with large mass movements, both day and night, severe earthquakes with local effects, and others with effects across large areas. In short, it is a geographical analysis that aims to be comprehensive, in keeping with the nature of this science, thus developing the Geography of Risk, focused on seismic hazards and their effects on cities. It is noted that geography, and particularly the geography of risk, is a discipline that is not being used to the extent necessary, to the detriment of the quality of physical risk assessments and management in the country

.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Situación Problemática

En todo lugar y tiempo, las poblaciones del mundo, grandes o pequeñas, urbanas o rurales, desarrolladas o subdesarrolladas, han estado y están siempre en mayor o menor medida, sujetas a la fenomenología y dinámica natural propia de la ubicación geográfica en que se ubican, la cual sumada a condiciones ambientales, históricas y sociales de cada territorio, determinan en cada lugar un cierto nivel de riesgo natural.

Olivier Dollfus (1991, pág. 85), ilustre geógrafo y peruanista francés, definía este riesgo como “la probabilidad de que un fenómeno natural provoque pérdidas en vidas humanas y daños a los bienes”. Por su parte, Keller y Blodgett (2007, pág. 6), lo definen como “cualquier proceso natural que representa una amenaza para la vida humana o la propiedad. El suceso en sí no es un riesgo; más bien un proceso natural se convierte en un riesgo cuando amenaza los intereses humanos”.

Con alguna frecuencia, este riesgo se materializa causando desastres de enormes proporciones, verdaderas catástrofes humanitarias. Así, en 2010, un sismo en Haití, dejó 220,000 muertos, 300,000 heridos y al país totalmente devastado. En 2011, el mundo observó por televisión el dantesco sismo y tsunami de Japón que causó más de 20,000 muertos, y daños enormes en una de las sociedades mejor preparadas ante estos fenómenos. En 2023, el terrible sismo de Turquía – Siria mató a más de 50,000 personas; el Perú, no es ajeno a catástrofes de esta magnitud. Como indican Lario y Bardají (2016, pág. 20), el número de desastres naturales no ha aumentado en los últimos años, sino que el enorme crecimiento poblacional mundial y su cada vez mayor concentración en grandes ciudades con actividades y patrimonios inmensos, hacen que la ocurrencia de tales eventos genere catástrofes cada vez mayores.

Los sismos, son los fenómenos naturales más peligrosos para la población en el mundo y sus ciudades, ya que son los que causan más muertes y daños por año (Bastida, 2005, pág. 929); pero, el nivel de riesgo de desastres que causan los sismos no depende solo de la frecuencia y magnitud con que ocurren, sino, esencialmente, de los caracteres de las poblaciones, sus bienes y actividades expuestas al peligro. De otro lado, la distribución sísmica no es uniforme en el planeta; como se ve en la Figura 1, la gran mayoría de sismos ocurre en determinados ejes o sectores mundiales que incluyen al Perú.

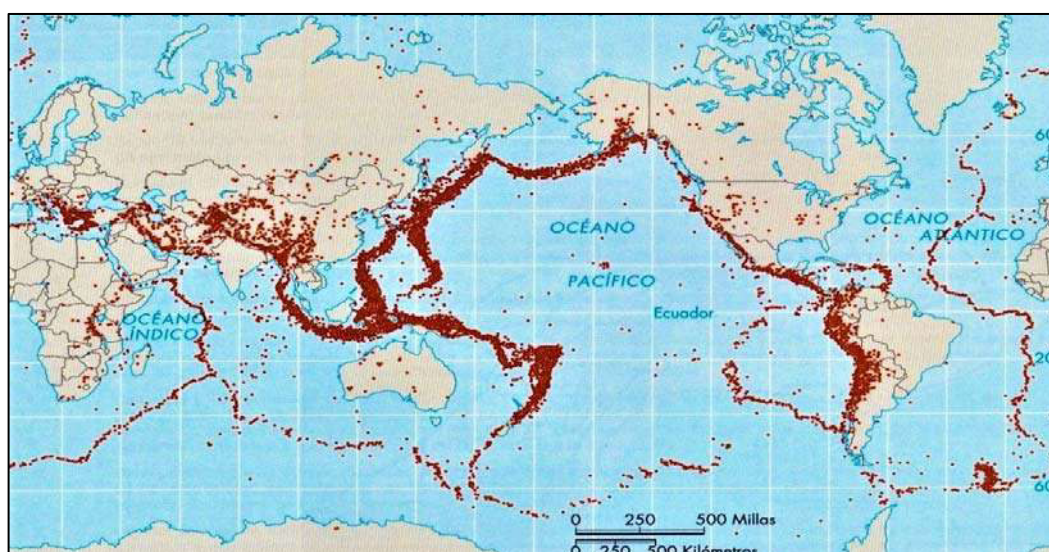


Figura 1. Localización de los sismos a nivel mundial.

En la figura, los puntos rojos representan la ocurrencia de sismos de Magnitud $> 5^1$ en los últimos años. Nótese como los sismos se encuentran ubicados en determinados ejes (que incluyen al territorio peruano), que coinciden con los límites de las placas terrestres. Una pequeña cantidad de sismos ocurren alejados de estos ejes. *Fuente.* (Keller & Blodgett, 2007, pág. 40).

Lario y Bardají (2016, pág. 60), señalan que la actividad sísmica mayor se concentra en un 98% en los actuales límites que tienen entre sí las grandes placas tectónicas del planeta, las mismas que se pueden entrever en la Figura 1. Prácticamente no hay región del planeta libre de este peligro, pero hay extensas áreas donde los sismos severos ocurren cada varios siglos o milenios, y otras donde suceden con frecuencias de pocos años. Tarbuck y Lutgens (2010, pág. 340), señalan que el 90% de los sismos mundiales

¹ En lo sucesivo, la magnitud de un sismo se indica por la letra M. Los caracteres de este parámetro de medición sísmica, se tratan más adelante, en la Sección Bases Teóricas (p.36).

ocurren a menos de 100 km de profundidad, que son más peligrosos. En el Perú, la distribución sísmica tampoco es uniforme. Esto se aprecia en la Figura 2, que muestra la ocurrencia de sismos entre 1900 y 2000.

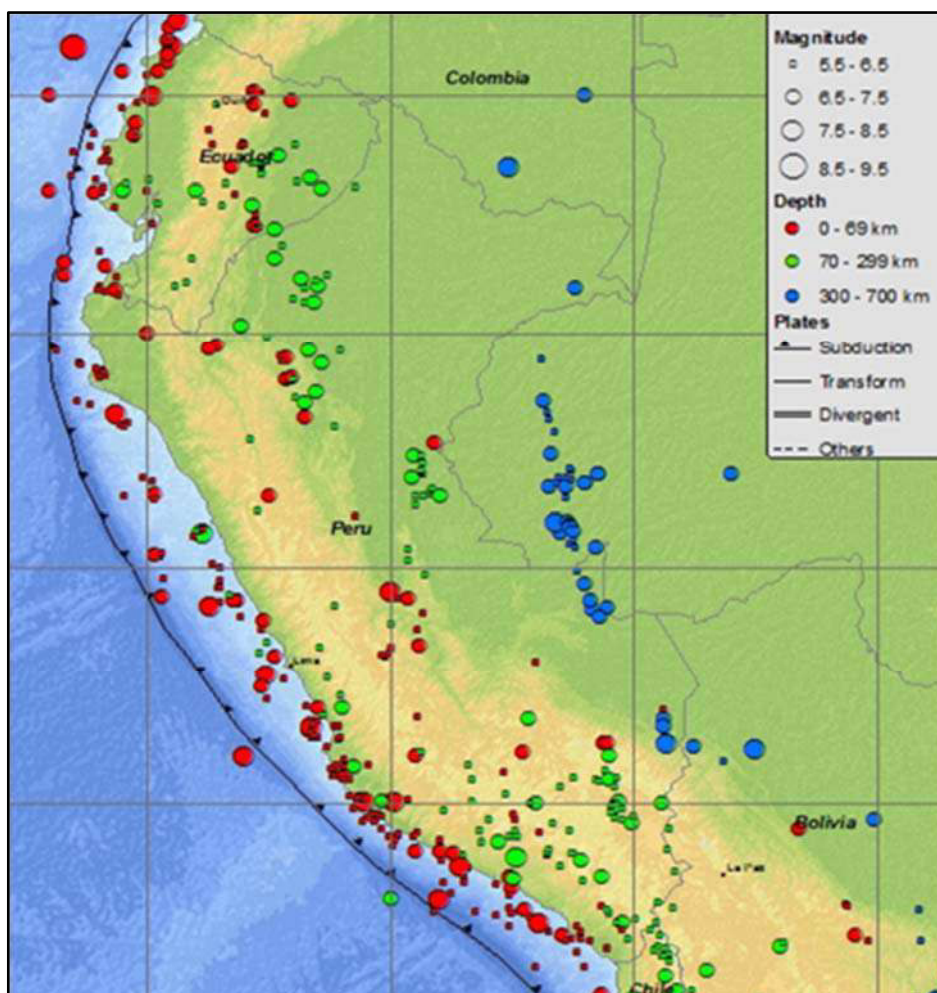


Figura 2. Sismos en el Perú durante el Siglo XX

En la figura se puede notar que los sismos más frecuentes, de mayor magnitud y más superficiales se presentan en la región costera y el mar adyacente. La Sierra presenta algunos de estos sismos potentes (rojo) y la Selva, solo unos pocos y menos potentes (amarillo y azul). *Fuente.* (U.S. Geological Survey, s.f.) <https://www.deperu.com/abc/informacion-sismica/2999/mapa-de-sismicidad-en-el-peru>

En la Figura 2, los círculos más pequeños indican sismos de M: 5.5 a 6.5; los intermedios de M: 6.5 a 7.5, y los más grandes de M: 7.5 a 8.5. Los círculos se presentan en tres colores, que representan hipocentros (puntos bajo la superficie donde ocurre un sismo). En rojo se tiene los sismos ocurridos a profundidad menor de 69 km; los amarillos son los ocurridos entre 70 y 299 km, y en azul, los habidos entre 300 a 700 km. La profundidad a la que ocurre un sismo es uno de los varios factores que inciden en su peligrosidad, siendo

los más superficiales los más peligrosos (Keller & Blodgett, 2007, pág. 45) porque las ondas sísmicas se amortiguan en las potentes masas rocosas que atraviesan hasta llegar a la superficie, cosa que ocurre poco en sismos superficiales.

Viendo el mapa, se desprende que es la región de Costa pegada al mar, especialmente la Costa Sur, la más afectada por la actividad sísmica, con sismos severos de $M > 8.0$. En la Sierra y Selva alta, ocurren sismos de profundidad mayormente intermedia, con algunos de $M > 6.5$. En la Selva más oriental, se han producido también sismos, en su mayoría de $M < 6.5$, pero casi todos profundos a muy profundos (azul), con muy pocos superficiales.

La sociedad no puede evitar los sismos, pero si mejorar las condiciones de la población expuesta, edificando viviendas, ciudades e infraestructuras sismorresistentes, mejorando avenidas y calles, capacitando a la población etc., implicando la acción constante de los Estados, con grandes inversiones y actos no usuales en países subdesarrollados como Perú. La ONU (UNISDR, 2015, pág. IV) destaca que, “países, como Argelia, Chile, Indonesia, Irán, Madagascar, Pakistán y Perú, no superarían una prueba de resistencia de su resiliencia fiscal ante una situación de pérdidas cada 100 años”. En el caso de las ciudades del país, trabajos hechos por Chlieh et al. entre 1994 y 2005 (citado por Tavera, 2014a, pág. 20), concluye en que un sector de 350 km de largo de la Costa central que incluye el área metropolitana de Lima – Callao, espera un sismo de $M: 8.5 - 8.7$, capaz de generar, decenas de miles de víctimas y daños incalculables.

Un sismo de la magnitud que se espera, podría (de ocurrir en Lima), comprometer la viabilidad futura no solo de la metrópoli sino de toda la nación y sus próximas generaciones, por su peso relativo en el contexto del país. Ayala (s.f., pág. 8), en una publicación del MVCS, señala que las pérdidas económicas que tuvo el país por sismos entre 1970 y 2009 (años sin grandes sismos en Lima) fueron de US\$ 29,000 millones. Entonces, la gravedad de este riesgo, demanda que todo lo que concierna a su evaluación y gestión, incluyendo sus metodologías, debe ser abordada con la mayor rigurosidad por todas las instancias nacionales, especialmente en sus ciudades.

1.2. Formulación del problema

Este trabajo de investigación, se sustenta en que la problemática sísmica de las ciudades del país es potencialmente grave y, que su tratamiento por parte de la sociedad, no siempre es llevada con las mejores directivas. Entre las carencias de criterios y/o medidas parciales, se considera que hay también un problema metodológico en las evaluaciones y gestión del riesgo, las cuales tienden a llevarse a cabo en el país, casi exclusivamente bajo la óptica de disciplinas especializadas, haciendo a un lado las necesarias perspectivas de corte integral u holístico, como el que proporciona la ciencia geográfica, casi no utilizada en el país o solo muy parcialmente. Esta deficiencia, planteada respecto al riesgo sísmico urbano, debe redundar en un cierto aumento de sus vulnerabilidades, siendo este un problema que debe subsanarse.

Se llega a esta afirmación, al constatar que casi no hay formación profesional universitaria en el país con carácter integral, razón por la cual se soslaya esta necesaria perspectiva, que complementa los indispensables estudios, actividades y metodologías que desarrollan las diversas profesiones de carácter más específico. En este sentido, la presente tesis, desarrolla desde la perspectiva geográfica (que la tesis pretende impulsar), un análisis de los mayores sismos ocurridos en el país, desde el año 1600 a la fecha, en los actuales departamentos occidentales de Costa y Sierra, sismos que han dejado (o debieron dejar) valiosas enseñanzas necesarias para enfrentar los futuros desastres sísmicos en las ciudades costeras y andinas del país.

1.2.1. Problema General:

¿De qué manera influye la geografía del riesgo sísmico en las ciudades del Perú, considerando las características y consecuencias de los mayores sismos ocurridos en el país desde el año 1600 hasta la fecha?

1.2.2. Problemas específicos

¿De qué modo influye el peligro en las ciudades de la Costa y Sierra del Perú, considerando como referentes a los mayores sismos ocurridos en el país desde 1600 hasta la fecha?

¿De qué modo influye la vulnerabilidad en las ciudades de la Costa y Sierra del Perú, considerando a los mayores sismos ocurridos en el país desde 1600 hasta la fecha?

1.3. Justificación de la Investigación

La investigación se justifica porque trata de un tema de interés vital de la sociedad, puesto que atañe a la seguridad física de las ciudades del país, la de sus habitantes y su desarrollo humano actual y futuro.

1.3.1. Justificación Teórica

Calvo (1984, pág. 15), señalaba que “dentro de una definición muy tradicional de la geografía, los estudios sobre el riesgo han mostrado con claridad su capacidad para abordar problemas actuales, con una importante contribución real a su solución”. Este mismo autor decía que para los años ochenta, numerosos geógrafos norteamericanos y canadienses se habían insertado en la administración pública y empresas dedicadas a la evaluación y gestión del riesgo. Hoy en día la presencia de geógrafos participando en el tratamiento de la problemática del riesgo sísmico urbano, es un hecho usual en los países desarrollados y en la región, más no así en el Perú, donde se soslaya esta presencia. Al contrario de diversas concepciones (felizmente, cada vez minoritarias), que consideran al riesgo como un hecho evaluable preferentemente desde ópticas puramente ingenieriles, tecnológicas, sociales

o políticas, Capel y Urteaga (1991, pág. 67) destacaban en esos años que, “En Estados Unidos la investigación sobre riesgos naturales constituye una tarea interdisciplinaria en la que los geógrafos colaboran con ingenieros, geólogos, psicólogos y otros científicos sociales”.

La ausencia o presencia muy parcial de la perspectiva geográfica es, en teoría, un déficit de puntos de vista integral acerca del elevado riesgo sísmico de las ciudades del país, lo que debe redundar en una disminución de la calidad de las evaluaciones y gestión de este riesgo. En consecuencia, la tesis plantea que en el país es necesaria una efectiva participación de la ciencia geográfica y sus profesionales, en la amplia y compleja problemática del riesgo sísmico en las ciudades del país, a fin de complementar la también indispensable participación de los científicos y profesionales de ciencias especializadas, para enfrentar de mejor manera los futuros desastres sísmicos que se esperan. El análisis del riesgo natural se dirige en esta investigación a la seguridad de las ciudades, porque como afirma Calvo (1984, citado por (Capel, 2010, pág. 18)), “el peligro aumenta a medida que se incrementa la población, y ésta a nivel mundial es cada vez más urbana, más concentrada y dependiente de infraestructuras sofisticadas y vulnerables”.

La Tesis trata la problemática sísmica urbana, a partir de un examen de los mayores sismos ocurridos en el país desde el año 1600 a la fecha, bajo un enfoque integral geográfico, analizando las diversas realidades regionales, como las llanuras costeras, montañas y valles interandinos, zonas geográficas que incluyen la mayoría de ciudades más pobladas del país, y más amenazadas por los sismos. Con este enfoque, se pretende generar una mayor difusión de las similitudes y particularidades regionales que tienen las ciudades del país frente a la problemática sísmica, con el objeto de que esta caracterización sea un mayor sustento de trabajos relacionados a la evaluación y gestión de este riesgo en las ciudades del país.

1.3.2. Justificación Práctica

La tesis examina la problemática de los desastres naturales sísmicos en las ciudades costeras y andinas del Perú desde la perspectiva de la ciencia geográfica y, más concretamente, de tres de sus ramas, la geografía física, geografía regional y geografía del riesgo; la primera analizando los medios urbanos desde el punto de vista de las ciencias de la Tierra; la segunda, desde el punto de vista de las relaciones y similitudes contenidas en cada región, y la tercera, desde una perspectiva holística integral del riesgo y de ordenamiento del territorio, aspecto que, a decir de Capel y Urteaga (1991, pág. 92), es característico de la ciencia geográfica.

Esta perspectiva tiene también un sentido práctico, en la medida que, los desastres naturales y, particularmente, los peligros de origen sísmico, son ocurrencias de carácter transversal, que implican hechos naturales, complejos y diversificados, a la vez que los aspectos sociales, económicos, políticos, históricos y coyunturales, que son principalmente el sustento de las vulnerabilidades. Robert y Metzger (2013, pág. 4) destacan que “los análisis de vulnerabilidad tienen que ser realizados después de los de los peligros, en las zonas consideradas como expuestas”. Todo esto exige que, el análisis y tratamiento de esta problemática deba ser integral, conjugando las orientaciones de las disciplinas especializadas, con aquellas de corte integral, como la geografía, lo cual supondría un escenario de mejor manejo de esta problemática, planteando una mejora significativa en la mitigación y/o reducción del potencial de los futuros desastres y catástrofes sísmicas.

Zilio et al. (2017), en su publicación “Una Mirada Geográfica sobre las Problemáticas Geológicas y Geomorfológicas. Riesgo e Incertidumbre en Los Terremotos de Chile y Haití, 2010”, destacan como estos dos sismos, muy distintos en su magnitud, dieron resultados también muy diferentes; el primero mucho más potente que el segundo, ocasionó alrededor de 600 víctimas, la mayoría producto de un tsunami que se generó; el segundo, en Haití, 10 veces menos potente, pero más superficial, ocasionó más de 200,000 muertes y el país devastado hasta la fecha y, probablemente por mucho tiempo más.

Es por ello, que el tratamiento de esta problemática debe considerar todos los supuestos naturales y humanos, si se quiere realmente enfrentar la problemática sísmica en la mejor de las perspectivas, para evitar las ingentes pérdidas humanas y materiales, incluyendo las también cuantiosas pérdidas no tangibles. Consiguientemente, se deben reforzar las perspectivas de carácter integral, como la geográfica, como necesario complemento de las visiones especializadas, algo que, a la fecha, no se aplica bien en el país.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Identificar las condiciones geográficas relacionadas con los peligros y vulnerabilidades, en las ciudades de la Costa y Sierra afectadas por los mayores sismos habidos en el territorio peruano desde el año 1600 a la fecha, con el objeto de demostrar la importancia de la Geografía del Riesgo como disciplina útil para la Evaluación y Gestión del Riesgo.

1.4.2. Objetivos específicos

- A. Examinar las características físico geográficas de las ciudades de Costa y Sierra, según los mayores sismos habidos desde 1600 a la fecha.
- B. Analizar los peligros y vulnerabilidades principales de las ciudades de Costa y Sierra, según los mayores sismos habidos desde 1600 a la fecha.
- C. Establecer las condiciones comparativas, globales y específicas de las geografías regionales propias de las ciudades de Costa y Sierra, bajo una perspectiva holística que integre el conocimiento del medio físico y socioeconómico.

1.5. Hipótesis de investigación

1.5.1. Hipótesis general.

La Geografía del Riesgo Sísmico es una disciplina de carácter integral que aporta significativamente en el tratamiento de la problemática sísmica nacional, particularmente en el de las ciudades de Costa y Sierra, que son las más amenazadas del país.

1.5.2. Hipótesis específicas

Las condiciones físico geográficas inciden decisivamente en los peligros sísmicos que amenazan a las ciudades de Costa y Sierra, que son las más amenazadas por la actividad sísmica nacional.

Las condiciones geográficas inciden decisivamente en las vulnerabilidades sísmicas que afectan a las ciudades de Costa y Sierra, las más amenazadas por la actividad sísmica nacional.

Existen patrones de comportamiento y dinámicas sísmicas, particulares y más o menos propios en cada región geográfica del país, por lo que su adecuado conocimiento aporta significativamente al tratamiento de la problemática sísmica urbana en el país.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de Estudio

A continuación, y tomando como criterio básico la participación de la ciencia geográfica y geógrafos en la evaluación y gestión del riesgo sísmico, se presentan primero algunos trabajos de Tesis de Doctorado en Geografía, en países latinoamericanos y España. Luego, se presentan trabajos hechos en el Perú, solo uno de ellos desarrollado por geógrafos, y donde prácticamente no hay aún Tesis de Post Grado en Evaluación y Gestión del Riesgo.

2.1.1. Antecedentes Internacionales

Ruiz (2011), presentó la Tesis “Vulnerabilidad Territorial y Evaluación de Daños Post Catástrofe. Una Aproximación desde la Geografía del Riesgo”., para optar el grado de Doctor. La Tesis se centra en el estudio de la vulnerabilidad territorial y estimación de daños que deriven de los desastres, con los objetivos de analizar el rol de la vulnerabilidad, identificar y evaluar la importancia de los factores territoriales, analizar las capacidades de los métodos de evaluación rápida de daños y desarrollar un método de evaluación de riesgos que incorpore la incertidumbre en la definición de los componentes peligro, exposición y vulnerabilidad. Destaca el hecho de que la comunidad científica ha prestado menor atención a la vulnerabilidad que a las amenazas naturales, y enfatiza en los temas de la geografía del riesgo, proponiendo una metodología para la evaluación de la vulnerabilidad territorial integrando tres componentes: vulnerabilidad intrínseca, vulnerabilidad social y exposición.

Martínez (2015), presentó la Tesis “La Construcción del Conocimiento Científico del Riesgo de Desastre: Epistemología, Teorías y Metodología de los Estudios, desde una Perspectiva Geográfica”, para optar el grado de Doctora. Parte del análisis de los principios o modelos usados para

fundamentar la teoría del riesgo de desastres desde una perspectiva geográfica. Tuvo como objetivo identificar la condición de riesgo que presenta un sistema, con el fin de actuar sobre los componentes que generan vulnerabilidad, para detener o mitigar el riesgo, según las prioridades de la sociedad y así formular políticas y estrategias de prevención y desarrollo más acordes con la realidad. En un primer nivel, explora, selecciona y caracteriza los aportes de los geógrafos en los estudios de amenaza, vulnerabilidad, riesgos y desastres naturales; en segundo, identifica las teorías, metodologías y tendencias geográficas aplicables al conocimiento del riesgo de desastres, destacando que esto implica interdisciplinariedad con una mayor integración de elementos, que hasta ahora habían sido estudiadas analíticamente por cada disciplina. Concluye identificando los pasos que permiten caracterizar las amenazas, vulnerabilidades a nivel nacional, regional y local, y las relaciones de la sociedad que indiquen baja capacidad de resiliencia.

Narváez (2020), presentó el artículo “Modelo Decisional de Riesgo Sísmico en el Departamento Pocito (San Juan – Argentina)”. El área de trabajo se halla en una zona tectónicamente activa y muy alta sismicidad, por lo cual el riesgo sísmico ha sido ampliamente tratado por especialistas de diversas disciplinas. Pero, todos los estudios lo enfocan desde el punto de vista del fenómeno natural que lo ocasiona, o bien teniendo en cuenta solo la vulnerabilidad edilicia. La Geografía de los Riesgos, lo enfoca con una visión holística, considerando el riesgo sísmico como producto del peligro sísmico por la vulnerabilidad. Tuvo como objetivo obtener un modelo decisional basado en un mapa de mínimo riesgo sísmico que comprende las áreas diferenciales de peligro sísmico y vulnerabilidad identificadas para el caso del departamento Pocito (Argentina). La metodología consiste en la integración de la evaluación multicriterio y de los SIG, y se complementa con el análisis in situ para la validación de los resultados propuestos como modelo decisional. Los resultados se plasman en mapas que muestran las áreas de riesgo sísmico a ser consideradas en la prevención y mitigación.

Zilio et al. (2017), presentaron el Artículo “Una Mirada Geográfica sobre las Problemáticas Geológicas y Geomorfológicas: Riesgo e Incertidumbre en los

Terremotos de Haití y Chile 2010”. Tuvo como objetivo, establecer las causas de los desastres “naturales” desde una posición alternativa al enfoque tradicional, entendiendo la vulnerabilidad en el contexto de sus orígenes políticos, sociales y económicos. El trabajo destaca que siendo el sismo de Chile 10 veces más potente que el de Haití, el desastre fue inmensamente mayor en Haití que en Chile. La gran diferencia en los niveles de desastre de estos dos sismos, demostraría que los desastres no son del todo naturales, y que dependen en mayor o menor medida del grado de exposición y vulnerabilidad de la población, debiendo tenerse en cuenta tanto la peligrosidad como la incertidumbre que, junto a la exposición y vulnerabilidad, constituyen interactivamente el riesgo. Metodológicamente se trabajó con bibliografía específica, desarrollando una indagación cuantitativa y cualitativa, tanto de los caracteres geológicos de los sismos como de las características geográficas de los lugares afectados y de su población, a fin de realizar un estudio comparativo del riesgo asociado a ambos sismos.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

Robert y Metzger (2013), presentaron un Artículo titulado “Enfoques de la Vulnerabilidad Urbana: Entre Geografía de los Riesgos y Geografía Urbana”, en el que destacan la importancia que ha adquirido el estudio de la vulnerabilidad urbana en las ciudades de las áreas sísmicas mundiales. Tuvo como objeto demostrar la necesidad de vincular las investigaciones sobre riesgos, con los estudios urbanos y aclarar las interconexiones entre estos campos de investigación. Para este efecto, examinaron en detalle el caso de la metrópoli Lima -Callao, sus vulnerabilidades más relevantes, como la calidad de viviendas, tugurización, diseño de barrios, red vial, realidad hospitalaria, presencia bomberil y policial, gasoductos, áreas verdes, entre muchas variables de alta incidencia sísmica, enfatizando en las muy distintas capacidades de respuesta de la población, en sus distritos más pudientes y menos poblados, o de los millones de pobladores de los distritos más pobres. Examina también la calidad geotécnica de los suelos y diversidad topográfica

limeñas, y las posibles áreas sujetas a tsunamis, considerando la diversa exposición de la población limeña a estas variables. Los variados niveles de peligro, vulnerabilidad y riesgo sísmico se presentan en numerosos mapas.

Campoverde (2017), elaboró la Tesis, “Escenarios de Riesgo Sísmico en el Distrito de San Isidro” para optar el título de Ingeniero Geógrafo, orientada a examinar las condiciones del riesgo sísmico para un distrito limeño de alto nivel socioeconómico y baja densidad de su población, como es el distrito de San Isidro. La tesis tuvo como objetivo, establecer los escenarios de riesgo sísmico de las edificaciones y elementos susceptibles a colapso, por un sismo de $M > 8.5$. La tesis también, cartografió la ubicación de los recursos para atención de desastres, como los pozos de distribución de agua potable y zonas de refugio temporal. Para todo efecto se aplicó la herramienta SIG, presentando mapas para el distrito. Los resultados fueron 19 edificaciones con Riesgo Alto; 7,666 de Riesgo Medio y 596 de Riesgo Bajo.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. La Geografía del Riesgo

Sobre la geografía del riesgo, Martínez, C. (2014, pág. 1), dice:

“La Geografía nos permite conocer el territorio, y por tanto nos da la clave para definir su identidad y saber gestionarla beneficiosamente. De entre las ramas de la Geografía para conocer un territorio, una de las más pragmáticas y empíricas, por su íntima, continua y visible relación con la vinculación territorial de las sociedades, es la Geografía de los Riesgos, especialmente en lugares donde éstos han estado presentes desde el primer asentamiento humano”.

Por su parte, Calvo (1984) citado en Capel, H. (2010, pág. 18) decía:

“no existe el riesgo sin tener presente su trascendencia para el hombre y las modificaciones que éste puede introducir en aquel. Iniciativa y acción humanas son componentes esenciales de peligro: si no hay población las inundaciones no son riesgos, los terremotos del Terciario tampoco lo son”

El propio Capel, H (2010, pág. 18), dice “El tema de los riesgos naturales tiene interés desde la perspectiva de la ordenación del territorio, ya que obliga, o debería obligar, a adaptaciones ante la repetición de los mismos”

Los escritos de estos reconocidos geógrafos españoles, destacan el papel intrínseco que tiene la ciencia geográfica respecto de los riesgos naturales para las sociedades, y que, por consiguiente, la geografía de los riesgos, es una rama de la geografía que ha surgido como respuesta de la ciencia a esta problemática directamente relacionada con el ordenamiento del territorio, y es por ello, que su práctica ausencia en nuestro quehacer nacional sobre el riesgo, resulte una carencia significativa que debe rectificarse.

2.2.1.1. Definiciones Sobre Riesgo Físico y sus Componentes

El CENEPRED (2017, pág. 6) define al riesgo de desastres² como, “la probabilidad de que la población y sus medios de vida sufran daños y pérdidas a causa de su condición de vulnerabilidad y el impacto de un peligro”. Este riesgo se expresa por la ecuación:

$$R = P \times V$$

Donde:

R es el riesgo de desastres; P, el peligro o amenaza; V, la vulnerabilidad

² La Tesis refiere únicamente a desastres de origen sísmico, los cuales se enmarcan dentro del concepto general de riesgos de desastres naturales

Esta ecuación aplica a todo evento natural que incida sobre un medio dado. Los eventos se constituyen en peligros o amenazas solo cuando su ocurrencia plantea daños potenciales severos a la población, a su patrimonio y/o a sus actividades sociales y económicas³. La vulnerabilidad es la capacidad que tienen los medios, de resistir en menor o mayor medida al peligro o peligros que los amenazan. Operando estos dos factores (en la Tesis se consideran dimensiones o subvariables) se tiene el valor del riesgo. Si el valor de los dos factores o de alguno de ellos se incrementa, el riesgo también crecerá. Pero, tanto el máximo peligro potencial, como la mayor vulnerabilidad que tenga una ciudad, no generarían riesgo alguno si es que el valor de uno de estos es cero.

La definición del CENEPRED sobre el riesgo de desastres es universal, es decir, empleada de manera general en instituciones e investigadores de todo el mundo. Sin embargo, algunos autores, como Varnes (1984), citado en Gonzáles de Vallejo (2010, págs. 610 - 611), plantean que el riesgo se compone adicionalmente de un tercer factor, expresado del siguiente modo:

$$R = P \times V \times E$$

Donde, E es la exposición de los elementos en riesgo. Al respecto, este autor señala que existen indefiniciones sobre la variable exposición, la cual queda muchas veces considerada dentro de la vulnerabilidad a pesar de ciertas ambigüedades propias. Este mismo autor indica que también el riesgo puede conocerse a partir de otra expresión, del modo siguiente:

$$R = P \times V \times C$$

Donde, C es el coste o valor de los elementos expuestos, definición que apunta a una valoración cuantitativa del riesgo dado. En la presente Tesis, se asume la definición dada por el CENEPRED, que es prácticamente universal, aplicándolo en los mismos términos al riesgo sísmico, como resultado del

³ Son incontables los eventos corrientes de la dinámica terrestre que no producen amenaza alguna, como, por ejemplo, vientos y lluvias débiles, o la infinidad de pequeños sismos que en todo momento (imperceptibles a los sentidos), se producen por la geodinámica interna

peligro sísmico por la vulnerabilidad sísmica. Al respecto Ocola (2005, pág. 88) refiriéndose al riesgo sísmico lo expresa con la siguiente notación:

$$\text{Riesgo Sísmico}(X, t) = [\text{Peligro Sísmico}(X, t)] \times [\text{Vulnerabilidad}(X, t)]$$

En esta ecuación, que es en esencia la misma indicada por el CENEPRED, Ocola (2005, pág. 88) agrega dos sub factores: ubicación (X) y tiempo (t), aludiendo a que las dimensiones consideradas en el riesgo deben precisar las condiciones de área afectada y el tiempo implicado en el proceso (antes, durante y después del evento).

2.2.1.2. El Peligro y la Vulnerabilidad

El peligro o amenaza, es definido por el CENEPRED (2017, pág. 4), como “la probabilidad de que un fenómeno físico, potencialmente dañino, de origen natural o inducido por la acción humana, se presente en un lugar específico con una cierta intensidad y en un periodo de tiempo y frecuencia definidos”.

Por su parte, Lario y Bardají (2016, pág. 59), dicen que la “peligrosidad y riesgo sísmico van fundamentalmente asociados a la propagación sobre el terreno, de la energía liberada durante el proceso de ruptura de la falla que genera el terremoto”. Se señala que, un sismo se constituye en un claro peligro o amenaza, solo cuando alcanza una magnitud capaz de generar daños (lo cual también es relativo en función de las características del área, su población y elementos patrimoniales que amenaza). Es una dimensión independiente, porque la amenaza sísmica puede estar siempre presente, pero la sociedad amenazada no tiene posibilidad alguna de impedir su ocurrencia o variar su magnitud.

Sobre la vulnerabilidad, el CENEPRED (2017, pág. 93), la define como: “la susceptibilidad de la población, la estructura física o las actividades socioeconómicas, de sufrir daños por acción de un peligro. La vulnerabilidad puede ser explicada por tres factores: Exposición, Fragilidad y Resiliencia”.

A diferencia del peligro, la vulnerabilidad de un área si puede ser modificada; pudiendo reducirse con la aplicación de diversas medidas, como mejora de las construcciones, preparación de la población amenazada, instalaciones e infraestructuras, e incluso, con el empleo de mejores métodos evaluativos y de gestión del riesgo. Pero, la vulnerabilidad de un área también puede agravarse, si se dan condiciones como aumentos desordenados y masivos de la población, deterioro económico, insalubridad, delincuencia y otras de carácter social. También obras mal concebidas de infraestructura vial, represas, viviendas, etc. aumentan la vulnerabilidad sísmica.

Respecto a la exposición y resiliencia, El CENEPRED (2017, págs. 47-48) y la mayoría de instituciones e investigadores en el mundo, las consideran como elementos constitutivos de la vulnerabilidad. Sobre la exposición, destaca que “a mayor exposición, mayor vulnerabilidad”, refiriendo al estado situacional de cómo están expuestas la población, unidades productivas, servicios públicos e infraestructuras a las amenazas, en las que las características y condiciones geográficas del sitio, plantean situaciones de exposición más o menos favorables al desarrollo de desastres. Sobre la resiliencia, El CENEPRED (2017, págs. 47-48), la define como la “capacidad de las personas, familias y comunidades, entidades públicas y privadas, actividades económicas y estructuras físicas, para asimilar, adsorber, adaptarse, cambiar, resistir y recuperarse del impacto de un peligro o amenaza”.

Aplicando las definiciones del CENEPRED (2017) a la Tesis, se puede decir a modo de ejemplo, que los sismos son una muy seria amenaza para gran parte del país. Pero que, la mayor exposición de la región Costa, situada más cerca de las fuentes que causan los sismos más frecuentes y potentes, y la Selva, más lejana a estas fuentes, hace que las ciudades costeras estén más expuestas que las ciudades de Selva, quedando las ciudades de la Sierra en un nivel intermedio de riesgo por exposición. Esta distribución regional del peligro sísmico es muy conocida por la población del país, hecho respaldado tanto por la realidad tangible como por los numerosos estudios realizados, entre ellos, Castillo y Alva (1993, págs. 8, 10); Kuroiwa (2005, págs. 179 - 185); Tavera (2014a, pág. 1), entre otros.

Pero, el peligro por la exposición de un área no refiere solo a la mayor o menor cercanía geográfica a las fuentes sísmicas, sino también a la naturaleza de la propia estructura física expuesta, es decir a todas las características que, de un modo u otro, hacen que un medio se halle en mayor o menor medida expuesto al peligro. Así, es muy sabido que el efecto en la población de una ciudad afectada por un sismo de cierta potencia, ocurrido a una determinada distancia y profundidad, será mucho más grave para los pobladores que habitan viviendas de baja calidad constructiva, que aquellos que habitan viviendas asísmicas. Esta diferencia aplica también si ambos tipos de viviendas (bien y mal construidas) estuvieran ubicadas en el mismo sitio con el mismo tipo de suelo, pendiente y/o altitud. También puede darse el caso, de que, si toda la población estuviera situada en viviendas de buena calidad constructiva, aun así, siempre estará mucho más expuesta al peligro sísmico si se hallan en suelos de mala calidad geotécnica.

La precariedad de la organización poblacional de un barrio o sector tugurizado de la ciudad, hará que el efecto del sismo sea mayor en estos sectores que en otros mejor organizados y menos precarios ("resiliencia poblacional" del lugar). En realidad, hay numerosos factores de orden natural que inciden en la exposición y, por tanto, en la vulnerabilidad de una ciudad y su riesgo físico, como los que Lario y Bardají (2016, págs. 97 - 98) señalan, entre otros, la cercanía a un río o torrente, a una ladera susceptible a desprenderse, la altitud de construcción en las edificaciones próximas al litoral (respecto a tsunamis), tipos de suelo compactos, poco compactos y hasta licuables, napas freáticas; fallas y materiales rocosos poco competentes etc.

En síntesis, para conocer los aspectos básicos del riesgo sísmico, se debe primero conocer los aspectos básicos de la naturaleza de los sismos, que hacen de estos eventos los fenómenos naturales que mayores desastres han causado a lo largo de la historia a las ciudades del mundo. Siguiendo lo indicado por Robert & Metzger (2013, pág. 4), que para definir el riesgo de un área debe primero estudiarse la naturaleza del peligro amenazante, es que se procede, a continuación, a examinar los principales aspectos relacionados a la actividad sísmica en el país.

2.2.2. El Peligro Sísmico: Sismos y Ondas Sísmicas

Lomnitz (2005, pág. 10) dice que un sismo o temblor es “una fractura, un deslizamiento repentino de las rocas profundas en la Tierra”. Lugo (2011, pág. 371), indica que un sismo es un movimiento brusco de masas rocosas que se produce en la corteza o en el manto superior de la Tierra, que se manifiesta en la superficie por sacudidas de diversa intensidad. Señala también que la profundidad del punto donde se origina un sismo varía de cientos de metros a 700 km y se conoce como foco o hipocentro, y que la proyección vertical de este punto a la superficie terrestre es el epicentro.

Lario y Bardají (2016, pág. 59), señalan que los sismos resultan de rupturas que se producen en el interior de la corteza, a las que se conoce como “fallas”, que son resultado de las enormes presiones existentes en el interior actuando sobre formaciones rocosas. Cuando se produce la ruptura o falla se forman bloques separados que se desplazan y, a mayor desplazamiento, mayor la dimensión del sismo. Señalan los casos del sismo de Japón de 2011 (M: 9.1), causado por un desplazamiento de ~ 9 m y, de España en 2011 (M: 5.1), por un desplazamiento de solo 20 cm.

Para la población común, un sismo es el movimiento del suelo que ocurre de vez en cuando como sacudidas irregulares, que duran entre unos instantes a varios minutos; pueden ser apenas perceptibles o tan fuertes que produzcan catástrofes con cuantiosas pérdidas de vidas, económicas y materiales. Por costumbre, a los sismos fuertes la población les llama “terremotos” y a los más débiles “temblores”, pero son denominaciones que no tienen límite definido, pudiendo llamarse temblor o terremoto a cualquier sismo indistintamente. Herráiz (1997, pág. 66), señala tres tipos de sismos: 1) El que ocurre luego de varios sismos menores premonitores, al que le siguen luego réplicas de reajuste. 2) Sismos potentes y aislados sin premonición que sirvan de alerta. 3) Varios sismos más o menos seguidos entre los que no hay uno principal, llamados “enjambres”.

Los sismos generan una amplia variedad de efectos sobre el terreno, a los que se denominan desplazamientos superficiales cosísmicos (Lario & Bardají, 2016, pág. 58). Los sismos generan peligros directos o indirectos. En forma directa es la causada por el movimiento mismo que sacude y destruye total o parcialmente las estructuras emplazadas en la superficie y, en forma indirecta, cuando el sismo causa otros procesos destructivos. El Instituto Tecnológico GeoMinero de España (s.f., pág. 534), señala los peligros siguientes:

- A. Movimiento vibratorio del terreno
- B. Fallamiento o rotura superficial del terreno
- C. Licuación
- D. Compactación
- E. Desprendimientos
- F. Tsunamis

Duque (2022, pág. 514), clasifica los peligros sísmicos en cuatro grupos:

1. Vibraciones y asentamientos diferenciales de estructuras edificadas, hundimientos del suelo, deslizamientos y avalanchas.
2. Desplazamiento del suelo a lo largo de una falla.
3. Tsunamis e inundaciones por daños en embalses y ruptura de diques y conducciones hidráulicas.
4. Incendios, colapso de estructuras edificadas y acabados.

Lario y Bardají (2016, pág. 70), destacan que los efectos indirectos de los sismos, muchas veces causan más daños en vidas humanas, edificaciones y actividades que las propias vibraciones del terreno. En las secciones siguientes se discuten los fenómenos sísmicos, para lo cual se presenta primero una idea del origen, constitución y dinámica evolutiva del planeta.

2.2.2.1. Los sismos y la constitución interna del planeta

El planeta tiene $\approx 6,300$ km de radio y se conforma de gruesas capas minerales, donde solo la más externa es rocosa y rígida, a la que se denomina

“corteza”, que tiene unas decenas a poco más de cien km de grosor, y “flota” sobre capas rocosas minerales más profundas y cada vez más densas, en estado relativamente fluido o “pastoso” (astenósfera), capa que llega a 600 - 700 km de profundidad (Tarbuck & Lutgens, 2010, págs. 16 - 18).

La corteza o litósfera, está formada por dos capas minerales: la más externa, llamada “sial” forma los continentes, constituida mayormente por silicatos de aluminio de densidad ≈ 2.7 . Más abajo se ubica el “sima”, que es el substrato de las cuencas oceánicas, formada de silicatos de magnesio de densidad ≈ 3.3 . Las capas internas de la astenósfera ejercen una enorme y permanente presión sobre la corteza pétrea, pudiendo fracturarla; de hecho, está fracturada en bloques de todo tamaño, y la evolución geológica de los grandes bloques a lo largo de la geohistoria ha formado las “placas” que forman la corteza (Ver Figura 3, que muestra la estructura y dinámica de las placas existentes a nivel mundial) (Keller & Blodgett, 2007, pág. 12)

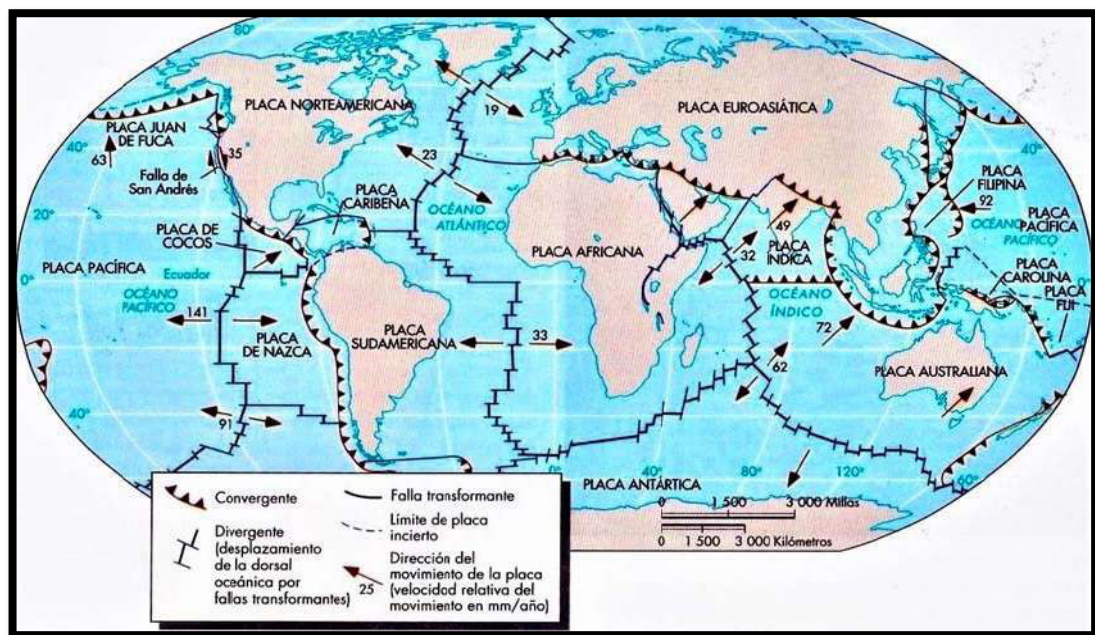


Figura 3. Placas de la corteza terrestre

Fuente. (Keller & Blodgett, 2007, pág. 12).

La Figura 3, muestra la ubicación y dinámica de las placas terrestres; algunas muy grandes como la Norteamericana, Euroasiática, Africana, y otras, más pequeñas, como la Caribeña, Cocos, Nazca. Se ve, por ejemplo, que la placa Africana está separada de la Euroasiática por un límite de rumbo E-W,

representado con “dientes” que apuntan al norte, indicando que la placa Africana se dirige al norte y colisiona con Europa y Asia menor. Esta colisión formó la Cordillera de los Alpes y va cerrando paulatinamente el mar Mediterráneo, el cual desaparecerá en unos millones de años. Las distintas placas tienen diferentes direcciones y velocidades de desplazamiento (indicadas en cm/año).

Como se ha visto en la Figura 1, los sismos ocurren en su gran mayoría en las zonas de contacto entre las placas, donde la corteza terrestre, sometida a los choques y fricciones de distinta naturaleza, sufre una serie de deformaciones y rupturas, es decir, sismos. La Figura 4, muestra en esquema lo que ocurre en el Pacífico, frente al Perú.

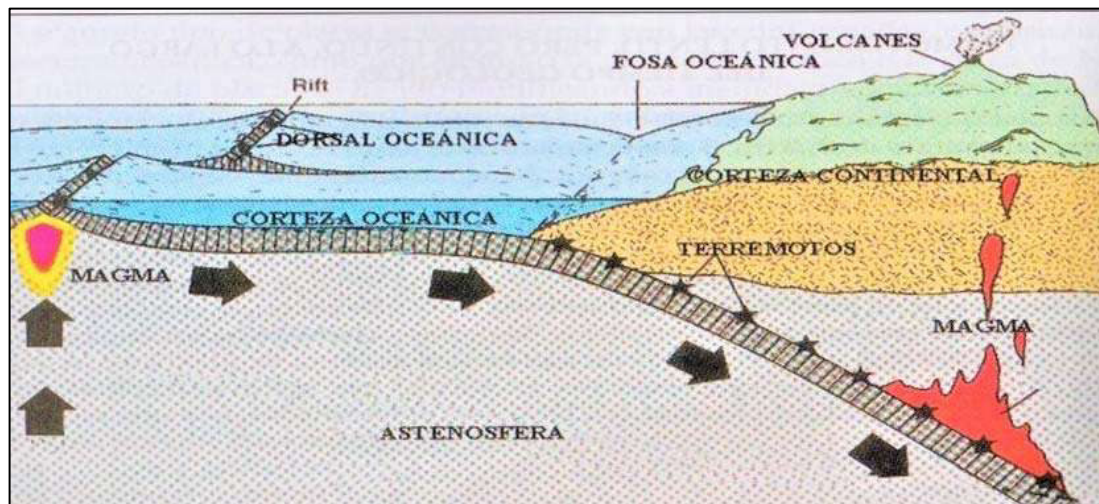


Figura 4. Esquema del movimiento de placas, sismos y subducción

La Figura ejemplifica la situación en la latitud peruana. En el centro del Pacífico se forman grandes fracturas llamadas rift, por las que salen del interior de la corteza masas rocosas magmáticas provenientes de la astenósfera, formando una dorsal oceánica (cordillera submarina). Esta nueva masa, que se renueva constantemente, empuja hacia el Este a la corteza oceánica formada, (que, en Perú es la placa Nazca), constituida de “sima”, la cual, empujada al Este, choca con la placa Sudamericana que, a su vez, está empujada hacia el Oeste desde la dorsal Atlántica. El choque de estas placas formó los Andes. *Fuente.* (Fernández et al., 2015, pág. 104).

Se observa que, la placa Nazca al encontrarse con la placa Sudamericana, se introduce bajo esta, con un ángulo de subducción que es débil o sub horizontal en la parte norte y centro del país, y de mayor ángulo (similar al que se ve en la Figura 4) en el sur, donde, por esta causa, se formó la cadena volcánica

moderna (Tavera, 2014a, pág. 6). La subducción produce fricciones (sismos) que son más superficiales mientras más cerca ocurren del frente de convergencia de placas; hacia la Selva, los sismos son más profundos.

2.2.2.2. Fallas y fallas activas

Una falla es un plano o zona de ruptura en el sustrato rocoso a lo largo de la cual se produce un desplazamiento (Lugo, 2011, pág. 163), y aunque no siempre, los sismos dejan huellas visibles en la superficie terrestre que pueden ser muy grandes y notables, como la extensa falla de San Andrés, California, USA (Figura 5), o muy pequeñas y apenas visibles.



Figura 5. Falla San Andrés (USA)

La Figura muestra la linealidad causada en el terreno por la falla San Andrés. El relieve se desplaza longitudinalmente en dos bloques que van en sentido opuesto. Cada movimiento que aumenta la separación es un sismo en la zona, y los lugares cercanos a la falla son sísmicamente más peligrosos que los alejados. *Fuente.* (Cluff, s.f.), <https://www.gettyimages.es/detail/foto/san-andreas-fault-imagen-libre-de-derechos/530722734?adppopup=true>

En Perú también hay huellas de grandes fallas visibles por decenas de kilómetros, con saltos topográficos de varios metros a decenas de metros de altura, como la activa falla regional del Callejón de Huaylas, donde depósitos sueltos de material rocoso suelto dejado por la última glaciación hace menos

de 20,000 años, están cortados por taludes de varios metros de alto, producidos por las fracturas internas en un proceso actual. Una foto que muestra una ladera cortada por una falla, muy probablemente activa, se muestra en la Figura 6.



Figura 6. Falla inversa en un acantilado rocoso cerca de Marcona (Ica)

La Figura muestra una falla inversa en la bahía de Marcona, cortando delgadas capas rocosas de lutitas y margas del Terciario superior, ligeramente plegadas. La falla, al ser inversa, hace que el bloque de la izquierda ascienda sobre el derecho a través del plano de falla. Siendo una falla en formaciones rocosas recientes, es posible que sea activa o reactivable, resultando un elemento de peligro sísmico adicional. *Fuente.* Foto: J. Osejo.

Se dice que una falla es activa, cuando esta tuvo movimientos en el Holoceno, es decir, el tiempo geológico actual, que se inició hace solo 10,000 años. Las fallas pueden haberse formado hace mucho geológicamente hablando, pero por lo general se consideran inactivas cuando no muestran evidencia de movimientos recientes. Pero no hay acuerdo pleno sobre el tiempo de antigüedad del movimiento de una falla para catalogarla como activa, ya que el Holoceno es un tiempo geológico último, muy breve. Por ello muchos geólogos amplían la denominación de activa para toda falla con evidencia de movimiento en todo el Cuaternario, lo cual ya puede resultar excesivo, porque implica un lapso de al menos los últimos 2.5 millones de años. En el Cuadro 1 se presenta una relación con las fallas activas conocidas en el Perú.

Cuadro 1. Fallas activas y sus características en el Perú

Nombre de Falla	Sentido de Movimiento	Edad de Último Movimiento	Tasa de Movimiento (mm/año)
Amotape	Reverso	<1.6 Ma	<1(?)
Shitari	Izquierda	<15 Ka	<1(?)
Chaquilbamba	Normal	Histórico (1937)	<1(?)
Límite del Este	Normal	<15 Ka (?)	1-5(?)
Quiches	Normal	Histórico (1946)	<1
Cordillera Blanca			
Sección A, B, C y D	Normal	<15 Ka	<1
Secciones B, C y D	Normales	<15 Ka	1 – 5
Cayesh	Normal	<1.6 Ma	<1
Huaytalpallana	Reverso, izquierda	Histórico (1969)	<1(?)
Cusco	Normal	Histórico (1965 y 1986)	0.2-1.0
Ocongate	Normal	<15 Ka	0.2-1.0
Vilcanota	Normal	<1.6 Ma	<0.2
Trigal	Normal	<15 Ka	0.2-1.0
Solarpampa	Normal	<15 Ka	0.2-1.0
Machado Chico	Normal	<1.6 Ma	<0.2
Pampa Huanocollo	Normal	<1.6 Ma	<0.2
Cerro Cordilleras			
Secciones Norte y Sur	Normales	<1.6 Ma	<0.2
Sección Central	Normal	<15 Ka	<0.2
Oeste de Rio Moquegua	Normal	<1.6 Ma	<0.2
Chololo	Normal	<15 Ka	<0.2
Cerro Loreto	Normal	<1.6 Ma	<0.2
Chaspaya	Normal	<15 Ka	<0.2
Cerro Chascoso	Normal	<1.6 Ma	<0.2
Altos los Chilenos	Normal	<1.6 Ma	<0.2
Cerro Morrito	Normal	<1.6 Ma	<0.2
Pampa Trapiche	Normal	<1.6 Ma	<0.2
Toquepala			
Secciones Oeste y Este	Normales	<15 Ka	0.2-1.0
Micalaco	Normal	<1.6 Ma	<0.2
Pampa del Purgatorio			
Secciones Oeste y Este	Normales	<15 Ka	0.2-1.0
Villacollo			
Secciones Norte y Sur	Normales	<1.6 Ma	<0.2
Cerro Rocosó	Normal	<1.6 Ma	<0.2
Cerro Caquilluco	Desconocido	<1.6 Ma	<0.2
San Francisco	Normal	<1.6 Ma	<0.2

Fuente. Macharé et al. 2003, citado en (Alva & Soto, s.f., pág. 10)

De otro lado, hay numerosas fallas cuya rotura no llega a la superficie (fallas cubiertas o fósiles) y por ello son poco detectables, aunque puedan ser también activas generadoras de sismos difíciles de evaluar (Keller & Blodgett, 2007, pág. 43). La Figura 7, ejemplifica la ocurrencia de un sismo y la propagación de las ondas que ocasiona la ruptura o el movimiento en la falla.

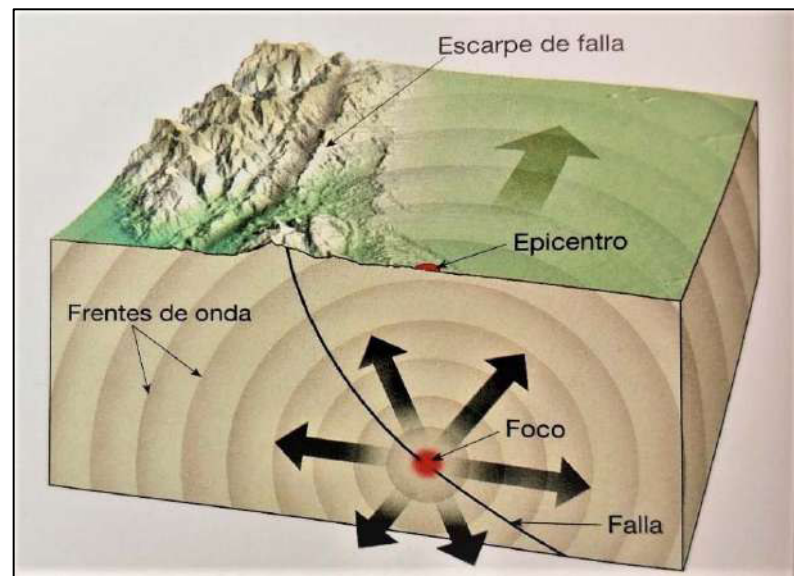


Figura 7. Ondas producidas por un sismo y su propagación

La Figura muestra la ocurrencia de una ruptura interna y subsiguiente sismo. La ruptura llegó a la superficie creando un escarpe en la montaña (lo que no ocurre siempre). El foco es el hipocentro, a partir del cual se propagan ondas sísmicas en distintas direcciones; su proyección vertical a la superficie es el epicentro. La profundidad y distancia al epicentro del sismo son parámetros importantes del peligro sísmico. *Fuente.* (Tarbuck & Lutgens, 2010, pág. 330).

2.2.2.3. Vibración del Terreno y Naturaleza de las Ondas Sísmicas

Al producirse una ruptura interna o falla se produce un desplazamiento de bloques (Figura 6), causando vibraciones que viajan en forma de ondas a través de medios rocosos (Figura 7). Las ondas generadas en un sismo son elásticas y de diversa naturaleza, y se propagan en diversas direcciones, longitudes, frecuencias y velocidades distintas. Se reconocen dos tipos de ondas; Kuroiwa (2005, pág. 100) las denomina ondas de cuerpo o de profundidad, y ondas superficiales; las primeras se producen en el hipocentro

y atraviesan la corteza; se clasifican en dos tipos: “P” (Primarias) y “S” (Secundarias). Las ondas P vibran en la dirección en que se irradian y son más rápidas que las S, llegando primero a la superficie; las ondas S vibran en sentido perpendicular al del avance. Lario y Bardají (2016, pág. 68) señalan que las ondas P “son similares a las ondas de sonido que se propagan por el aire”, y Keller y Blodgett (2007, págs. 43-45), describen las ondas P como un movimiento similar al de un gran resorte, el cual, al ser empujado desde el hipocentro el material rocoso primero sufre una compresión; luego la compresión avanza y la parte rocosa que inicialmente fue comprimida, ahora se dilata; las ondas avanzan a la superficie, y nuevos sectores rocosos se van comprimiendo y dilatando hasta llegar en este juego a la superficie. (Figura 8).

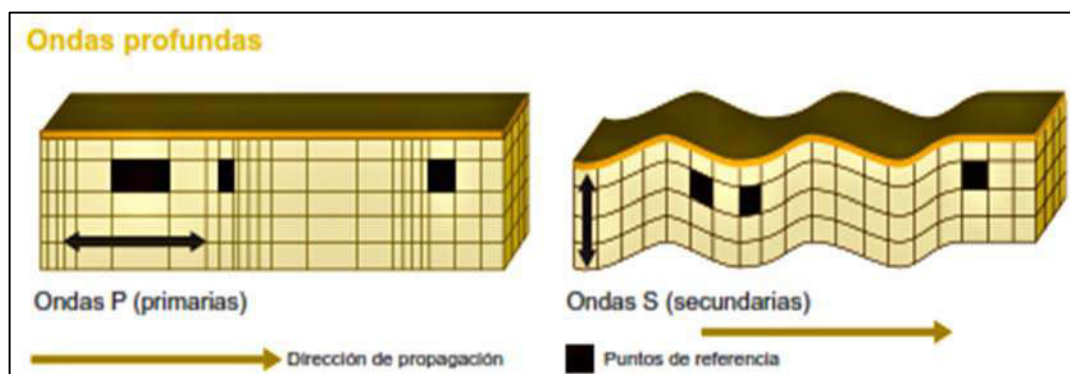


Figura 8. Ondas profundas y sentido de avance y deformación

En la Figura ha ocurrido un sismo a cierta profundidad (la superficie se halla a la derecha). Desde el hipocentro las ondas P y S avanzan hacia la superficie con sentidos de vibración distintos: las ondas P, con sentido en la misma dirección del avance, y las S, en sentido transversal. Nótese en las ondas P, las compresiones y expansiones sucesivas. *Fuente.* (Grases, 2014, pág. 25).

Tarbuck y Lutgens, (2010, pág. 338), indican que las ondas P pueden hacer que el terreno se doble y fracture provocando, por ejemplo, la rotura de líneas eléctricas. Respecto a las ondas S, estos autores señalan que hacen oscilar el material rocoso en ángulo recto a la dirección del movimiento de la onda, produciendo un temblor vertical y lateral. Cuando las ondas internas llegan a la superficie se vuelven a irradiar con otros caracteres, convertidas en ondas superficiales, que también se subdividen en dos tipos: “L” (Love) y “R” (Raleigh); avanzan por la superficie, con vibraciones muy complejas de trayectoria elíptica en los planos horizontal y vertical. La Figura 9 muestra los sentidos de avance y deformación del suelo.

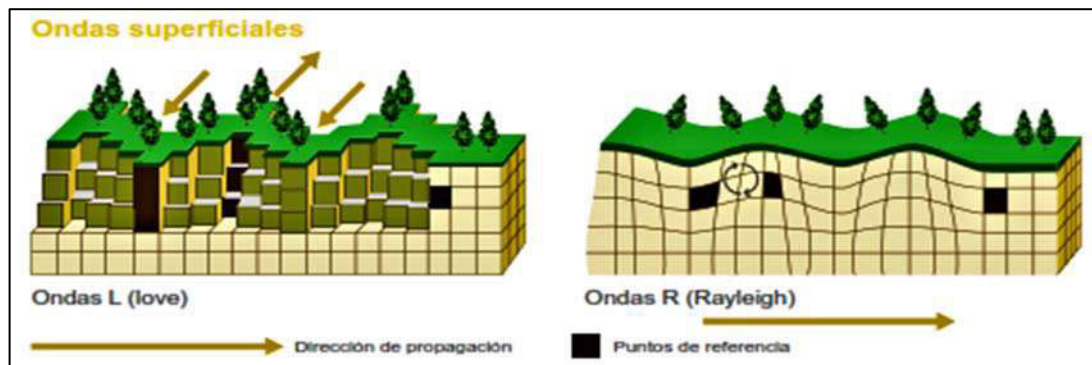


Figura 9. Ondas superficiales y sentido de avance y deformación

Una vez que las ondas de profundidad llegan a la superficie, se irradian a través de esta, continuando su propagación como ondas L y R, de sentidos vibratorios ondulantes y elípticos, que producen severas y peligrosas deformaciones en el suelo. Fuente. (Grases, 2014, pág. 25).

Lario y Bardají (2016, pág. 69) señalan que las ondas superficiales R, “son ondas elásticas de componente vertical que se propagan por la superficie del terreno de manera similar a como lo hacen las olas por la superficie del mar”, y que las ondas superficiales L y R en conjunto, generan un movimiento vibratorio complejo de la superficie tanto en su componente vertical como horizontal, lo que pone en grave riesgo a las edificaciones. El CENEPRED (2014, pág. 36) dice que las ondas R son las que más sienten las personas, notándose en la superficie de modo similar al oleaje del mar.

2.2.2.3.1. Longitud, Amplitud, Frecuencia y Velocidad de Ondas

La Figura 10 presenta los caracteres que tienen las ondas sísmicas, que refieren a su energía, longitud, amplitud, frecuencia y velocidad de propagación, propiedades que se relacionan a veces directa o inversamente, según el tipo de onda y naturaleza del material que atraviesa en su recorrido. Entre las relaciones de los diversos parámetros, se tiene que:

A mayor longitud de onda, menor energía y amplitud. Cuanto mayor es la amplitud mayor es la energía transferida (la energía transportada por una onda es proporcional al cuadrado de su amplitud). Las velocidades de propagación de las ondas sísmicas son distintas, siendo las P las más rápidas

en llegar a cualquier punto; las ondas S, van más lento y se propagan solo en medio sólido. Tarbuck y Lutgens (2010, pág. 337), indican que las ondas P van ≈ 1.7 veces más rápido que las ondas S, y que se puede generalizar que las ondas superficiales L y R avanzan $\approx$ al 90% de avance de las ondas S.

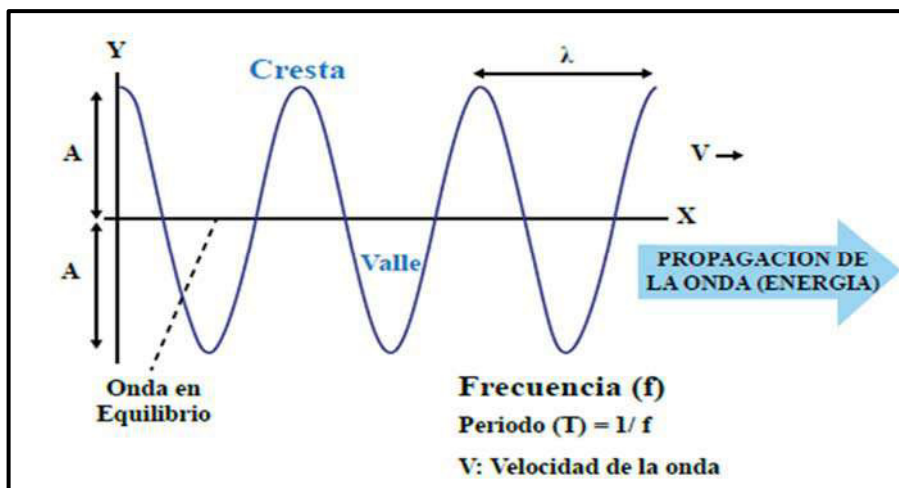


Figura 10. Parámetros Físicos de una Onda Sinusoidal

La Figura ejemplifica una onda sísmica y sus parámetros: La longitud de onda (λ) es la distancia entre dos crestas; la amplitud es la altura que alcanza la onda desde el valor medio (eje X) a la cresta. Los ciclos son la distancia entre dos crestas, dos valles o dos nodos; estos definen la frecuencia (f), cuando se miden por tiempo transcurrido (ciclos/s) o Hz. El período es el tiempo que tarda una onda en completar un ciclo. *Fuente.* (CENEPRED, 2014, pág. 41).

De otro lado en el Cuadro 2, se aprecia que las velocidades promedio observadas para las ondas P, van muy rápido en materiales consolidados, como el substrato rocoso pétreo, y muy lento en los poco o nada consolidados.

Cuadro 2. Velocidad de las ondas P en medios rocosos (m/s)

No Consolidados		Consolidados		Otros	
Capa meteorizada	300-900	Granito	5000-6000	Agua	1400-1600
Suelo Vegetal	250-600	Basalto	5400-6400	Aire	331.5
Suelo Aluvional	500-2000	Roca Metamórfica	3500-7000		
Arcilla	1100-2500	Arena y Pizarra	2000-4500		
Arena no saturada	200-1000	Piedra Caliza	2000.6000		
Arena saturada	800-2200				

La velocidad de las ondas P en las rocas muy compactas, como las graníticas y basálticas es de 5 a 6.5 km/s, y velocidades muy variables, de 2 a 7 km/s entre las sedimentarias y metamórficas (calizas, areniscas, lutitas, pizarras, esquistos). En los depósitos de cobertura del substrato, las velocidades son mucho más lentas, variando entre solo 0.2 a 2.5 km/s. *Fuente.* (Estrada, 2012, pág. 15).

Por lo tanto, las amplitudes de onda mayores que implican menor velocidad, pero mayor transmisión de energía a la superficie, se presentan en los terrenos de material menos consolidados, donde se producen los mayores daños a la población y sus instalaciones. La diferencia de amplitudes de onda frente a los materiales que cruzan se aprecia en la Figura 11.

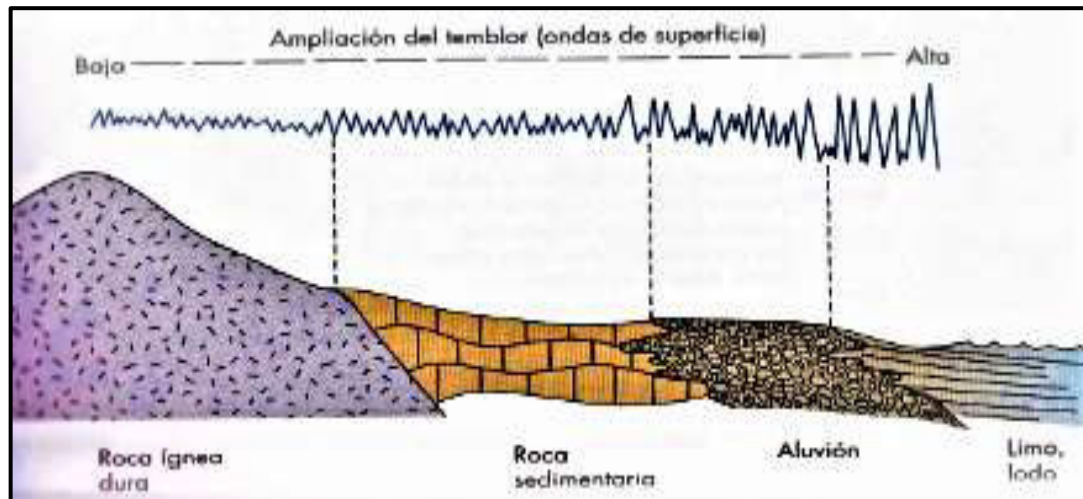


Figura 11. Variación de la amplitud de ondas según medios rocosos

En la hipotética zona ha ocurrido un sismo. La roca ígnea dura aparece sin cobertura en la superficie de las montañas, por lo que cualquier vivienda instalada en esta roca sufrirá poca deformación. Las zonas inferiores planas tienen sectores de rocas duras sin cobertura y sectores de masas de coberturas sueltas (aluviones y limos), que cubren al substrato profundo granítico. La amplitud de las ondas se amplifica a medida que pasan por rocas menos compactas, sobre todo en lodos que, resultan así, terrenos de alta a muy alta peligrosidad sísmica. Fuente. (Keller & Blodgett, 2007, pág. 49).

Sobre las velocidades indicadas en el Cuadro 2, cabe decir que el espesor de los materiales graníticos y basálticos son mucho más potentes en la corteza, que el espesor de las coberturas de material suelto. La masa granítica tiene varias decenas de km en profundidad (Carenas et al., 2014, pág. 87), mientras que las rocas sedimentarias y metamórficas pocas veces superan 10 km, y las coberturas sueltas de arena, arcilla y suelos tienen grosores de solo unos pocos metros a cientos de metros de profundidad. En amplios sectores (especialmente en montañas de fuerte pendiente), esta cobertura no existe o tiene solo cm o dm de grosor, y solo localmente, algunos metros. La Figura 12 esquematiza esta distribución de los tipos de roca y suelo.

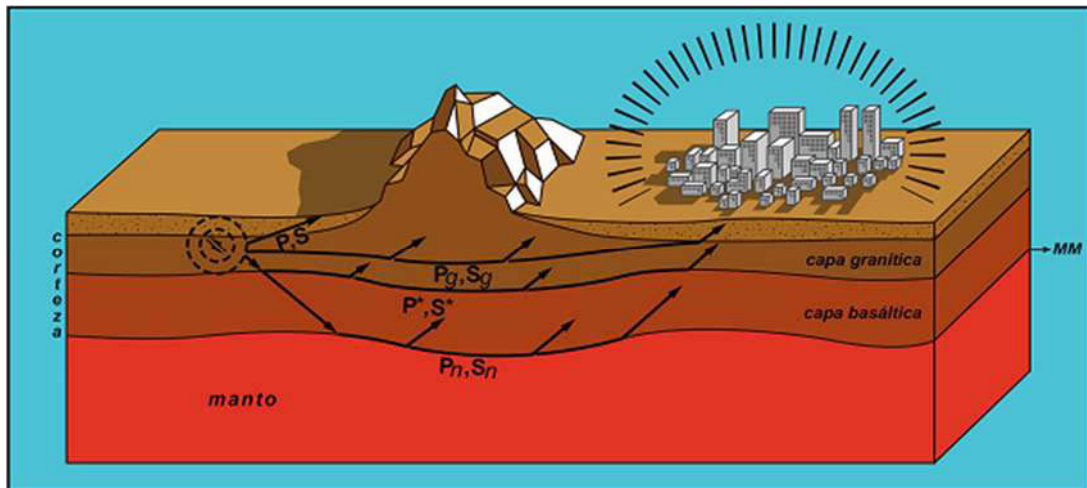


Figura 12. Constitución general de la corteza y superficie terrestre

En la figura, las rocas ígneas ocupan la totalidad de la corteza interior, y afloran directamente en superficie en las zonas montañosas (como en los Andes). Los sedimentos sueltos predominan en las llanuras, donde con frecuencia están las grandes ciudades sobre suelos, a veces, de mala calidad geotécnica. *Fuente.* (Instituto Geográfico Nacional de España, s.f.), <https://www.ign.es/web/sis-teoria-general#:~:text=Las%20de%20mayor%20v, S%2C%20que%20tienen%20car%C3%A1cter%20transv>ersal).

Según la velocidad de las ondas, si un sismo ocurre a 50 km de profundidad en la capa granítica, las primeras ondas P llegarán al epicentro en 10 s, pero, si al llegar a la superficie hubiera una cobertura suelta, las ondas se frenarán avanzando lentamente, pero amplificando la altura de onda, aumentando el movimiento del suelo y efecto sísmico en las edificaciones (ver Figura 11), hecho que sucede principalmente con las ondas superficiales L y R.

Según la Figura 11, en superficies rocosas compactas, como las que hay en las montañas del batolito andino costero, desértico y poco meteorizado de gran parte de la Costa y Sierra occidental del país, las ondas P avanzan desde el hipocentro a velocidades de 5 a 6 km/s, pero al llegar a los delgados depósitos aluviales de los valles costeros (Rímac, Chillón, Lurín, Huaura, Cañete, etc.), que pueden tener de unos metros a varias decenas y centenas de metros de espesor, y donde está la mayoría de edificaciones de las urbes costeras, las ondas se frenan y avanzan a menos de 2 km/s. En las zonas aluviales y lacustres del Altiplano puneño (que tiene varias decenas a centenas de m de grosor de suelo mayormente limo arcilloso), la velocidad de las ondas P disminuye a ~ 0.5 km/s. Carenas et al. (2014, pág. 115), destacan

que: “los materiales menos consolidados como arcillas o limos amplifican mucho la onda sísmica, aumentando el movimiento del suelo y por tanto los daños que pueden producirse como consecuencia del sismo”

Cuando las ondas pasan de un medio rocoso compacto a uno de suelo poco consolidado, Lario y Bardají (2016, pág. 82), señalan que la amplificación será mayor cuanto mayor es el espesor, indicando que: “En la mayoría de análisis de peligrosidad se consideran los primeros 30 m del subsuelo, considerando la velocidad de propagación de las ondas S, en los primeros 30 m (V_{s30}) como el parámetro definidor de la amplificación geológica de la sacudida sísmica”. En realidad, la naturaleza de las rocas y suelos que atraviesan las ondas, cuanto más heterogénea sea, va a producir una muy alta complejidad en la dirección, distribución, amplificación, frecuencia y período de las ondas en este recorrido. De modo esquemático, la Figura 13 muestra esta complejidad, expresando principalmente la reflexión y refracción de las ondas.

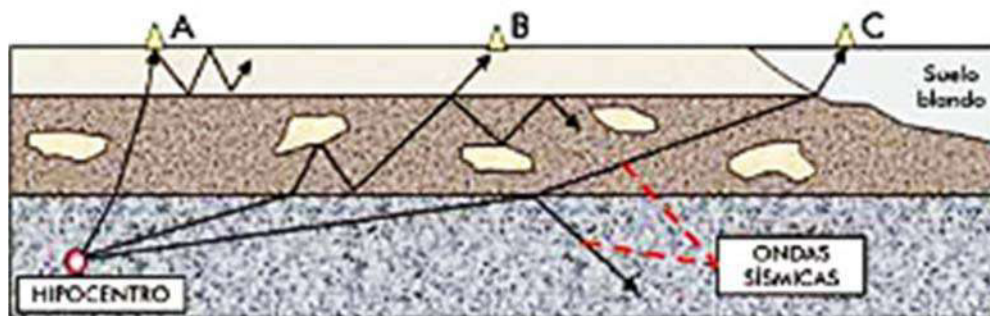


Figura 13. Reflexión y Refracción de las Ondas Sísmicas

La Figura muestra los cambios más o menos abruptos que sufren las ondas al pasar de un medio a otro; las reflexiones y refracciones se producen constantemente, y cada nueva dirección, cambia al cambiar la naturaleza del material que se atraviesa. *Fuente.* (CENEPRED, 2014, pág. 38).

Las ondas sísmicas se estudian mediante los sismogramas, pero son registros sumamente complejos. Estrada (2012, pág. 27), indica que, si bien las ondas P son las primeras en llegar a un punto de observación, seguidas de las ondas S y ondas largas, en realidad, dice que esto es teórico y que solo ocurre en algunos sismos, porque llegan varios tipos de ondas P y S que hacen compleja la lectura del sismograma. Este investigador resalta que:

“Los edificios son muy susceptibles a las frecuencias de vibración del suelo, pues ésta les puede causar el efecto de resonancia si la

frecuencia natural del edificio (por la altura y rigidez) coincide con la del suelo. En resumen, cerca del epicentro, las ondas P y S hacen vibrar más intensamente a los edificios bajos y rígidos, mientras que a distancias mayores las ondas superficiales, de largo período o baja frecuencia, hacen vibrar más a los edificios altos”.

2.2.2.4. Medición de la Actividad Sísmica: Intensidad y Magnitud

2.2.2.4.1. Intensidad

La mayor o menor severidad de un sismo se mide por dos parámetros: la intensidad (I) y la magnitud (M). Antes, y por mucho tiempo, solo se empleó la intensidad mediante la escala Mercalli, que califica el nivel de daños causados por un sismo mediante apreciaciones cualitativas, que expresan en forma descriptiva la gravedad de daños habidos en categorías signadas en números romanos. Las escalas Mercalli que se usan actualmente son las Mercalli Modificada (MM) y la MSK que son bastante similares, la primera, más utilizada en América y la segunda, en Europa. Ambas califican la intensidad en base a un rango de valores de I a XII, donde solo a partir de VIII se tienen sismos destructivos. (Herráiz, 1997, pág. 55). El valor V califica daños leves y puntuales, y VI y VII, afectaciones un tanto severas. Menos de V refiere a sismos apenas percibidos, mientras que el valor XII, en el extremo máximo, supone la destrucción total, incluso de las edificaciones mejor construidas. Sobre estas dos escalas, Kuroiwa (2005, págs. 101 - 104) señala que:

“ninguna de estas dos escalas es adecuada para la costa occidental de América del Sur, debido a que las construcciones a que se refieren corresponden a edificaciones construidas en California a fines de los años 50 y en la Europa de los 60, época en que entraron en vigencia dichas escalas... la geografía del oeste de Sudamérica, cuya característica más conspicua son los Andes, con elevadas montañas, es también diferente al entorno topográfico al que responden estas

escalas... Por estas razones, un grupo de egresados de la CISMID/FIC/UNI y el autor desarrollaron entre 1989 y 1992, una nueva escala aplicable a los países de la costa occidental de Sudamérica, la MMA-92, Escala Mercalli Modificada para los Países Andinos”⁴.

La intensidad no mide la potencia real del evento sísmico, sino del daño total producido, el cual depende tanto de la potencia del sismo en sí, pero más de la vulnerabilidad de los medios afectados. Por ello, un sismo muy potente, que ocurra sobre una amplia región desértica y deshabitada, tendrá intensidad de 0 a I. Por el contrario, un sismo no muy potente pero que cause daños o muertes en una zona densamente poblada, pobre y vulnerable, alcanzaría fácilmente valores de VIII, IX, o más.

La intensidad “I” es una percepción, que puede ser catastrófica si un sismo llega a causar cuantiosos incendios, muertes y heridos, destrucción de edificios e infraestructuras, caos, hambruna y epidemias; casi la destrucción de un país o región, sin que necesariamente haya sido bajo un terremoto de gran potencia, sino en una región de mucha población, bienes y actividades, con altas vulnerabilidades sociales, suelos de baja calidad geotécnica, pendientes excesivas, etc. Keller y Blodgett (2007, pág. 37), señalan que un mismo sismo, como el habido en “California de 1971, tuvo una sola magnitud (M:6.7) pero su intensidad Mercalli variaba de I a XI dependiendo de la proximidad al epicentro y condiciones geológicas locales”

En el caso de ciudades peruanas, un sismo mediano a severo en magnitud, producirá también intensidades muy variadas según los barrios y distritos o las particularidades de cada lugar. Aun así, se puede establecer generalizaciones, como las cartografiadas y presentadas en la Figura 14, la cual muestra un mapa de intensidades sísmicas máximas del país para el período 1960 – 2014.

⁴ Kuroiwa, y los investigadores que crearon esta escala modificada, contiene también los XII niveles, donde a partir del nivel V se indican daños o efectos ligeramente destructivos, VI (“sentido por todos”). VII (“Difícil mantenerse en pie”). VIII (“Susto y pánico aun en personas que conducen vehículos”). IX (“Pánico generalizado”). X (“Destrucción generalizada de edificios”). XI (Verdadera catástrofe). XII (“Cambios en el paisaje”). En esta clasificación Kuroiwa pone mucho énfasis en los niveles de daños en edificaciones de adobe y tapiales.

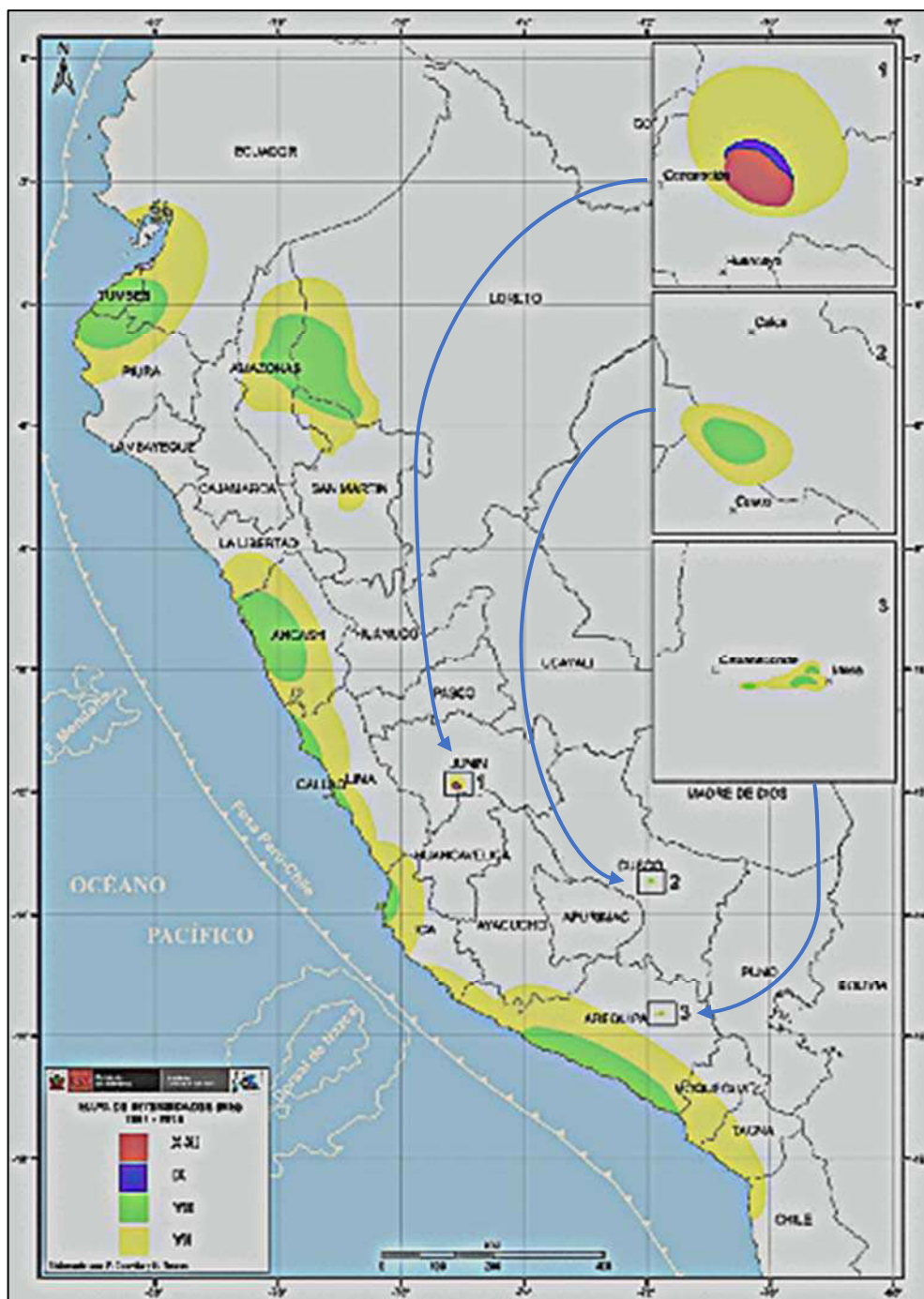


Figura 14. Mapa de intensidades sísmicas máximas.

El mapa está en escala Mercalli Modificada para sismos ocurridos entre 1960 y 2014. Los mayores valores de desastre se presentan en un sismo ocurrido en Concepción, Junín (recuadro derecho superior), con un sector en rojo (intensidades X y XI), y azul (intensidad IX) para un pequeño sector adicional. Son intensidades de desastre graves a extremas, que no fueron causadas por un sismo muy potente. En la Costa, hubo sismos de $M > 8.0$ y sin embargo, las intensidades registradas fueron de valores VIII (verde oscuro), y VII (verde claro). *Fuente.* (Tavera, 2014a, pág. 13).

Sobre estas calificaciones debe decirse que, por su extrema complejidad, los valores que se establecen como la magnitud, intensidad y otros factores y parámetros de un sismo, como epicentro, profundidad, etc. son de difícil definición, y casi siempre sujetos a controversia. Por ello, los valores que se divulgan acerca de un sismo pueden no ser los más ajustados a la realidad, más aún, en caso de sismos de siglos pasados. Esto puede llevar a caracterizaciones y conclusiones no del todo precisas, como sucede en diversas disciplinas, pero con mayor razón en lo que respecta a sismos. La data que acompaña la temática sísmica debe considerarse más como estimaciones, con la indispensable prudencia del caso.

2.2.2.4.2. *Magnitud*

La Magnitud (M) refiere la verdadera potencia de un sismo, la cual, fue definida por Charles Richter en 1935 para la zona sur de California. Al respecto, Estrada (2012, pág. 30), señala lo siguiente:

“Richter la definió como el logaritmo en base diez de la amplitud máxima de la onda sísmica (en milímetros), registrada en un sismógrafo patrón a una distancia de 100 kilómetros del epicentro. Esto implica que la magnitud aumenta en una unidad cuando la amplitud aumenta 10 veces”.

Por esta característica, un sismo de M:8.0 es 10 veces más potente que otro de M:7.0 y 100 veces más potente que otro de M:6.0. Con la aparición de instrumentos como sismógrafos y acelerógrafos, se hizo posible la medición de la energía que se libera, pero, se observó que la magnitud Richter debía reajustarse en varios aspectos para sismos habidos en otras regiones distintas de California, donde fue reconocida.

Como indican Keller & Blodgett (2007, pág. 37), la cantidad de movimiento del suelo que produce un sismo está relacionada a su magnitud, profundidad y medio geológico en el que ocurre. Al aumentar la magnitud del sismo, la

cantidad de movimiento del suelo cambia más lento que la cantidad de energía liberada. Así, aunque la cantidad de desplazamiento o movimiento del suelo en un terremoto M:7.0 es diez veces mayor que el desplazamiento que produce un sismo M: 6.0; en cambio, la cantidad de energía liberada es 32 veces mayor. Por ello, si se compara un sismo M:5.0 con uno M:7.0, la energía liberada es 32×32 ; es decir $\sim 1,000$ veces más (ver Cuadro 3).

Cuadro 3. Relación de magnitud, desplazamiento y energía en sismos

Cambio de magnitud	Cambio de desplazamiento del suelo	Cambio de energía
1	10 veces	32 veces
0.5	3.2 veces	5.5 veces
0.3	2 veces	3 veces
0.1	1.3 veces	1.4 veces

El Cuadro muestra las diferencias numéricas entre desplazamiento del suelo y liberación de energía para diversas magnitudes de sismos. Según esta relación, un sismo de M:8.0, liberará $\sim 33,000$ veces más energía que la que libera un “pequeño” sismo de M:5.0 ($32 \times 32 \times 32$ veces). *Fuente.* “Earthquakes, facts & lists” por U.S Geological Survey, 2000, citado en (Keller & Blodgett, 2007, pág. 37).

Lario y Bardají (2016, pág. 78), indican que la liberación de energía de un sismo de M:8.0 es de 10^{25} ergios o 10^{18} julios; que la energía liberada anualmente por sismos “moderados” de M:6.0 en el planeta es del orden de 10^{26} ergios, energía que estos autores indican equivalente al consumo anual de energía de USA el año 2005, y similar a la energía liberada por el mayor sismo de la historia (registrado instrumentalmente), ocurrido en Valdivia, Chile, 1960, que tuvo M:9.5

La marcada complejidad de la propagación de las ondas sísmicas y sus variaciones, hizo que se vayan estableciendo distintos modos de medición de la magnitud, cada uno corrigiendo o supliendo las inexactitudes de mediciones anteriores, habiendo sismos de ciertos rangos, o característicos de ciertas zonas, que se miden mejor con tal o cual modo recién surgido. Respecto a la magnitud de los sismos, el CENEPRED (2017, pág. 29), describe las distintas escalas empleadas a la fecha, destacando lo siguiente:

- La escala ML, propuesta por Richter en 1935 para aplicarla a los sismos del sur de California, no fue fiable en otras regiones (debido a los tipos de sismos y estructuras geológicas y suelos distintos).
- La escala mb, basada en el análisis de ondas internas, hipocentros superficiales y distancias mayores a 500 km (telesismos), no se ajusta bien a sismos con caracteres distintos.
- La escala MS, empleada para telesismos superficiales.
- La escala Md, basada en la duración del sismo, empleada para sismos cercanos a la estación de registro sísmico
- La escala Mw, se calcula a partir del momento sísmico (parámetro que relaciona las dimensiones de la fuente sísmica, rigidez del medio donde se produce, área de dislocación y el desplazamiento medio producido; en la actualidad es la escala internacionalmente más empleada.

2.2.3. Factores de la Mayor o Menor Severidad de los Sismos

Son varios los factores naturales que inciden en la severidad de un sismo. En primer lugar, está la propia magnitud (M) o potencia de la ruptura. Según Keller y Blodgett (2007, pág. 36), se consideran sismos graves cuando estos tienen entre M: 7.0 y 7.9, y muy graves si es mayor a 8.0; estos últimos ocurren a razón de 1/año en el mundo, y graves a razón de 17/año aproximadamente.

Otros factores decisivos son la profundidad o hipocentro y distancia del lugar al epicentro, también la directividad (dirección) y duración del movimiento sísmico. Otros factores muy complejos son la estructura geológica y tipos de suelos que atraviesan las ondas, y la geomorfología del terreno, que es también decisiva en los efectos directos y colaterales de un sismo. Otras condiciones, a menudo poco tomadas en cuenta, son el tiempo atmosférico del momento sísmico y las condiciones climáticas post desastre. A continuación, se tratan estos factores que explican en gran parte la mayor o menor severidad de los sismos.

2.2.3.1. Profundidad

La Figura 2 (pág. 3), muestra los sismos habidos en el Perú durante el Siglo XX; los presenta según su magnitud y profundidad en que ocurrieron. Se indican en círculos rojos, verdes y azules, según ocurrieron entre 0 a 69 km, 70 a 299 km y 300 a 700 km, llamándolos sismos superficiales, intermedios y profundos, respectivamente. Keller y Blodgett (2007, pág. 45), destacan que “en general, cuanto más profundo es el foco del terremoto, menos vibración ocurrirá en la superficie”, siendo esta la razón para clasificar los sismos por profundidad, al saberse que las ondas generadas por un sismo profundo disipan mucho de su energía en las gruesas masas rocosas que atraviesan. Pero, la correlación no es sencilla porque no son relaciones lineales; así, por ejemplo, Lario y Bardají (2016, pág. 86) destacan que, cuanto más profundo es un sismo, este tiende a sentirse a gran distancia, a diferencia de sismos muy superficiales, que se sienten intensamente muy cerca del epicentro, pero ya se sienten muy poco, a pocas decenas de km.

Tavera (2019) en una publicación en la web del IGP, a propósito de un fuerte sismo de Mw: 7.0 ocurrido en la Selva baja, señala que los sismos profundos (entre 500 a 700 km de profundidad) pueden también alcanzar grandes magnitudes, como en junio de 1994, en Madre de Dios, que tuvo Mw: 8.5, pero que, por su profundidad, la intensidad con que fue percibido en superficie fue solo IV en la escala Mercalli. También destaca, como particularidad, que los sismos profundos tienen grandes radios de percepción (no así los superficiales), y por ello pueden ser sentidos fácilmente a distancias mayores a 1,000 km o más, aunque sus efectos sísmicos son usualmente leves.

De otro lado, los límites de profundidad de un sismo para ser considerado superficial son aproximados y no hay acuerdo pleno sobre los mismos; muchos autores consideran sismos superficiales a los ocurridos a menos de 70 km (CENEPRED, 2014, pág. 42); Estrada (2012, pág. 9); Tarbuck y Lutgens (2010, pág. 340); otros como Kuroiwa (2005, pág. 100), ponen el límite en 60 km, y algunos difieren sensiblemente, como Herráiz (1997, pág.

3) que llama superficiales a sismos de profundidades menores a 30 km, y Zúñiga (2011, pág. 7), a menos de 40 km.

2.2.3.2. Distancia

La distancia al epicentro es otro factor básico, especialmente para las muy peligrosas ondas superficiales L y R, puesto que los efectos de desastre son generalmente mucho mayores cuanto más cerca se está del epicentro. Castillo y Alva (1993, pág. 7), señalan que “la intensidad generalizada (I) de un sismo en un lugar fijado puede considerarse dependiente del tamaño del sismo y de la distancia al lugar de interés”. Por simple experiencia, el efecto decreciente al aumentar la distancia al epicentro de un sismo es muy conocido por la población. Así, en los terremotos de Ica (2007) y Ancash (1970), ambos fueron fuertemente sentidos por la población limeña, pero aquí ninguno causó daños severos, como sí ocurrió en las áreas cercanas a dichos sismos. En cambio, los terremotos de Lima, de 1966 y 1970, que causaron daños notables en Lima, fueron sentidos también fuertemente en Pisco y Chimbote, pero no causaron daños significativos en esas ciudades.

La profundidad y distancia son factores prevalentes, pero hay numerosos factores que modifican sus efectos. Al respecto, Keller y Blodgett (2007, pág. 47), señalan que, en el sismo de San Francisco de 1906, el mayor movimiento ocurrió 100 km al norte del epicentro, y no sobre el mismo epicentro.

2.2.3.3. Directividad

Este factor está relacionado a la dirección de la falla que causó el sismo y el sentido de propagación de la fractura. Al respecto, Lario y Bardají (2016, pág. 85), señalan que: “Cuando la velocidad de ruptura sobre el plano de falla es del orden del de la propagación de las ondas S (80 – 90%), las ondas sísmicas sufren un proceso de amplificación a lo largo de la dirección de ruptura que

puede ser hasta 10 veces mayor, concentrando la energía sísmica en esa dirección en particular”; por ello, si la amplificación de las ondas es 10 veces mayor, la magnitud de un sismo de $M: 7.0$ puede amplificarse a 8.0 en la dirección favorecida por la directividad. Si se relacionan posibles efectos de un sismo a cierta distancia, profundidad y directividad, resultan múltiples opciones, es decir, para un mismo sismo, en algunos casos estos factores pueden agravar sus efectos, en otros aminorarlos, y todo ello en distintas proporciones. Más adelante, en el Capítulo IV, Resultados, se verá que algunos sismos, como los de Arequipa (2001) e Ica (2007), propendieron a dirigir su mayor potencia hacia el sur, mientras que los sismos de Lima de 1940 y 1966, la dirigieron hacia el norte.

2.2.3.4. Duración

Kramer (1996, pág. 81), dice que muchas estructuras construidas son sensibles al número de aumentos de carga o tensión que ocurren durante un sismo; por ello, un movimiento de corta duración puede no generar suficientes aumentos de carga como para causar daños en las edificaciones, incluso si la amplitud de onda fuese alta. Por el contrario, un movimiento de moderada amplitud, pero de larga duración, puede causar aumentos de carga suficientes como para generar daños sustanciales en las estructuras.

La duración del movimiento del suelo está relacionada con el tiempo requerido para la liberación de la energía acumulada a lo largo de la falla; si esta es muy grande, aumenta también el tiempo necesario para la ruptura y liberación, aunque en realidad, la duración depende no solo del tamaño y potencia de la ruptura, sino en gran parte por la naturaleza de los materiales por las que van las ondas. Chang y Krinitszky (1977), citados en Kramer (1996, pág. 80), estimaron las duraciones respectivas para sitios de suelo y roca a cortas distancias epicentrales (menos de 10 km), encontrando en general, que las duraciones típicas de terremotos en estas distancias, eran del doble para los suelos de material suelto respecto a su duración en superficies rocosas

compactas. Esta situación se corresponde con los efectos de un sismo indicados en la Figura 11 (pág. 31).

2.2.3.5. El Substrato Geológico

Las estructuras geológicas generales de los continentes, que explican en gran parte como se distribuyen los tipos de substratos geológicos en los países y regiones son básicamente cuatro: escudos, cuencas sedimentarias, mesetas de lava y cordilleras recientes. La Figura 15 muestra la distribución de dichas estructuras, que abarcan, cualquiera de ellas, millones de km², de países enteros que quedan en su ámbito rocoso y dinámico respectivo.

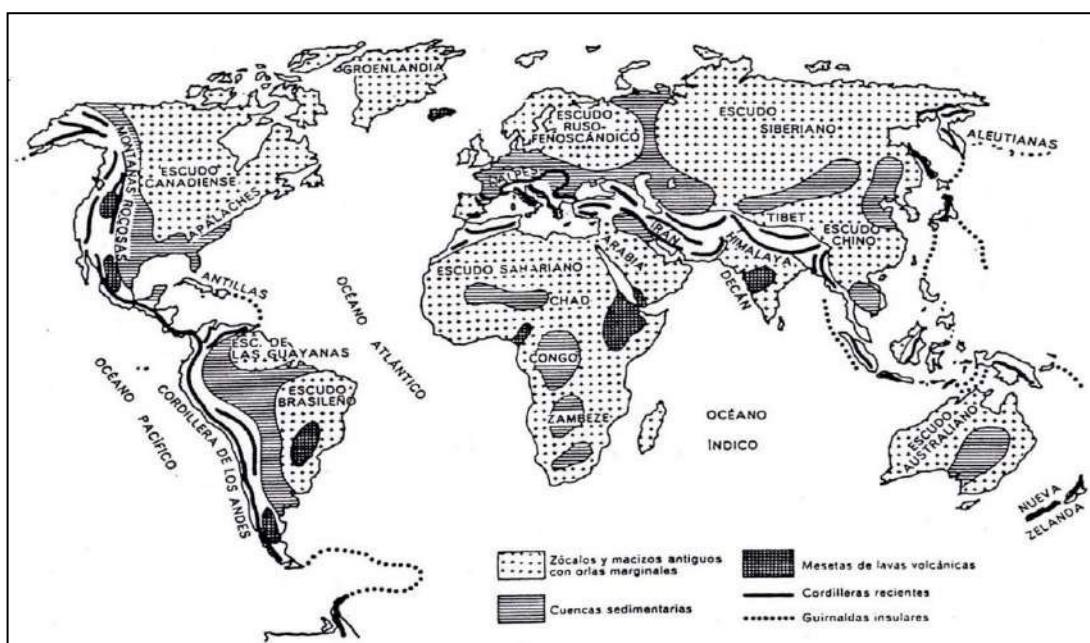


Figura 15. Estructuras de los continentes

Se aprecian los tipos estructurales de los continentes. En Sudamérica, los países orientales están formados por zócalos o escudos, y los países del oeste, por cordilleras recientes. Los escudos son grandes plataformas de roca intrusiva antigua, formando planicies y colinas. Las cordilleras son grandes relieves plegados formados por los choques de placas. Entre ambas macro unidades, se tienen las cuencas sedimentarias, que son depresiones de la corteza terrestre rellenas por miles de metros de grosor de sedimentos arrancados a los escudos y cordilleras. *Fuente.* (Viers, 1974, pág. 49)

A la escala global del mapa de la Figura 15, se aprecia que el territorio peruano queda en el ámbito de las cuencas sedimentarias y de las cordilleras recientes, quedando alejado de los escudos. A diferencia de las cordilleras recientes, sísmicamente muy activas, los escudos son regiones prácticamente asísmicas (Duque, 2022, pág. 514).

Lugo (2011), define a los escudos como grandes extensiones rocosas muy antiguas (precámbricas), donde afloran principalmente masas intrusivas en superficies tectónicamente estables. A las cuencas sedimentarias, las define como grandes depresiones del relieve que se han rellenado por cientos a miles de metros de espesor de sedimentos, que se acompañan de tectónica de hundimiento. A las mesetas de lava las define como grandes llanuras originadas por derrames de lava basáltica fluida, generada por intensas y prolongadas erupciones volcánicas fisurales. A las cordilleras las define como cadenas montañosas extensas que asocian numerosas formas de relieve como valles, cuencas, planicies, mesetas, etc. (Definiciones de (Lugo, 2011, págs. 103, 111, 87), respectivamente. Generalmente se asume que el substrato geológico se compone básicamente de rocas “compactas” o “coherentes”. Joly (1997, pág. 57), define a estas rocas como formadas por cristalización, diagénesis (asentamientos y deshidratación) o por cementación. En su mayoría son bastante resistentes y difícilmente deformables.

2.2.3.5.1. Las rocas, sus clases y estructuras

Rivera, (2011, pág. 114) señala que, para su mejor entendimiento, las rocas “se agrupan en unos pocos grupos o clases y se diferencian por su origen o por los minerales que los componen y las transformaciones que sufrieron a través del tiempo geológico”. Estos grupos principales son rocas ígneas o magmáticas, rocas sedimentarias y rocas metamórficas. El Cuadro 4 de Resistencia a la Compresión Simple (RCS), presenta las calificaciones usuales de dureza de las rocas.

Cuadro 4. Calificaciones para las distintas RCS de las rocas

Descripción	Resistencia a la Compresión (MPa)
Extremadamente blanda	< 1
Muy blanda	1-5
Blanda	5-25
Moderadamente blanda	25-50
Dura	50-100
Muy dura	100-250
Extremadamente dura	250

El Cuadro muestra que hay algunas rocas muy blandas poco comunes en la superficie (como la sal), de RCS < 1 MPa, valor característico más bien de los suelos. Por encima de este valor se tiene a la mayoría de rocas del relieve, donde las más comunes son duras a extremadamente duras; algunas, como la cuarcita, Tienen RCS > 250 MPa. *Fuente.* (Feijoo & Padrón, 2020, pág. 63).

A. Rocas ígneas

Se forman cuando salen los magmas (rocas del interior de la corteza, que están en estado de fusión por las altas temperaturas cercanas o mayores a 1,000°C que hay en profundidad). Al salir, los magmas solidifican cristalizando sus minerales componentes del sial. Hay dos grandes clases de rocas ígneas: las rocas intrusivas o plutónicas, y las extrusivas o efusivas (llamadas también volcánicas, porque salen por los volcanes); ambos grupos comprenden una amplia variedad de rocas. Rivera (2011, pág. 131) cita como principales rocas intrusivas a los granitos, granodioritas, dioritas, gabros y sienitas; y entre las volcánicas menciona a las riolitas, dacitas, andesitas traquitas y basaltos.

La gran mayoría de rocas intrusivas y volcánicas tienen altos RCS; pero las volcánicas incluyen algunas rocas blandas a muy blandas (cenizas o tobas y otros piroclastos, productos de erupciones violentas). González de Vallejo (2010, pág. 133), cita como única roca ígnea blanda a las tobas, señalando que las demás intrusivas y volcánicas son duras a extremadamente duras. En el Perú, las rocas intrusivas son abundantes en la Costa y Sierra; menos frecuentes en la Selva Alta y casi inexistentes en la Selva Baja. Las rocas volcánicas son muy abundantes, y casi exclusivas en los relieves de la extensa meseta del sur o Altiplano (desde Ayacucho a la frontera con Chile y Bolivia); son frecuentes y dispersas en toda la Costa y el resto de la Sierra, y poco frecuentes en la Selva Alta; casi inexistentes en la Selva Baja.

B. Rocas sedimentarias

Se forman a partir de otras rocas, partículas y/o sustancias inorgánicas y orgánicas. Son de tres tipos, a los cuales, Rivera (2011, pág. 171) denomina detríticas, químico inorgánicas y bioquímicas.

• **Detríticas**

Se forman a causa de la erosión externa que erosiona los relieves; los disgrega en partículas o detritos sueltos que se transportan y sedimentan en las áreas depresionadas. Internacionalmente se conocen como grupos granulométricos detríticos a las gravas, arenas, limos y arcillas (Normas DIN, ASTM, AENOR y otras). González de Vallejo (2010, págs. 20-22), indica para estas clases granulométricas los siguientes caracteres⁵:

- a) **Gravas**, tamaño de grano de 8 a 10 cm. Por sus grandes espacios entre las gravas y la inactividad de su superficie rocosa, estas no retienen el macharéagua.
- b) **Arenas**, partículas comprendidas entre 2 a 0.060 mm. Al mezclarse con el agua no se generan agregados continuos, sino que dejan fluir el agua entre las arenas con facilidad.
- c) **Limos**, partículas entre 0.060 y 0.002 mm. Estas retienen el agua porque los espacios entre partículas son muy pequeños. Se forma una pasta agua – limo, la cual sometida a golpes exuda el agua con facilidad.
- d) **Arcillas**, partículas de tamaño inferior a 0.002 mm (2µm), que son de tamaño gel, lo cual requiere que hayan ocurrido reacciones químicas para su formación. Su capacidad para retener el agua es muy grande, razón por la cual son generalmente los materiales más problemáticos.

La granulometría es un parámetro geotécnico decisivo, pero, no hay acuerdo pleno sobre las dimensiones y naturaleza de las partículas. Por ejemplo, Borselli (2025, pág. 6), califica como limos a partículas > a 0.002 mm, pero las dimensiona hasta 0.075 mm; la fracción arena la considera entre 0.075 hasta

⁵ Los caracteres granulométricos indicados en este acápite, son los mismos que se utilizan para diferenciar la granulometría de los suelos sueltos, los cuales se describen más adelante en la sección 2.2.3.6. Los suelos, sus clases e influencias en el riesgo sísmico pág. 56.

4.75 mm, siendo esta una diferencia muy grande con la mayoría de autores. Las gravas son calificadas por Borselli entre 4.75 a 75 mm y llama bloques a fragmentos mayores a 75 mm. Otros autores, como Porta, et al. (2014, pág. 147) remarcan diferencias significativas para los limos, los que, según el Departamento de Agricultura de Estados Unidos, se conforman de partículas comprendidas entre 2 a 50 μm . Si hay acuerdo general sobre la dimensión de las arcillas, como partículas de tamaño menor a 2 μm .

De otro lado, la amplitud de tamaño considerada para las gravas y arenas, hace que en muchos casos sea necesario separar estos grupos en fracciones menores. Así, el Departamento de Agricultura de USA, citado en (Strahler, 1974, pág. 321), reconoce la categoría de arenas en cuatro niveles según el tamaño de su diámetro: arena gruesa ($> 0.5 \text{ mm}$), arena media (0.25 – 0.5 mm), arena fina (0.1-0.25 mm) y arena muy fina (0.05 – 0.1 mm). Para fines geotécnicos, esta diferenciación también es importante, puesto que el comportamiento sísmico de las arenas gruesas y finas o muy finas suele ser distinto. Por ello, es conveniente siempre considerar estos niveles.

Los detritos que son arrancados por la erosión a los relieves, al cabo de millones de años se acumulan en las grandes cuencas sedimentarias y depresiones; luego, las capas inferiores se van compactando bajo el peso de las nuevas capas, y así se forman las rocas sedimentarias detríticas de diversa dureza según su tipo de partículas, condiciones y tiempo de compactación (Carenas et al., 2014, págs. 253-263); (Tarbuck & Lutgens, 2010, págs. 162-167). Las rocas detríticas que menciona Rivera (2011, págs. 173-174), son los conglomerados, areniscas, limolitas y lutitas. Las gravas sueltas llegan a formar conglomerados (compactos y endurecidos a modo de “hormigón”). González de Vallejo (2010, pág. 133) señala que las arenas al compactarse dan paso a las areniscas, los limos a las limolitas y la arcilla a las lutitas. Menciona a las lutitas y limolitas como rocas blandas, y a las areniscas, como duras a muy duras; no califica la dureza de los conglomerados, que suelen ser duras.

- **Químico inorgánicas**

Se forman a partir de sustancias disueltas en el agua, que van precipitando y consolidándose formando capas pétreas de las sustancias precipitadas. Rivera (2011, pág. 171), señala que las rocas más comunes de este tipo sedimentario son las calizas, dolomitas, sal y yeso. En cuanto a su RCS, González de Vallejo (2010, pág. 133), califica a la sal como una roca muy blanda, y a las calizas y dolomitas, entre duras a muy duras; no califica al yeso, que es casi siempre una roca blanda a muy blanda.

- **Bioquímicas**

Son restos orgánicos que se van acumulando y transformando, tanto en los fondos marinos como en los continentes; hay diversas como el carbón, diatomitas, restos de conchuelas (a las que se denomina lumaquelas), entre otras. Rivera (2011, pág. 171), indica solo dos: caliza y carbón, haciendo notar que la caliza puede ser, tanto un sedimento químico inorgánico como bioquímico. González de Vallejo (2010, pág. 133), señala al carbón como roca blanda o muy blanda; no califica otras rocas como las diatomitas y lumaquelas, que son casi siempre muy blandas.

En Perú, las rocas sedimentarias, casi todas detríticas, cubren prácticamente toda la Selva Baja (areniscas, lutitas y limolitas). Las rocas sedimentarias detríticas y químico inorgánicas y, localmente, bioquímicas forman gran parte de la Costa, Sierra norte y centro (la Sierra sur está casi cubierta por rocas volcánicas modernas). También se hallan en gran parte de la Selva Alta. La naturaleza de las rocas sedimentarias es muy compleja y variada, por lo que estimar su respuesta sísmica requiere de conocimientos especializados.

C. Rocas metamórficas

Se forman a partir de transformaciones físicas y químicas que afectan a rocas anteriores, sean ígneas, sedimentarias u otras metamórficas. Los cambios ocurren bajo condiciones extremas de temperatura y/o presión, muy altas, que producen nuevos tipos de rocas (Dercourt & Paquet, 2014, págs. 98-99). El metamorfismo no es homogéneo, pero es máximo cerca a la fuente de calor y menor hacia las partes alejadas.

El metamorfismo ocurre también por los esfuerzos tectónicos y presiones en el interior de la corteza. Así, los sedimentos que se van formando por el peso de las acumulaciones pueden (los más profundos), metamorfizarse si el peso de las masas suprayacentes es enorme. Por ello, en una cuenca sedimentaria se pueden tener masas arcillosas convertidas en lutitas en la parte superior, y más abajo, convertidas en pizarras y, más abajo aún, en metamórficas de mayor grado llamadas esquistos (Carenas et al., 2014, págs. 203-210). La presión también es producida por los plegamientos y torsiones que generan los esfuerzos tectónicos, que hacen que los minerales de las rocas se reordenen y formen nuevos tipos de rocas (Rivera, 2011, págs. 189-193). Estas rocas que se forman a veces a gran profundidad, aparecen en la superficie directamente debido a procesos tectónicos o a largos procesos de erosión que arrancan las capas superiores.

Rivera (2011, págs. 195-196), cita como principales rocas metamórficas a las pizarras, que derivan de las lutitas y de cenizas volcánicas; las filitas, que derivan de un mayor grado de metamorfismo de las pizarras; los esquistos que derivan de las pizarras, los gneis, que se forman a partir de rocas ígneas; el mármol que deriva de las calizas y dolomitas; y cuarcitas que derivan del metamorfismo de las areniscas. La RCS es variada; González de Vallejo (2010, pág. 133), cita como rocas moderadamente duras a los esquistos y pizarras; duras, el mármol y gneis; la cuarcita es extremadamente dura.

En Perú, las rocas metamórficas son abundantes en la Selva Alta, alternando con rocas sedimentarias y, localmente, magmáticas. Son menos frecuentes en la Sierra, y ocasionales en la Costa norte y central, a diferencia de la Costa sur, donde si son frecuentes. Son casi inexistentes en la Selva Baja.

D. La complejidad del substrato geológico y sus estructuras

La complejidad del universo rocoso nacional es muy grande, y además, la mayoría de rocas mencionadas se hallan muchas veces como mezclas o como rocas de composición intermedia; por ejemplo, la granodiorita (intermedia entre el granito y diorita), la gabrodiorita (intermedia entre gabro y diorita); lo mismo se puede decir de las volcánicas, entre las que hay basaltos andesíticos (intermedias entre basaltos y andesitas con cierta dominancia del

basalto), o andesitas basálticas (de mayor contenido andesítico). En las sedimentarias hay mezclas como, lutitas arenosas, areniscas lutáceas, calizas arcillosas, calizas arenosas, o mezcladas con productos orgánicos, como areniscas, calizas y lutitas bituminosas. En las rocas metamórficas también hay variedades. Es decir, las rocas relativamente “puras” son solo una parte del universo rocoso; por ello, calificar su dureza es bastante relativo. Otro aspecto que hace complejo calificar la resistencia del substrato, es la estructura en que se presentan las masas rocosas, especialmente en las rocas sedimentarias, cuya estructura puede ser, en algunas regiones, muy simple, y en otras, ser muy compleja, como se ve en la Figura 16.

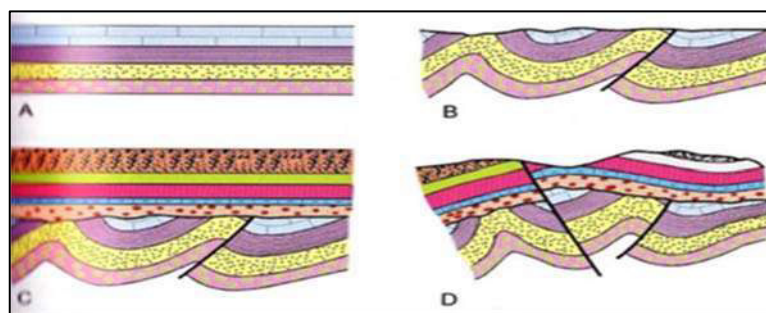


Figura 16. Ejemplos de estructuras geológicas diversas.

La Figura muestra rocas sedimentarias de distinta naturaleza y resistencia. En A, se tiene una zona de capas horizontales, donde la superficie está formada solo por calizas duras dispuestas sobre otras capas distintas (lutitas, en líneas, y areniscas, en puntos). En B, la zona anterior se ha plegado y fallado; la parte baja de los pliegues son los sinclinales y las partes altas son los anticlinales. En C, la región se ha hundido bajo el mar y nuevas capas de sedimentos horizontales se forman cubriendo las rocas anteriores. En D, la región ha vuelto a elevarse, erosionarse, plegarse y fallarse, formando estructuras mucho más complejas. *Fuente.* (Bastida, 2005, pág. 319).

Sobre la influencia de la estructura en la acción sísmica, Keller y Blodgett (2007, pág. 47), destacan por ejemplo que, “las estructuras en forma de depresión, como sinclinales y cuencas sedimentarias unidas a fallas, pueden concentrar las ondas sísmicas como una lupa la luz del sol”. Hay extensas regiones que muestran patrones estructurales de direcciones bien definidas, como la que se ven en la Figura 17, que presenta un sector de la Sierra de Cajamarca, donde, como es frecuente en los Andes, la mayoría de estructuras rocosas se alinean en rumbo mayoritario SE-NW. En este sector se aprecian varios ejes de sinclinales alternados de anticlinales y fallas inversas.

La Figura muestra formaciones rocosas alineadas SE – NW. En el extremo superior derecho está el Complejo Marañón, (símbolo PE), de rocas metamórficas precámbricas y estructuras muy complejas. Todas las demás formaciones son sedimentos cretácicos (símbolo K) de calizas, areniscas y lutitas. Las líneas negras gruesas con “dientes” son fallas inversas, y la línea negra gruesa, “sin dientes”, al suroeste, es una falla normal. Las líneas delgadas de rumbo SE-NW, son los ejes de los pliegues sedimentarios del área, que forman un relieve donde alternan anticlinales y sinclinales. Un valle cubierto de depósitos sueltos cuaternarios, se aprecia en color blanco con puntos, en el extremo suroeste del área. *Fuente.* (Wilson, 1984).

Muchas rocas metamórficas presentan estructuras más complejas que las mostradas para sectores de rocas sedimentarias en la Sierra. Las rocas intrusivas son de estructura más simple porque no se disponen en estratos, sino como volúmenes magmáticos masivos. Hay substratos rocosos en los que alternan rocas duras, blandas e intermedias, que a su vez pueden estar cortados en fallas o agrietados por sistemas de diaclasas más o menos densos, planos todos de debilidad que reducen sus resistencias reales. Hay que considerar también si los estratos se disponen en bancos gruesos, medianos o delgados, lo que varía sus resistencias.

Dollfus (1965, págs. 234-235) destaca que la alternancia de calizas y margas, o de cenizas y lavas, favorece los deslizamientos en paquetes, sobre todo cuando la inclinación de las capas coincide con la topografía. Señala numerosos ejemplos en el valle de Raura (entre Churín y Oyón); en Huaytará (margen izquierda del río Pisco), y en los valles del río Apurímac y río Pampas. Naturalmente, cualquier actividad sísmica debe agravar estos movimientos.

También Rivera (2011, pág. 367) y Duque (2022, pág. 304) resaltan las condiciones de inestabilidad de las laderas, cuando el buzamiento de la estratigrafía sedimentaria coincide con el sentido de las pendientes topográficas y, al contrario, restringir su ocurrencia en los sectores donde más bien son opuestos. La inestabilidad debida a la orientación estratigráfica puede agravarse en condiciones diversas como, por ejemplo, en presencia de fallas, y más aún si estas son activas; en pendientes muy pronunciadas, en climas muy lluviosos, o zonas de cultivos mal irrigados, etc. Debe decirse que, aparte de las fallas (especialmente críticas si son activas), en el Perú, el papel de las demás estructuras, como los pliegues, por lo general no es considerado en la evaluación sísmica, lo que se comprueba en las diversas publicaciones que hay en el país.

Por otro lado, el clima modifica las condiciones iniciales de las rocas, pudiendo hacer, como dice Derruau (1970, pág. 251), que una misma roca sea dura o muy dura en un clima muy frío y seco, y poco resistente en un clima cálido y húmedo. A este respecto, Derbyshire (1976), tiene en su texto, capítulos enteros dedicados a mostrar las diferencias que tienen las rocas más

comunes en sus resistencias a la meteorización externa, que influyen decisivamente en su RCS según el clima en que se encuentran (capítulos 3, 12, 13 y 14). Por todo ello, aun siendo una tarea indispensable para estimar el riesgo sísmico de un área, calificar adecuadamente las resistencias del substrato geológico es una tarea sumamente compleja, que requiere mucho conocimiento y experiencia de parte de los evaluadores.

Las Figura 18 y Figura 19 muestran las complejidades geológico estructurales de las cordilleras, mientras que la Figura 20, muestra la relativa simplicidad estructural de las cuencas sedimentarias, como en la Selva baja de Cusco.



Figura 18. Estructuras plegadas de calizas (Cuenca del río Cañete)

Se muestra un tramo en la carretera Cañete – Huancayo. Se aprecian calizas muy duras ligera a medianamente plegadas. La superficie del terreno es prácticamente rocosa, y en caso de servir de cimentación de viviendas sería un suelo sísmicamente muy poco peligroso, salvo el efecto de la pendiente, los pliegues y posibles fallas activas. Muchas viviendas de algunas ciudades, como Cerro de Pasco, tienen un substrato similar *Fuente*. Foto: J. Osejo.

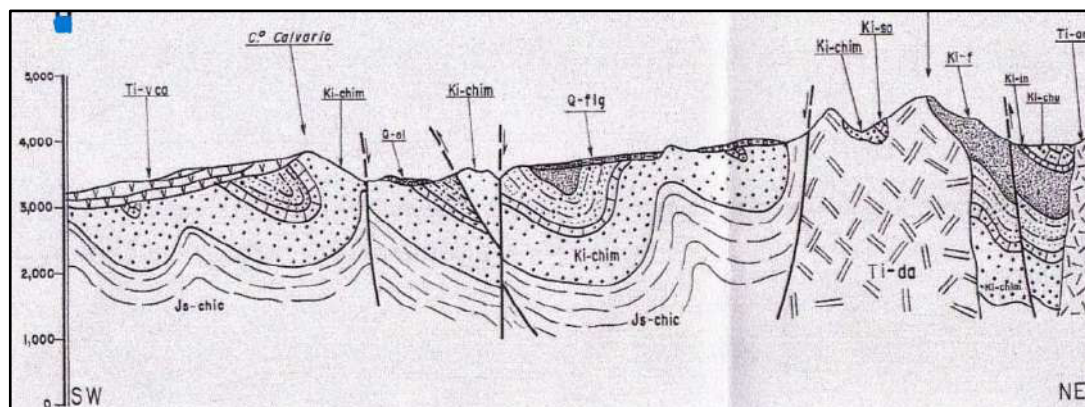


Figura 19. Estructura geológica de un sector de Cajamarca

Véase a la izquierda, entre 3,000 y 4,000 m de altitud, rocas volcánicas del Terciario (Ti-v ca) cubriendo rocas sedimentarias cretácicas plegadas (Ki-chim); nótese el apretado sinclinal cubierto por el volcanismo. Complejos pliegues en la parte central, con una sucesión de anticlinales y sinclinales fallados. Un cuerpo intrusivo del terciario (Ti-da) cortó los antiguos volúmenes sedimentarios mesozoicos. A la derecha aparece otro cuerpo intrusivo de granodioritas. La mayoría son rocas duras a muy duras, excepto las lutitas de la Formación jurásica Chicama (Js-chic). *Fuente.* (Reyes, 1980).

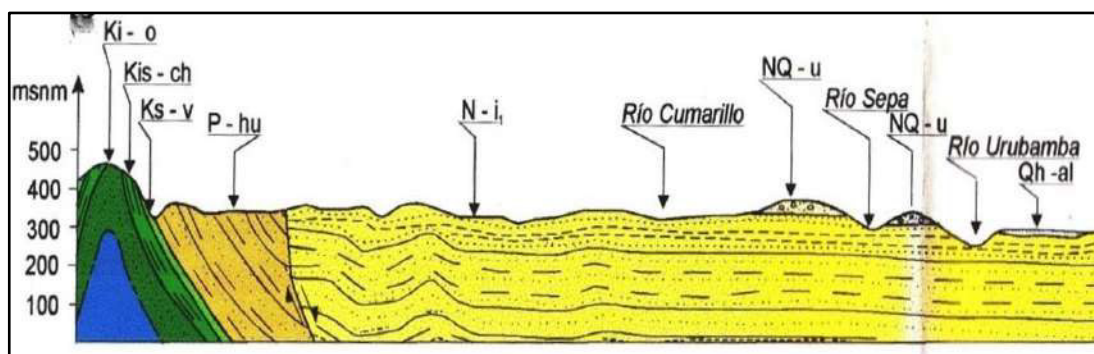


Figura 20. Estructura geológica de un sector de la Selva en Cusco

La Selva baja muestra una marcada simplicidad estructural; con areniscas, limolitas, lutitas y arcillitas casi horizontales, donde cada estrato arriba es siempre más antiguo que el que está más abajo. Todas son rocas terciarias neógenas (N), de RCS media a baja y muy baja; rocas cubiertas localmente por depósitos cuaternarios sueltos (Q). A la izquierda están las masas rocosas sedimentarias andinas terciarias paleógenas (P) y cretácicas (K) plegadas en un apretado anticlinal. El bloque terciario P de los Andes está en contacto mediante falla normal, con el bloque neógeno de la llanura amazónica de la Selva baja. *Fuente.* (Chira et al., 1998).

2.2.3.6. Los suelos, sus clases e influencias en el riesgo sísmico

A diferencia del substrato rocoso, el suelo está formado por partículas sueltas; pero, su definición depende mucho de la disciplina que se considere. Así, Bastida (2005, pág. 656) dice: “En ingeniería, el término suelo refiere a todo material no consolidado existente sobre el substrato rocoso, independiente de su naturaleza y de si el material sufrió o no un transporte más o menos largo”. González de Vallejo (2010, pág. 20), lo define como: “Agregado de minerales unidos por fuerzas débiles de contacto, separables por medios mecánicos de poca energía o agitación de agua”.

El material suelto o suelo proviene de dos orígenes: 1) por la meteorización de masas rocosas compactas en contacto con los agentes externos meteóricos (climas activos), en cuyo caso se trata de partículas y suelos formados en el lugar (*“in situ”*) y, 2) como producto de acumulaciones de partículas dejadas por los agentes erosivos (agua, hielo, viento y gravedad). Las incidencias externas, como cambios de temperatura y humedad, expansión de cristales de sal, penetración de raíces, congelamientos y otros, producen una serie de cambios en las rocas favoreciendo su partición; las partículas gruesas y finas resultantes pueden acumularse *in situ* en la superficie del mismo lugar, en cuyo caso se denominan mantos de intemperismo, depósitos eluviales, suelos y depósitos de meteorización.

Los depósitos *in situ* y partículas arrancadas al relieve pueden transportarse a otros lugares por los agentes erosivos, y acumulados como material fluvial, aluvial, coluvial, glacial, eólico⁶ (Lugo, 2011, págs. 119-123), (Rivera, 2011, pág. 521), Estos depósitos constan de partículas cuyo tamaño varía según el agente de transporte; así, el hielo puede transportar lentamente bloques de varias toneladas, entremezclados en masas heterométricas de arena, grava y elementos finos (González de Vallejo, 2010, pág. 102). Los ríos y torrentes

⁶ Depósitos fluviales y aluviales cualifican suelos dejados por ríos y corrientes de agua; depósitos glaciales, eólicos y coluviales, califican a suelos depositados por hielos, vientos y la gravedad, respectivamente. Sin embargo, con frecuencia los depósitos sueltos son de origen mixto (fluvioglacial, coluvioaluvial, fluvioacustre, etc.).

también acarrean bloques de varias toneladas, pero durante los períodos de menor caudal transportan y sedimentan partículas cada vez más finas, disponiéndolos en estratos más o menos homogéneos. Los vientos, incluso los más fuertes, solo arrastran como máximo arenas gruesas con partículas más finas. En el litoral, las olas y corrientes marinas depositan en las playas elementos gruesos (desde bolones y gravas hasta muy finos, dependiendo de la fuerza temporal del oleaje. Los caracteres de los grupos granulométricos más importantes (grava, arena, limo y arcillas) se han descrito en el acápite de “Rocas sedimentarias detríticas”, pág. 46.

Los detritos arrancados a las formaciones rocosas compactas por la erosión y meteorización externa, forman gran parte de los suelos (aunque minoritariamente en las cordilleras de fuerte pendiente, donde son bastante superficiales). Es en los suelos de origen detrítico, donde se hallan la mayor parte de edificaciones de las grandes y medianas ciudades del país y del mundo. Es decir, en su mayoría, las ciudades se hallan sobre depósitos poco o nada consolidados de distinta granulometría de origen aluvial y fluvial en las llanuras y valles, sobre depósitos marinos de playas y terrazas recientemente ascendidas, sobre acumulaciones eólicas, glaciales, lacustres y coluvio aluviales, y a veces en depósitos coluviales de derrumbes y deslizamientos.

En las colinas y montañas, el material meteorizado de las rocas del substrato y de los suelos dejados por los agentes de transporte pueden, a causa de la fuerte pendiente ceder a la gravedad, ya sea por sismos, lluvias excesivas, desestabilización de sus bases, o solo por la pérdida de cohesión interna; el material desprendido y acumulado en las bases de las laderas o sectores intermedios de menor pendiente se llaman depósitos coluviales (Rivera, 2011, pág. 519), (Lugo, 2011, pág. 121). Sobre estos depósitos, (González de Vallejo, 2010, pág. 100), indica que están casi siempre asociados a masas inestables, a baja resistencia de sus materiales, especialmente en el contacto entre el depósito y el substrato rocoso, además del peligroso papel de las lluvias por las altas presiones intersticiales que generan en estos depósitos.

Sobre los depósitos aluviales, González de Vallejo (2010, págs. 99-104), indica que son suelos anisotrópicos de propiedades geotécnicas altamente

variables ligadas a la granulometría. Sobre los lacustres, señala que son sedimentos finos, limos y arcillas de alto contenido de materia orgánica; suelos en general muy blandos. Que los depósitos litorales son blandos a muy blandos y muy anisotrópicos, de alta compresibilidad. Sobre los eólicos (en particular las dunas), que son suelos de carácter inestable por su movilidad. Sobre los depósitos glaciares, que su composición es muy heterométrica cuya heterogeneidad y anisotropía les define propiedades geotécnicas altamente variables. Sobre los depósitos evaporíticos (como la sal, yeso), destaca su alta y peligrosa solubilidad, cambios de volumen, riesgos de hundimiento y corrosión que generan en el hormigón de construcción.

Hay que destacar que, como señalan Lario y Bardají (2016, pág. 82), el análisis de peligrosidad de los suelos, considera los materiales principalmente ubicados en los 30 m de profundidad desde la superficie. Esto porque las amplificaciones de las ondas sísmicas, son claramente sensibles en acumulaciones de material suelto de gran espesor (≥ 30 m). Es también, en estos grosores de material suelto, que se consideran para los análisis de peligrosidad, la velocidad de propagación de las ondas de corte (ondas S).

Que la gran mayoría de ciudades se hayan emplazado sobre suelos sueltos no es casual, sino que, desde tiempos históricos, las poblaciones se ubicaban cercanas a fuentes de agua como los ríos, que proporcionan tanto el vital recurso hídrico como los terrenos llanos de suelos fluviales y aluviales, generalmente fértiles; también permitían el comercio y el transporte fluvial. En menor proporción, pero siempre considerable, muchas ciudades crecieron por las actividades portuarias, con las poblaciones instaladas en suelos sueltos de origen marino. Luego, en las últimas décadas, las grandes planicies de suelo eólico de los desiertos empezaron a urbanizarse por el desarrollo agrícola, impulsados por abastecimiento de agua a sus poblaciones y grandes irrigaciones. También las llanuras de suelos sueltos de origen lacustre y depósitos glaciales en las regiones muy frías y, muy especialmente los depósitos de meteorización in situ, han alojado pueblos y ciudades desde hace mucho, y continúan creciendo, gracias a la amplitud de sus terrenos llanos y variadas posibilidades de explotación de recursos.

Siendo los suelos de material suelto ampliamente mayoritarios en las zonas urbanas, su estudio resulta indispensable, empezando por clasificarlos desde un punto de vista genético. Pero, la complejidad de los suelos es muy alta, especialmente de los suelos transportados, varios de los cuales (como los aluviales y glaciales) presentan muchas variaciones en cortas distancias y espesores. Desde este punto de vista, la granulometría, que refiere al tamaño individual de fragmentos y partículas de que consta el suelo es la propiedad que mejor define sus tipos en sentido geotécnico. Al respecto, Borselli (2025, pág. 5), destaca que hay dos sistemas de clasificación de suelos de uso común para fines de ingeniería:

El Sistema de clasificación AASHTO se usa para la construcción de carreteras y terraplenes. El Sistema Unificado de Clasificación del suelo (SUCS) que se utiliza para casi todo trabajo de ingeniería geotécnica. Ambos sistemas emplean los análisis granulométricos y límites de Atterberg (llamados así en honor al científico sueco que los estableció). Estos límites “permiten la clasificación de las partículas finas (diámetro inferior a 0.4 mm). La naturaleza de estas partículas finas y su contenido en agua condicionan su comportamiento mecánico” (Dercourt & Paquet, 2014, pág. 367). La granulometría se define empleando tamices estandarizados

La clasificación SUCS incluye 15 grupos de suelos simbolizados en letras mayúsculas y minúsculas en inglés, referidos al suelo. Las letras son: G por grava; S por arena; M por limo; C por arcilla; O por suelo orgánico y P, por turba. Luego, como segunda letra, se emplean H: alta plasticidad; L: baja plasticidad; W: suelo bien graduado y, P: suelo mal graduado. Urdanivia (2019, pág. 13), señala que, “Para considerar una grava bien graduada se exige que su coeficiente de uniformidad sea mayor que 4, y el de curvatura debe estar comprendido entre 1 y 3. En el caso de las arenas bien graduadas, el coeficiente de uniformidad será mayor que 6, en tanto el de curvatura debe estar entre los mismos límites anteriores”.

En el Cuadro 5 se presentan los grupos de suelos reconocidos en el Sistema SUCS, y en la Figura 21, se muestra el método de clasificación granulométrica basada en el empleo de tamices.

Cuadro 5. Clasificación de Suelos Según el Sistema SUCS

Identificación en el campo (excluyendo las partículas mayores de 7,6 cm y basando las fracciones en pesos estimados)					Símbolo del grupo	Nombres típicos				
Suelos de grano grueso-Más de la mitad del material es retenido por el tamiz N.º 200 (La abertura del tamiz N.º 200 corresponde aproximadamente al tamaño de la menor partícula apreciable a simple vista)	Gravas-más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por el tamiz N.º 4 Para la clasificación visual puede suponerse que la abertura del tamiz N.º 4 es equivalente a medio centímetro)	Gravas limpias (con pocos finos o sin ellos)	Amplia gama de tamaños y cantidades apreciables de todos los tamaños intermedios		GW	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena con pocos finos o sin ellos				
			Predominio de un tamaño o un tipo de tamaños, con ausencia de algunos tamaños intermedios		GP	Gravas mal graduadas, mezclas de arena y grava con pocos finos o sin ellos				
		Gravas con finos (cantidad apreciable de finos)	Fracción fina no plástica (para la identificación ver el grupo ML más abajo)		GM	Gravas limosas, mezclas mal graduadas de grava, arena y limo				
			Finos plásticos (para identificación ver el grupo CL más abajo)		GC	Gravas arcillosas, mezclas mal graduadas de grava, arena y arcilla				
	Arenas-más de la mitad de la fracción gruesa pasa por el tamiz N.º 4 Para la clasificación visual puede suponerse que la abertura del tamiz N.º 4 es equivalente a medio centímetro)	Arenas limpias (con pocos finos o sin ellos)	Amplia gama de tamaños y cantidades apreciables de todos los tamaños intermedios		SW	Arenas bien graduadas, arenas con grava con pocos finos o sin ellos				
			Predominio de un tamaño o un tipo de tamaños, con ausencia de algunos tamaños intermedios		SP	Arenas mal graduadas, arenas con grava con pocos finos o sin ellos				
		Arenas con finos (cantidad apreciable de finos)	Finos no plásticos (para identificación ver el grupo ML más abajo)		SM	Arenas limosas, mezclas de arena y limo mal graduadas				
			Finos plásticos (para identificación ver el grupo CL más abajo)		SC	Arenas arcillosas, mezclas mal graduadas y arenas y arcillas				
	Métodos de identificación para la fracción que pasa por el tamiz N.º 40									
	Suelos de grano fino-Más de la mitad del material pasa por el tamiz N.º 200 (La abertura del tamiz N.º 200 corresponde aproximadamente al tamaño de la menor partícula apreciable a simple vista)	Limos y arcillas con límite líquido menor de 50	Resistencia en estado seco (a la disgregación)	Distancia (reacción a la agitación)	Tenacidad (consistencia)					
						Nula a ligera	Rápida a lenta	Nula	ML	Limos inorgánicos y arenas muy finas, polvo de roca, arenas finas limosas o arcillosas con ligera plasticidad
						Media a alta	Nula a muy lenta	Media	CL	Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas
Ligera a media						Lenta	Ligera	OL	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad	
Limos y arcillas con límite líquido mayor de 50		Ligera a media	Lenta a nula	Ligera a media	MH	Limos inorgánicos, suelos limosos o arenosos finos micáceos o con diatomeas, suelos limosos				
		Alta a muy alta	Nula	Alta	CH	Arcillas inorgánicas de plasticidad elevada, arcillas grasas				
		Media a alta	Nula a muy lenta	Ligera a media	OH	Arcillas orgánicas de plasticidad media a alta				
Suelos altamente orgánicos		Fácilmente identificables por su color, olor, sensación esponjosa y frecuentemente por su textura fibrosa			Pt	Turba y otros suelos altamente orgánicos				
Los suelos que poseen características de dos grupos se designan con la combinación de los dos símbolos. P. ej., GW-GC, mezcla bien graduada de arena y grava. Todos los tamaños de tamices se refieren al U.S. Standard.										

El Cuadro muestra 14 suelos minerales divididos en dos grupos que incluyen 8 tipos de suelos gruesos o granulares (parte superior) y 6 tipos de suelos finos o cohesivos (parte inferior). El tamiz n° 200 es el que separa los suelos gruesos de los finos si más de la mitad del material muestreado pasa por este tamiz. Las clases de suelos se completan con un tipo de suelo orgánico *Fuente.* (González de Vallejo, 2010, pág. 24).

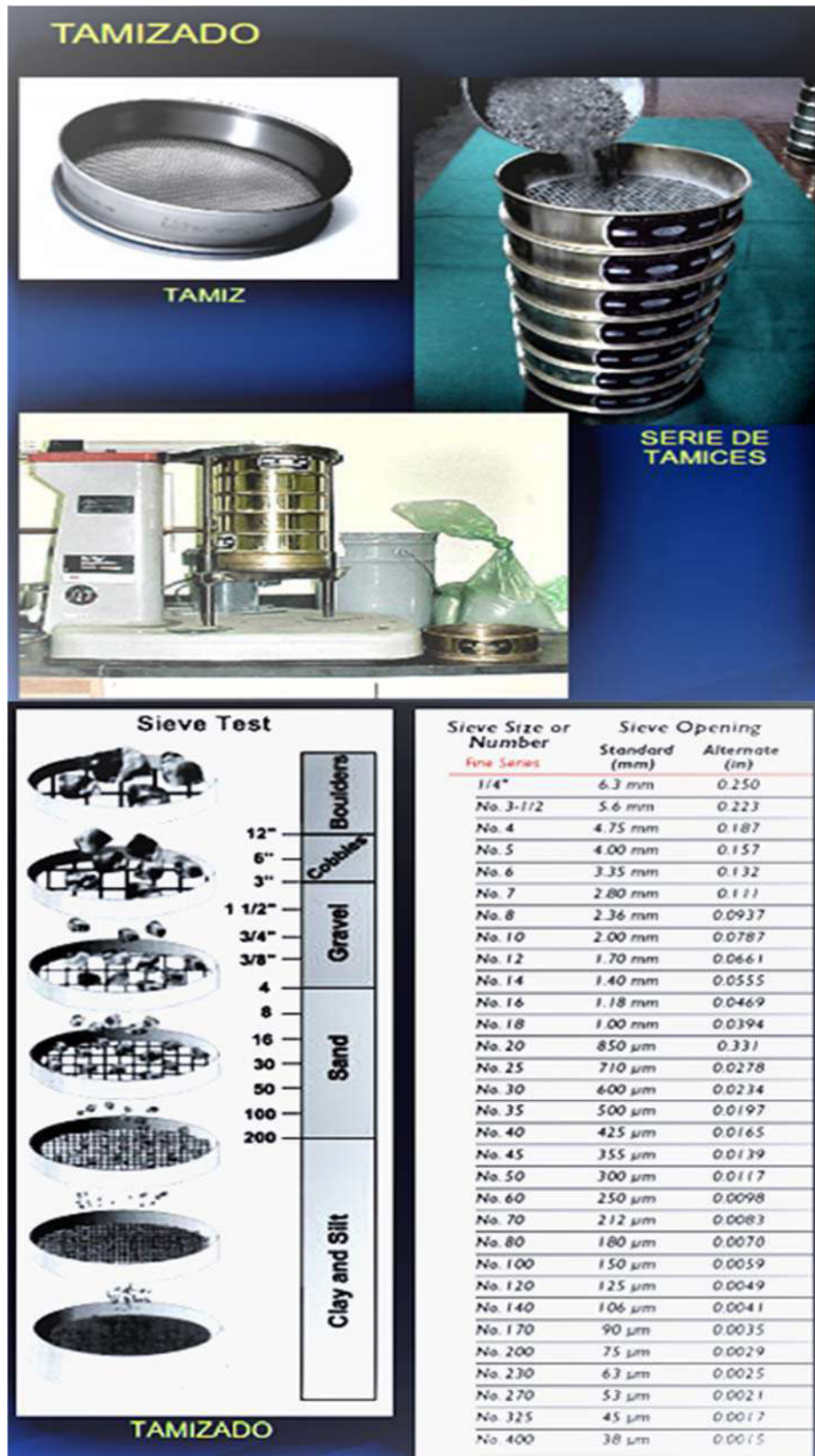


Figura 21. Clasificación de suelos mediante tamices

La vista muestra la separación granulométrica de los suelos mediante tamices. Nótese que el tamiz n° 200 es el que separa los suelos finos (limo y arcilla) de los suelos gruesos (arena, grava y bolonería). *Fuente.* (Bosh, s.f.).

Observando el Cuadro 5 que presenta los grupos de suelos según el Sistema SUCS, se ve, por ejemplo, que el suelo GW, está constituido por gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena, con muy poco o nada de elementos finos. Que el suelo GM, es de composición mayormente gruesa (gravas y arenas) y apreciable proporción de finos (limos) no plásticos⁷. Que el suelo ML, comprende limos inorgánicos y arenas muy finas, polvo de roca, arenas finas limosas o arcillosas con baja plasticidad (límite líquido <50%) mientras que, el suelo CH, comprende arcillas inorgánicas de alta plasticidad y arcillas grasas (límite líquido >50%).

Los límites de Atterberg son básicos para calificar la calidad geotécnica de un suelo, respecto de sus propiedades de plasticidad. El INACAP (2011, pág. 2), destaca que Atterberg definió la plasticidad como “la capacidad de un suelo de ser deformado”, indicando, además, que este destacado científico sueco:

“Observó que los suelos arcillosos en condiciones húmedas son plásticos y que se vuelven muy duros en condiciones secas; que los limos no son necesariamente plásticos y se vuelven menos duros con el secado, y que las arenas son friables en condiciones sueltas y secas; que existían arcillas altamente plásticas y otras de baja plasticidad”.

Respecto a la plasticidad, Kramer (1996, pág. 236), señala que “esta característica es sumamente importante; puede influir fuertemente en la manera en que un depósito de suelo amplificará o atenuará los movimientos sísmicos de la tierra”. Duque (2022, pág. 10), destaca que la rigidez del suelo depende tanto del espesor de los depósitos como de la compacidad de los suelos gruesos, o de la consistencia en el caso de suelos finos. Resalta también que, al reducirse la velocidad de las ondas sísmicas cuando pasan por suelos blandos, estas se amplifican por el principio de conservación de la energía, que posiblemente, la topografía y geometría de los depósitos sean

⁷ La indicación referida en el SUCS a plasticidad es muy importante, por la alta incidencia que tiene esta propiedad en el comportamiento geotécnico, por la alta deformación que tiene un suelo plástico sometido a esfuerzos (Grases, 2014).

también factores relevantes. (Duque, 2022, pág. 13), señala asimismo que, para fines prácticos, se puede considerar dos tipos de suelo muy riesgosos:

“los depósitos blandos mal consolidados en los que los esfuerzos cortantes crecen sin que necesariamente lo hagan los movimientos del suelo, suelos que después de la excitación quedan intactos, y los depósitos granulares sueltos y saturados que desarrollan grandes deformaciones, dando lugar a deslizamientos de tierra o a su licuación”

2.2.3.6.1. *Los suelos gruesos. Licuación y otros procesos*

Los suelos gruesos están formados por arenas y partículas mayores en diversas proporciones, aunque pudiendo contener limo y/o arcillas en menor proporción. Se forman por dos condiciones: 1) en zonas con abundancia de formaciones rocosas muy compactas, como areniscas, cuarcitas, y la mayoría de volcánicas, las cuales, al ser atacadas por la meteorización y erosión tienden a partirse en fragmentos mayormente gruesos y poco disgregables en partículas más pequeñas, 2) en zonas de clima árido y/o muy frío, donde la escasez de agua y/o bajas temperaturas favorecen la partición física de las rocas en fragmentos, pero no su alteración bioquímica; por ello, se mantienen como partículas gruesas poco o nada alteradas, donde se forman solo muy escasamente los elementos finos (Summerfield, 1996, págs. 144-145); (Rivera, 2011, págs. 143 - 147); (Derruau, 1970, pág. 253).

Los suelos gruesos suelen ser muy sueltos, pero según las condiciones ambientales y tiempo transcurrido pueden compactarse por compresión y por cementación debida a soluciones que hay en el agua del suelo, y precipitan aglutinando las masas. Por ello, numerosos depósitos aluviales originalmente sueltos pueden permanecer verticales una vez se cortan, como sucede en los acantilados de la Costa Verde (y muchos otros lugares), donde el grueso material aluvial de 300 m de espesor, constituido principalmente de gravas y arenas, con algo de limos, está medianamente cementado mayormente por

carbonatos (Kuroiwa J. , 2005, pág. 113). Las condiciones de cementación o ausencia de esta son esenciales frente a la cuestión sísmica.

Los suelos granulares, especialmente los más gruesos (gravosos) son más rígidos, y por ello, menos deformables ante las ondas sísmicas que los suelos finos. González de Vallejo (2010, pág. 89) señala que “Las partículas de los suelos granulares suelen comportarse de forma estable y resistente”, pero esto depende también de su heterogeneidad y densidad. Así, suelos gruesos bien graduados (GW y SW), tienen mejor comportamiento sísmico que estos mismos suelos, pero de granulometría más uniforme, es decir, mal graduados (GP y SP). Si además de mal graduados, estos suelos tienen cantidades apreciables de finos (limo y/o arcillas), su comportamiento sísmico puede empeorar por la plasticidad y retención de agua de varias de estas partículas. El mismo González de Vallejo (2010, pág. 80), hace notar que en la respuesta geotécnica son importantes también “la forma de las partículas, la distribución granulométrica y el tamaño de los granos”, en el sentido de que partículas angulosas forman un paquete más resistente al corte que otro de partículas redondeadas; que también es más difícil que se desplacen partículas más grandes que otras pequeñas.

La presencia de soluciones cementantes (como sílice o carbonatos) que aglutinan las partículas mejora la resistencia de los suelos; en cambio, como indica Kuroiwa (2005, pág. 54), la presencia de sales, como cloruros y sulfatos, pueden causar con el paso del tiempo fuerte corrosión en el concreto de los cimientos y paredes de las edificaciones, restándoles seguridad constructiva, especialmente en las zonas costeras cercanas al mar y terrenos fuertemente humedecidos (Solís et al., 2005, págs. 15-17), hecho que es bastante común en las viviendas de diversos barrios de suelos arenosos de las ciudades costeras, de napas freáticas superficiales a ligeramente profundas. Como indica González de Vallejo (2010, págs. 106-110), los suelos salinos plantean una condición particular de problemática ingenieril.

Las arenas eólicas en pendiente pronunciada son muy peligrosas como terrenos para edificaciones, por la marcada inestabilidad de la arena suelta, que cede fácilmente como flujo seco ante movimientos sísmicos no severos.

Las acumulaciones arenosas son frecuentes en las inmediaciones de diversas ciudades costeras. Un caso especial es el del cerro Lomo de Corvina, situado sobre la carretera Panamericana Sur, en Villa El Salvador, ocupado por ~ 10,000 habitantes. Fasabi, (2021, pág. 11), indica que es un distrito íntegramente arenoso de suelo desfavorable para la construcción de viviendas, pero que Lomo de Corvina es de la mayor preocupación; una duna fósil con una altura de ~ 250 m y pendientes de 25° a 30°. En su tesis, Fasabi destaca que, “El CISMID, Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres, ha calificado este asentamiento humano como uno de los más vulnerables del país por sus viviendas autoconstruidas y suelo arenoso que han evolucionado hasta incluir edificios de 3 y 4 pisos.

Las arenas eólicas en pendiente son peligrosas, como en general lo son los suelos granulares mal graduados, y de modo mucho más crítico cuando tienen napa freática superficial, que satura el suelo reduciendo drásticamente la fricción entre las partículas. Por ello, ante sismos severos son susceptibles de sufrir licuación, proceso definido por Lario y Bardají (2016, pág. 103), como el “fenómeno en el cual la fábrica o estructura del sedimento queda desorganizada durante un espacio muy corto de tiempo (unos segundos) perdiéndose el contacto entre clastos”. Las Figura 22 y Figura 23 muestran algunas condiciones frecuentes en que se produce la licuación y sus efectos.



Figura 22. Suelo mal graduado y Proceso de licuación por sismos

La Figura muestra un paquete de suelo grueso mal graduado, con muchos vacíos, pero con interacciones entre sus partículas (figura de la derecha). Abajo en azul se tiene un nivel de agua freática, el mismo que en caso de saturar el paquete, desorganiza la estructura, reduciendo las interacciones y fricción interna, y así el paquete pasa a portarse como un líquido. *Fuente.* (Civil Engg Seminar, 2015)

<https://civilenggseminar.blogspot.com/2015/04/soil-liquefaction.html>

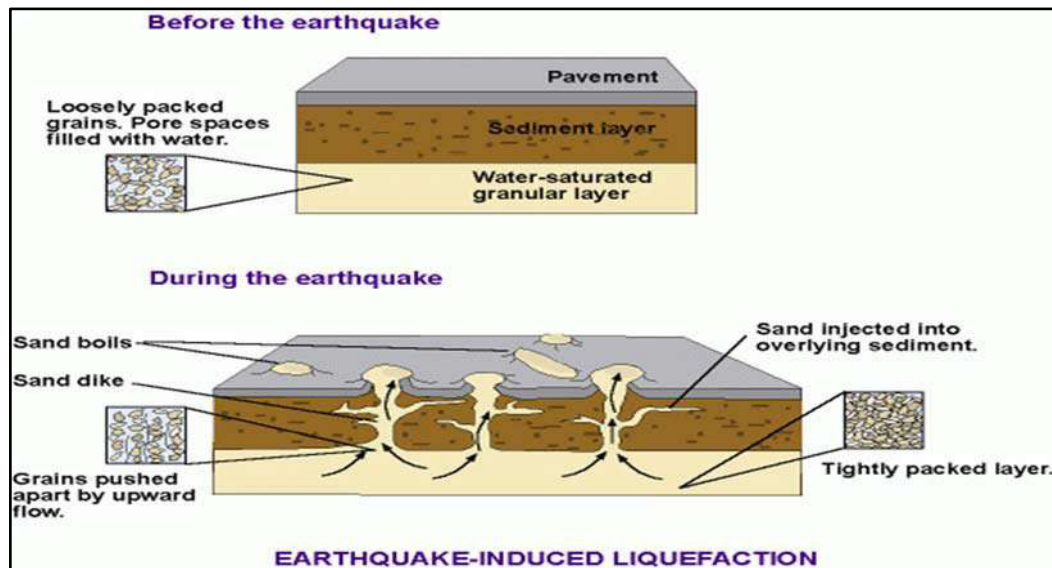


Figura 23. Proceso de licuación por sismos y efectos

La Figura superior del recuadro representa un pavimento construido sobre un suelo que tiene, a poca profundidad, un volumen de suelo saturado. Al ocurrir el sismo, la presión del agua es tan alta que eyecta porciones de masa interna (a modo de volcanes o géiseres de arena), ondulando y rompiendo el pavimento. *Fuente.* (Craven, s.f.) <https://christchurchearthquakes-hcraven.weebly.com/liquefaction.html>

La licuación de suelos afecta sobre todo a suelos saturados en agua, principalmente arenosos, areno limosos, y eventualmente, hasta gravosos, como se ve en la Figura 24.

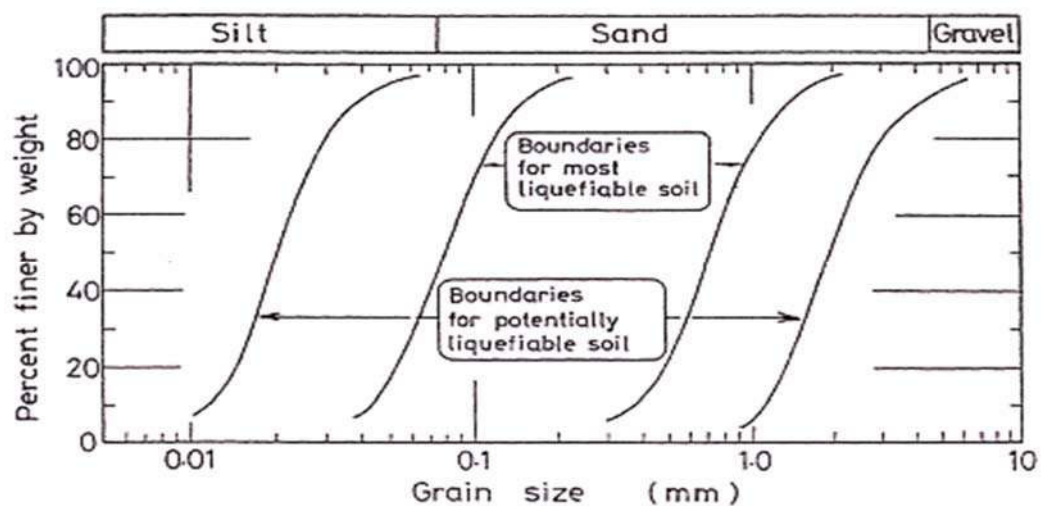


Figura 24. Curvas de granulometría en suelos licuables y no licuables

Se aprecian las curvas que delimitan la ocurrencia de licuación, según el tamaño de partículas y el peso porcentual de cada clase granulométrica en el suelo. *Fuente.* Tsuchida, (1970), citado en (Geotechnical Engineering Bureau NYSDOF, 2015, pág. 25).

Las dos curvas interiores de la Figura 24 señalan el rango de suelos propiamente licuables, que van de la izquierda (suelos limosos), hasta la derecha, de suelos exclusivamente arenosos. La curva límite más a la derecha señala suelos potencialmente licuables, que van desde suelos arenosos y areno gravosos (parte inferior y media de la Figura 24) hasta suelos estrictamente gravosos (gravas que llegan a ~ 4 mm de diámetro). A la derecha de esta curva los suelos no tienen potencial de licuación. La curva límite más a la izquierda separa los suelos finos limosos potencialmente licuables de los no licuables; estos últimos quedan a la izquierda del de los limos mayores a 0.01 mm; limos más pequeños no tienen potencial de ocurrencia de este proceso. Algunos autores, como Lario y Bardají (2016, pág. 309), restringen la ocurrencia del proceso a solo terrenos arenosos empapados en agua. Por otro lado, Kuroiwa, (2005, pág. 124), señala que, en suelos arenosos saturados en agua, una prueba de penetración estándar (SPT), que resulte con valor menor a 10 golpes, indicará una alta probabilidad de ocurrencia de licuación.

Como Efectos de la licuación, la Oficina de Ingeniería Geotécnica del Departamento de Transporte del Estado de Nueva York (2015, págs. 22-23), señala cuatro tipos de procesos severos que resultan de la licuación de suelos; son los siguientes:

- ♦ ***Deslizamientos de tierra*** Movimientos de masa producidos en terrenos de pendiente mayor a 5%, a modo de flujos de masas de suelo licuado que pueden abarcar grandes extensiones desplazadas pendiente abajo, llevando consigo, edificaciones grandes infraestructuras o barrios enteros en movimientos de masa sumamente destructivos.
- ♦ ***Dispersión lateral.*** Es el tipo más común de falla del terreno provocada por licuación, que implica el desplazamiento lateral de grandes bloques de superficie intacta, como resultado de licuación en capas subyacentes, proceso que al igual que en los deslizamientos de tierra pueden ocurrir hasta en pendientes leves de 5%. La dispersión puede llevar instalaciones enteras pendiente abajo, afectándolas, sin destruirlas.

- ♦ ***Oscilación del suelo.*** Movimiento en masa causado por la licuación en pendientes muy planas, que no generan deslizamientos ni dispersión lateral; más bien, se separan bloques superficiales mediante grietas y se desplazan unos hacia otros chocando entre ellos. Si hay edificaciones encima, estas pueden destruirse al chocar unas con otras.
- ♦ ***Pérdida de capacidad de carga.*** Ocurre cuando el suelo que soporta una estructura se licua y pierde resistencia, lo que lleva a asentamientos y/o inclinación de las estructuras edificadas.

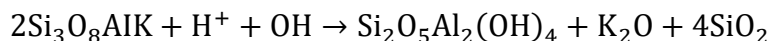
Aparte de estos procesos, hay otros causados por la licuación, que son todas formas de movimientos de masa producidos por las sacudidas y aceleraciones en suelos mayormente gruesos saturados en agua. González de Vallejo (2010, pág. 114), señala movimientos verticales y horizontales que se traducen en deslizamientos en taludes de fuerte pendiente y asentamientos en zonas llanas. Este autor reporta para el terremoto de 1964 en Niigata, Japón, “hundimientos de docenas de edificios bien preparados para la respuesta estructural (cajones rígidos), pero apoyados en depósitos flojos licuables, lo que llevó a asentamientos de metros y al vuelco y giro de los edificios”. Esta ocurrencia hace notar la gran peligrosidad de la ocurrencia de licuación, incluso en zonas de buena condición socioeconómica y calidad constructiva.

Un proceso particular es el llamado “volcanes de arena”, similares a chorros de arena que brotan de la superficie, a modo de “géiseres” o agua hirviendo, porque la licuación que se produce debajo de una superficie compactada, hace que la presión del agua interna haga estallar sectores como burbujas, disparando los citados chorros arenosos (Figura 23). En realidad, la licuación es un proceso muy complejo y diversificado en sus causas y efectos, como como señala Kramer (1996, pág. 5), cuando dice “el término licuación en realidad abarca varios fenómenos relacionados”. González de Vallejo (2010, pág. 114), cita también afectaciones generadas por la licuación en estructuras sumergidas, siendo una incidencia común en suelos saturados de agua en los que causan grandes daños, por ejemplo, en la construcción de puentes.

2.2.3.6.2. Suelos finos o cohesivos. Plasticidad y liquidez

Los suelos finos están formados por limo y/o arcilla, pudiendo incluir algo de arena y elementos gruesos. Se forman principalmente en dos condiciones: 1) Zonas con abundancia de rocas formadas de partículas muy finas poco compactas, como lutitas, pizarras, esquistos, margas, yeso, diatomitas y tobas, las cuales, al ser sometidas a los agentes erosivos y meteóricos externos, tienden a partirse o disgregarse en las mismas partículas finas que las constituyen. 2) Zonas de climas de meteorización muy activa, como los trópicos ecuatoriales, donde la abundancia de agua y altas temperaturas aceleran la hidrólisis, favoreciendo la alteración de los detritos reduciéndolos a partículas muy finas que se aglutinan en masas cohesivas, principalmente arcillosas (Derruau, 1970, pág. 255), (Derbyshire, 1976, págs. 49-56).

Carenas et al. (2014, pág. 226) muestran, del siguiente modo, un caso de hidrólisis actuando sobre un mineral común en rocas ígneas (feldespato potásico), el cual es atacado por los hidrogeniones (H^+) que destruyen su estructura mineral original, formando un nuevo mineral blando (arcilla).



En climas de Selva, con aguas ácidas ricas en hidrogeniones y alta temperatura de las regiones tropicales, se aceleran las reacciones químicas como la hidrólisis, formándose voluminosas masas mayormente arcillosas típicas de los suelos de la Selva, lo que prácticamente no ocurre en el desierto costero, pero sí, en término medio, en la Sierra, cuyo régimen climático es variado, pero mayormente templado húmedo y sub húmedo.

Hay varios tipos de arcilla, que se forman según los climas y tipos de roca que se meteorizan. Derruau (1970, pág. 67), señala tres tipos de arcilla: caolinita, illita y montmorillonita, las mismas que se diferencian principalmente por el espaciado que hay entre sus láminas. El autor señala que “La caolinita, tiene un espaciado de 7.2 angstroms, la illita de 10 Å, y la montmorillonita, casi de 14 Å”. Los espaciados distintos entre las láminas minerales producen una marcada diferencia entre la absorción y retención de agua, que es máxima en

la montmorillonita y mínima en la caolinita; esta última es la que domina ampliamente en los suelos de la Selva baja del país. La estructura de la arcilla es de láminas muy pequeñas, solo visibles al microscopio electrónico y difractómetros de rayos X (Figura 25).



Figura 25. Vista microscópica de una partícula de arcilla

Nótese en la Figura, la estructura laminar de este mineral, láminas que tienen espacios entre ellas, en las que pueden ingresar y adherirse pequeños volúmenes de agua, pudiendo ocasionar expansiones de la masa arcillosa si los espacios interlaminares son mayores. *Fuente.* (INACAP, 2011, pág. 3).

Por estar compuesto de partículas muy finas, el suelo se hace cohesivo y retentivo al agua, muchas veces compresible y hasta con propiedades electroquímicas. Bajo ciertas condiciones, estos suelos pueden sufrir severas deformaciones, pudiendo pasar de un estado sólido, a otro semisólido, plástico, y hasta líquido, cuando el contenido de agua supera ciertos umbrales (límites de Atterberg), que se pueden esquematizar (Figura 26):

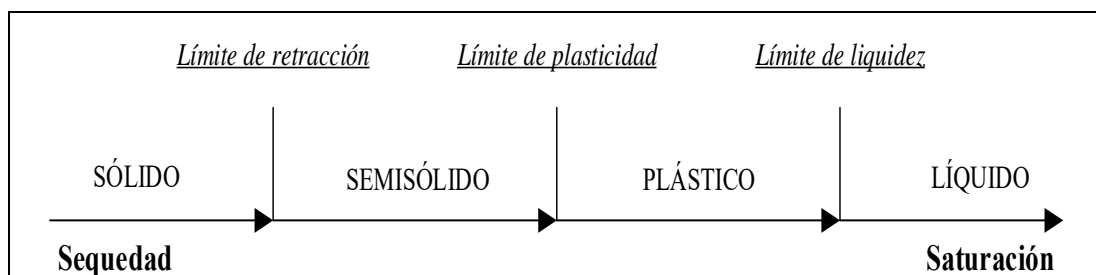


Figura 26. Esquema de límites de Atterberg

Fuente. Osejo, J.

Es decir, un suelo muy fino en estado seco se comporta como sólido, y luego, absorbiendo y reteniendo más humedad puede pasar a estado semisólido, plástico y hasta líquido, portándose como tales, a medida que pasa ciertos límites o umbrales. Según Derruau (1970, pág. 69), se llama umbral o límite de plasticidad a la cantidad de agua (en porcentaje de agua respecto al peso del terreno en seco) por encima de la cual el terreno se hace plástico, y que, si sigue aumentando la cantidad de agua puede superar el umbral de liquidez y así, pasar a comportarse como líquido. Señala también, que los umbrales o constantes de Atterberg, son específicos de cada roca.

Las deformaciones del suelo a causa de sus cambios de estado son peligros de primer orden para las edificaciones. Coque (1998, pág. 138) señala que las arcillas, margas, limos, alteritas arcillosas y ciertas formaciones superficiales como los loes (partículas similares a los limos, pero de origen eólico), son materiales favorables a desarrollar procesos de solifluxión (arranques de suelos en pendiente, que fluyen como masas pastosas cuando han absorbido gran cantidad de agua), más aún si contienen proporciones importantes de sales solubles, de cloruros y sulfatos.

Kuroiwa (2005, pág. 310), indica que las arcillas de tipo montmorillonita y bentonita son las partículas más deformables porque “tienen una capacidad de expansión de 8 a 16 veces su volumen”, por lo que se las llama también arcillas expandibles, que tan pronto se hinchan y ondulan cuando absorben agua comportándose como masas plásticas, que llegan a fluir como líquidos cuando superan el límite de liquidez, generando ocurrencias de solifluxión (Derruau, 1970, pág. 69), que pueden pasar a riesgosos deslizamientos Coque (1998, pág. 138), pero también se retraen fuertemente formando suelos arcillosos muy duros, aunque con muchas grietas, cuando secan. Por el contrario, González de Vallejo (2010, pág. 108) destaca que la presencia de carbonatos “pueden cementar la estructura e impedir o disminuir la expansividad”.

En el Perú, Dollfus (1965, pág. 233), indica para el rellano topográfico en que se encuentra el pueblo de Carampoma (alto valle del río Santa Eulalia, de alrededor de 2,000 habitantes), que la fracción fina de sus suelos tienen,

además de cloritas e illitas, también montmorillonitas, las cuales, en este caso, contribuyen a la cimentación de los agregados del suelo; es decir que aparte de sus propiedades expansivas, en ciertas ocasiones y cantidades, resultan más bien aglutinantes.

El clima es determinante en la formación de arcillas de uno u otro tipo. Al respecto, Derbyshire (1976, pág. 418), presenta un cuadro de regímenes de lluvia anual y el tipo de arcilla que se forma en esos climas: indica que, con una lluvia anual de 800 a 1,000 mm, las arcillas dominantes son la caolinita y montmorillonita; que, entre 1,000 a 1,200 mm de lluvia anual, es la caolinita el tipo de arcilla que se desarrolla y, entre 1,200 a 2,000 mm, son la caolinita y gibsita (hidróxido de aluminio) las arcillas dominantes.

Considerando los valores de lluvia anual y su relación con los tipos de arcilla indicados por Derbyshire (1976, pág. 418), algunos sectores menos lluviosos de la Selva alta incluyen presencia de montmorillonitas expandibles, lo mismo que sectores lluviosos y templado cálidos de la Sierra. La Costa norte (Tumbes, Piura y Lambayeque) afectadas por las recurrentes y voluminosas lluvias y altas temperaturas anuales de los fenómenos El Niño en esa zona, también propician estas arcillas, altamente deformables y riesgosas desde el punto vista sísmico. Justamente, el clima árido de las zonas desérticas, pero que afrontan períodos lluviosos, es una circunstancia que favorece la expansividad, porque a decir de González de Vallejo (2010, pág. 108), “debe producirse una variación en la humedad del suelo, por cualquier causa, que induzca a la expansividad o a la retracción, pudiendo ir una seguida de la otra”.

Al respecto, Alva y Rojas ((s.f.), pág. 1) citan documentación existente sobre expansión de suelos en “las ciudades de Tumbes, Talara, San Lorenzo, Paita, Bayóvar y Chiclayo. En el resto de la Costa, la presencia de arcillas expandibles es muy puntual. La Figura 27, tomada de la publicación de estos autores presenta, a escala muy general, la ubicación comprobada y posible de arcillas expandibles en el norte del país.

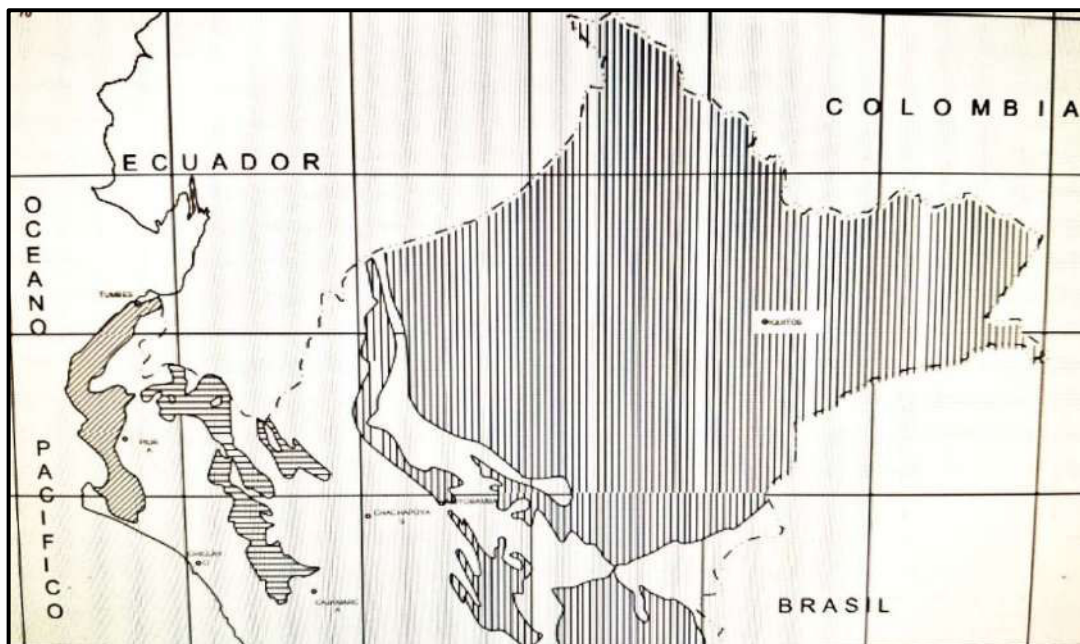


Figura 27. Zonificación de suelos expansivos en el norte del país

La Figura muestra cuatro condiciones: 1) En rayado oblicuo la zona norte costera, de probada existencia de suelos expansivos, donde los caracteres climáticos y geológicos son favorables a la existencia de estos suelos. 2) En rayado horizontal, sectores donde la geología y clima son potencialmente favorables a que existan suelos expansivos. 3) En rayado vertical, gran parte de la Selva baja, de geología favorable, pero clima desfavorable al desarrollo de suelos expansivos. 4) Zonas en blanco, que se consideran poco favorables a la presencia de estos suelos. *Fuente.* (Alva & Rojas, (s.f.), pág. 14).

El mapa de Alva y Rojas (Figura 27), muestra la Costa norte con presencia de arcillas expansivas, donde la condición climática mayormente árida no favorece la formación de arcillas, pero que, las a veces cuantiosas lluvias de los fenómenos El Niño, si las favorecen hasta el punto montmorillonítico. El desierto costero del centro y sur ya es extremadamente seco, que no favorece en nada la formación de arcillas. La Selva es muy favorable a la formación de arcillas, pero de caolinitas (no expandibles); pero, el substrato geológico de la Selva tiene formaciones sedimentarias dispersas y a veces frecuentes de lutitas plásticas, circunstancia por la cual si es posible que se formen más o menos localmente este tipo de suelos plásticos y deformables.

Debe agregarse que la escala muy general del mapa, no excluye sectores pequeños pero importantes no incluidos. Por ejemplo, la ciudad de Chiclayo (también muy sujeta a los eventos El Niño), es citada en el artículo de estos autores (pág.1) conteniendo suelos expansivos que no se representan en el

mapa. En realidad, el substrato geológico, cuando incluye abundantes rocas arcillosas (lutitas, pizarras y esquistos), se constituye en un elemento clave que posibilita la existencia de suelos expansivos. Otros tipos de rocas también aportan en esta posibilidad, pero siempre considerando el marco climático y la geomorfología de la zona como factores explicativos de su presencia.

2.2.3.7. Caracteres Geomorfológicos, Clima y Riesgo Sísmico

Coque (1998, pág. 5), define la geomorfología como la “ciencia que tiene por objeto la descripción y explicación del relieve terrestre continental y submarino...disciplina de síntesis orientada al estudio de uno de los componentes esenciales del medio natural”. Derruau, (1970, pág. 17), agrega que la geomorfología “constituye una de las partes de la geografía física o fisiografía como la denominan los autores de lengua inglesa”. El relieve es ese componente esencial, donde se desarrolla la gran mayoría de actividades humanas, incluyendo las ciudades; es el componente que recibe las vibraciones de los sismos y donde se manifiestan sus efectos. A su vez, el relieve ejerce importantes influencias en la actividad sísmica, en sus efectos directos e indirectos. Por ello, la geomorfología, es una disciplina básica de la geografía y geografía del riesgo, con la que la ciencia geográfica genera sus mayores aportes a la evaluación y gestión del riesgo sísmico.

A modo de ejemplo, la Figura 28, muestra una hipotética fisiografía, que incluye dos valles rellenos de material aluvial suelto (uno de relleno más profundo que el otro). Se aprecia que el valle mayor está dominado por una ladera montañosa, en contacto con la planicie aluvial mediante una falla (activa, en este caso). Para el análisis, se considera la fisiografía del área, como propia de un medio geográfico desértico, similar al de ciudades peruanas como Lima, Ica, Trujillo, Arequipa, y otras urbes de la Costa y Sierra baja occidental.

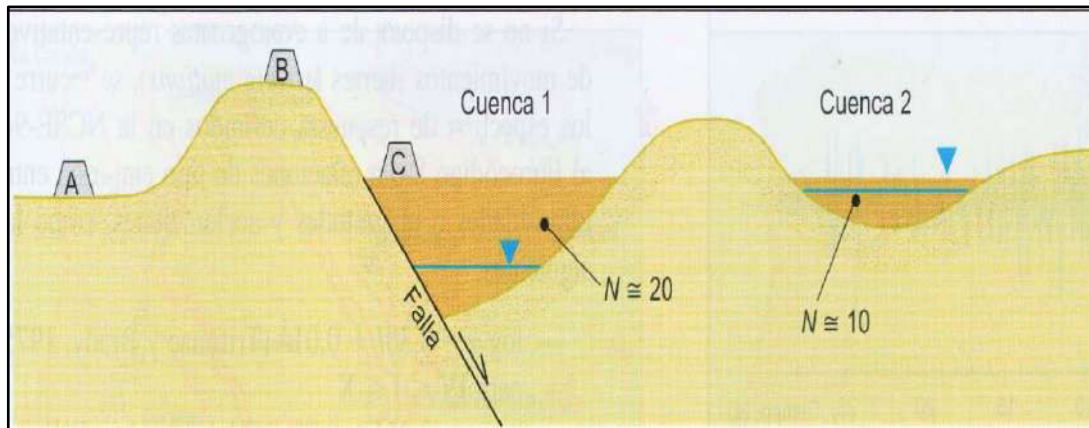


Figura 28. Influencia de la fisiografía local en la respuesta sísmica

La Figura muestra en A, una planicie rocosa formada en el substrato, que luego asciende a una montaña baja de cima más o menos llana (B). La ladera es un plano de falla que limita con un valle relleno profundamente por depósitos aluviales (Cuenca 1, que incluye el punto C). Este valle está separado de otro valle menor (Cuenca 2) por una colina cuyas rocas son parte del substrato, y tiene una cobertura aluvial mucho menos potente. La cuenca 1 tiene, en azul, una napa freática profunda, mientras que la cuenca 2 tiene napa freática superficial. *Fuente.* (González de Vallejo, 2010, pág. 682).

Sobre la Figura 28, su autor señala los siguientes planteamientos:

- A mayor espesor o profundidad de los suelos, mayor amplificación de la aceleración sísmica (espesor de la cuenca 1 > al espesor de la cuenca 2).
- Los caracteres de los suelos influyen en la amplificación de las ondas: suelos de cuenca 2 ($N = 10$) más blandos que en cuenca 1 ($N = 20$), y por ello, habrá una mayor amplificación de las ondas en la cuenca 2.
- A mayor área del suelo considerado, menor efecto de borde del substrato en el espectro de respuesta (cuenca 1 mayor área que cuenca 2).
- Cuanto más profundo es el substrato, habrá mayor período de vibración (cuenca 1 más profunda que cuenca 2).
- La presencia de un nivel freático alto en suelos blandos (cuenca 2) supone un claro peligro de licuación.
- La cercanía a una falla activa puede amplificar las aceleraciones e inducir nuevas roturas superficiales (sectores inmediatos a lo largo de la falla C).
- El efecto topográfico puede aumentar las aceleraciones (en el punto B habrá mayor aceleración que en el punto A).

Para una ciudad emplazada en esta hipotética fisiografía, los efectos de un sismo serán distintos para cada lugar según las condiciones locales; tipos de suelos, su espesor y extensión geográfica; presencia de fallas (activas o no); niveles freáticos, topografía superficial, cobertura vegetal, clima y uso de la tierra; es decir la fisiografía de conjunto explicará mucho de las diferencias entre los efectos de un sismo.

Analizando las condiciones hipotéticas de la Figura 28 se tiene que, el suelo de la cuenca 2 es más fino que el de la cuenca 1 y de menor espesor; por consiguiente, la amplificación de las ondas y período de vibraciones será mayor en la cuenca 1, pero en cambio, el suelo fino y saturado por la napa superficial de la cuenca 2, le genera a esta última, un alto riesgo de licuación. En el caso del suelo grueso y profundo de la cuenca 1, si bien aumenta su amplificación y período de vibración, en cambio, su napa freática profunda y el suelo mejor graduado propio de las grandes acumulaciones aluviales, le dan mayor estabilidad, a la que se suma la pendiente llana aluvial que no favorece los movimientos de masa (derrumbes, aludes, deslizamientos). No obstante, la estabilidad de la planicie no es general, ya que los sectores más cercanos a la falla activa tendrán efectos vibratorios y aceleración sísmica mayores. A la peligrosidad de la cuenca 1, de suelos finos y saturados, se le sumará el hecho de que su reducida extensión generará en los suelos de esta cuenca, un mayor efecto de borde por tener más cerca al substrato.

Como indica el autor de la Figura 28, el efecto topográfico puede aumentar la aceleración sísmica, la misma que resultará mayor en el punto B que en el punto A. Sin embargo, como indican Lario y Bardají (2016, pág. 83), la amplificación de ondas es muy irregular y compleja, ya que las ondas superficiales van por la topografía “subiendo montañas y bajando valles, causando amontonamientos y aceleraciones repentinas de los trenes de ondas como si de un atasco de tráfico se tratase”. Esto supone que el efecto sísmico por la topografía, es más complejo y difícil de evaluar y calificar cuanto más complejo es el relieve, lo que es común en las cordilleras como los Andes, donde se hallan numerosas pequeñas y medianas ciudades andinas en los valles, cimas y rellanos en medias laderas.

Hacer geomorfología supone reconocer todas las fisiografías, procesos morfodinámicos y rasgos morfológicos y morfogenéticos de un área que, a la larga, explican buena parte de los diferentes efectos de un sismo. En su tesis geomorfológica de los Andes Centrales Peruanos, Dollfus (1965, págs. 231-241), destaca, por ejemplo, los grandes desniveles que hay en las cuencas medias occidentales andinas, como alrededor de las pequeñas ciudades de Surco y Matucana, situadas a 2,000 y 2,500 msnm en el fondo de valle del Rímac, que tienen sobre sí laderas de más de 2,000 m de desnivel, un valor que implica una elevada energía del relieve que propicia cierta inestabilidad geotécnica, que podría provocar enormes movimientos de masa (como ocurren en los Andes a la escala de siglos o décadas).

Una correcta caracterización geomorfológica identifica (aunque no siempre es posible) si las laderas presentan peligrosos movimientos de masa, como deslizamientos activos, recientes, o huellas antiguas de ellos; identifica también movimientos de masa lentos de solifluxión, terracillas o reptación que puedan desembocar en movimientos mayores y más peligrosos, como lo señala Derruau (1970, págs. 68-72). Por su parte, Dollfus (1965, págs. 234-235), destaca estos movimientos en la Sierra y Selva alta, en los valles andinos de mayor pendiente, y como en sectores se hacen mayores cuando ocurren sismos, y más aún si estos coinciden con meses lluviosos, amenazando severamente a las pequeñas ciudades andinas situadas en los fondos de valle o en rellanos a media ladera.

Los procesos erosivos menores, como la formación de cárcavas y barrancos, que se indican usualmente en un mapa geomorfológico, también contribuyen a la desestabilización de áreas y resultan peligrosas para las instalaciones humanas en caso de sismos. La ciudad de La Oroya tiene este problema en gran medida por el severo abarrancamiento de sus numerosas cárcavas en sus laderas; pero también son frecuentes en otras ciudades andinas, como Huánuco, Ayacucho, Arequipa, Cusco, entre otras. Estas acciones erosivas menores son generalmente subestimadas en las evaluaciones de riesgo sísmico, pero en ciertos casos pueden ser muy destructivas en sectores urbanos e infraestructuras, por lo que siempre deben ser consideradas.

Los caracteres físico geográficos de un territorio definen mucho de los efectos directos e indirectos de un sismo, pero también de las condiciones post sismo. Por ejemplo, si ocurre en el norte costero durante un fuerte fenómeno El Niño, puede significar una catástrofe extrema para las ciudades y pueblos de esa región, ya que aparte de las víctimas mortales del sismo, la población damnificada sin viviendas, deberá afrontar las lluvias, elevadas temperaturas, prolongados aniegos, falta de agua, colapsos de alcantarillado, probables enfermedades por vectores e insalubridad, y difíciles condiciones de los poblados para acceder a la ayuda material, alimentaria, hospitalaria, etc. Si el sismo ocurre en la Costa sur, la región es más bien afectada a recurrentes sequías, las cuales son anualmente severas, y extremos en algunos años. La Costa sur, conjuntamente con el norte de Chile, es la zona más árida del planeta y, en caso de sismos severos, la escasa disponibilidad de agua se vería drásticamente agravada. A su vez, la zona altoandina del sur, muy cercana a la Costa, a la cual le aporta el agua con sus usuales cortos meses de lluvia, es una región muy fría, donde en invierno las pequeñas ciudades de esa zona soportan temperaturas frecuentes de -15° a -20°C y, en ocasiones, hasta -25°C con nevadas que duran varios días. Un sismo severo que afecte a esas poblaciones debe considerar estas situaciones post sismo.

Para las zonas medias y bajas de la Sierra, donde se halla la mayoría de ciudades y población de esta región, las condiciones climáticas no son tan rigurosas como las zonas altas, pero en cambio, lo agreste de su topografía dominante las hace sujetas a peligrosos movimientos de masa, huaycos e inundaciones, así como a largas interrupciones de sus vías de acceso, que aíslan también a las poblaciones de la Costa y zona altoandina, inclusive a las zonas de Selva, ocurrencias que son un tanto frecuentes en años sin sismos, pero que pasan a condiciones críticas bajo terremotos. Los poblados y ciudades de la Selva confrontan regularmente inundaciones estacionales; los sismos podrían agravarlas en extremo, sobre todo en los meses lluviosos, dado que son regiones de suelos finos y arcillosos, en llanuras de escaso drenaje, en climas muy cálidos y de frecuentes condiciones de insalubridad y enfermedades transmitidas por vectores. En cambio, su actividad sísmica es felizmente muy poco activa, especialmente, en la Selva baja.

Las distintas ciudades de las diversas regiones del Perú ante sismos tienen su propia geografía, y muchas de las condiciones que afrontan antes, durante y después de los sismos, tienen caracteres que permiten agruparlos regionalmente, para una mejor evaluación de los riesgos y su gestión.

2.2.4. La Aceleración Sísmica y Zonas Sismorresistentes

La aceleración sísmica, se define como la aceleración del movimiento del suelo causada por las ondas producidas por un sismo; es también, la medida de la fuerza del movimiento del suelo durante un sismo. Yauri (INDECI, 2017, pág. 19), dice que “la fuerza sísmica máxima que experimenta una estructura durante un sismo depende de la aceleración máxima del suelo”. Por ello, es decisivo identificar las máximas aceleraciones que hay durante un sismo y en la historia sísmica de una región. Hay desplazamientos de velocidad y aceleraciones diversas, tanto horizontales como verticales, las cuales se reconocen en los registros que dan los acelerógrafos. Un ejemplo de cómo las aceleraciones horizontales ejercen tensiones, se muestra en la Figura 29.

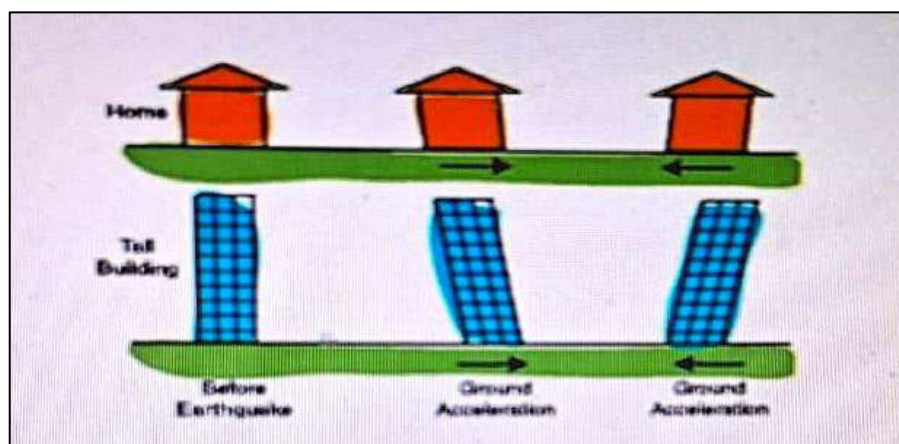


Figura 29. Tensiones de aceleración horizontal en edificaciones

Se tiene dos suelos en los que hay construidas casas (arriba) y edificios (abajo). La tensión ejercida por la aceleración sísmica horizontal provoca oscilaciones en sentido contrario al de la fuerza de aceleración. En este tipo de aceleración, mientras más elevada la estructura construida, mayor será el efecto de la tensión en estas edificaciones. *Fuente.* (EcoExploratorio, s.f.), <https://ecoexploratorio.org/amenazas-naturales/terremotos/magnitud-intensidad-y-aceleracion/>

Sobre la aceleración, Lario y Bardají (2016, pág. 80), destacan que “El parámetro más importante es la aceleración horizontal, y a partir de ella se establecen las normativas de construcción sismorresistentes”. Cabe notar que las medidas de la aceleración basadas en los registros de los acelerógrafos, se expresan como fracciones de la aceleración de la gravedad terrestre (g).

Como se ha visto en las secciones anteriores, los caracteres de rocas y suelos son determinantes en la variabilidad que tienen los parámetros de las ondas sísmicas, habiéndose observado, entre muy diversas incidencias, que los suelos finos reducen la velocidad de las ondas, pero aumentando drásticamente su amplitud (Figura 11, pág. 31). Como indica el CENEPRED (2014, pág. 39), la gran amplificación de las ondas en los materiales finos aumenta la aceleración sísmica en estos suelos. Kuroiwa (2005, pág. 115), destaca investigaciones realizadas en el sismo de 1985 en México y en 1989, en Loma Prieta (USA), que, según este investigador, llegaron a mostrar que:

“Para aceleraciones en roca de 0.025 g, la aceleración en suelo blando llega a 0.100 g; es decir, una amplificación de 400%”. Felizmente también se puede observar que cuando la aceleración en roca se aproxima a 0.40 g. debido al comportamiento altamente no lineal del suelo, las aceleraciones en suelo blando crecen muy lentamente a ese nivel y no hay amplificación, lo cual indicaría que para mayores aceleraciones en roca la aceleración en suelo blando crece hasta un máximo de unos 0.43 g.”

Respecto al peligro sísmico nacional, basado en gran parte en las aceleraciones horizontales máximas existentes en el país, la Figura 30, muestra las aceleraciones típicas regionales en el Perú. Estas isoaceleraciones son un correlato de las condiciones sísmicas nacionales, siendo mucho más intensas en la Costa, decreciendo paulatinamente hacia la Sierra y Selva, indicando que, sísmicamente, la Costa Centro y Sur del país son las regiones de mayor riesgo, con valores máximos que llegan y hasta superan 0.5 g, entre las mayores del mundo. Se considera que aceleraciones superiores a 0.30 g ya son altamente peligrosas.

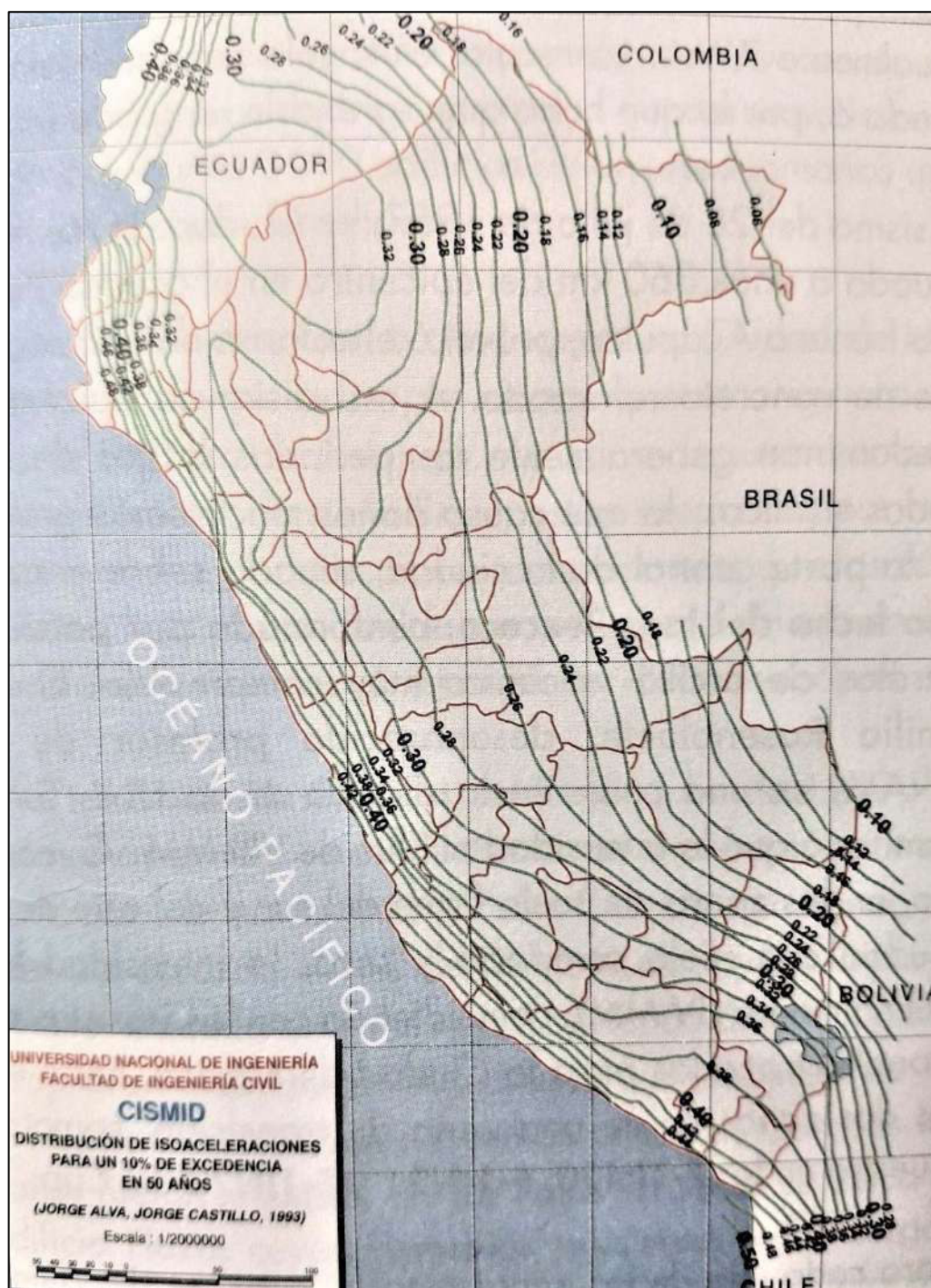


Figura 30. Isoaceleraciones para 10% de excedencia en 50 años

El mapa muestra aceleraciones del orden de 0.50 g en el sur (frontera con Chile) y, toda la Costa, con valores usuales superiores a 0.40 g. Hacia la Sierra, siguen valores usuales de 0.35 a 0.25 g. Hacia el Este, la mayor parte de la Selva alta y baja presentan valores máximos de 0.25 g, y en los sectores más orientales de Loreto y Madre de Dios valores inferiores a 0.10 g. Como particularidad, en la Selva Norte, cerca de la frontera con Ecuador, hay un vasto sector de aceleraciones del orden de 0.30 g, claramente distinto de los valores moderados a bajos que dominan en la mayor parte de la Selva. *Fuente.* Alva y Castillo (1993), citada en (Kuroiwa J. , 2005, pág. 109).

Con referencia a la seguridad de las edificaciones, la Resolución Ministerial (RM) 355-2018-Vivienda, del 22 de octubre de 2018, aprobó la Modificación de la Norma Técnica E.030 Diseño Sismorresistente que regía hasta ese entonces. La Figura 31, presenta a muy grandes rasgos en dos recuadros, la regionalización de este peligro.

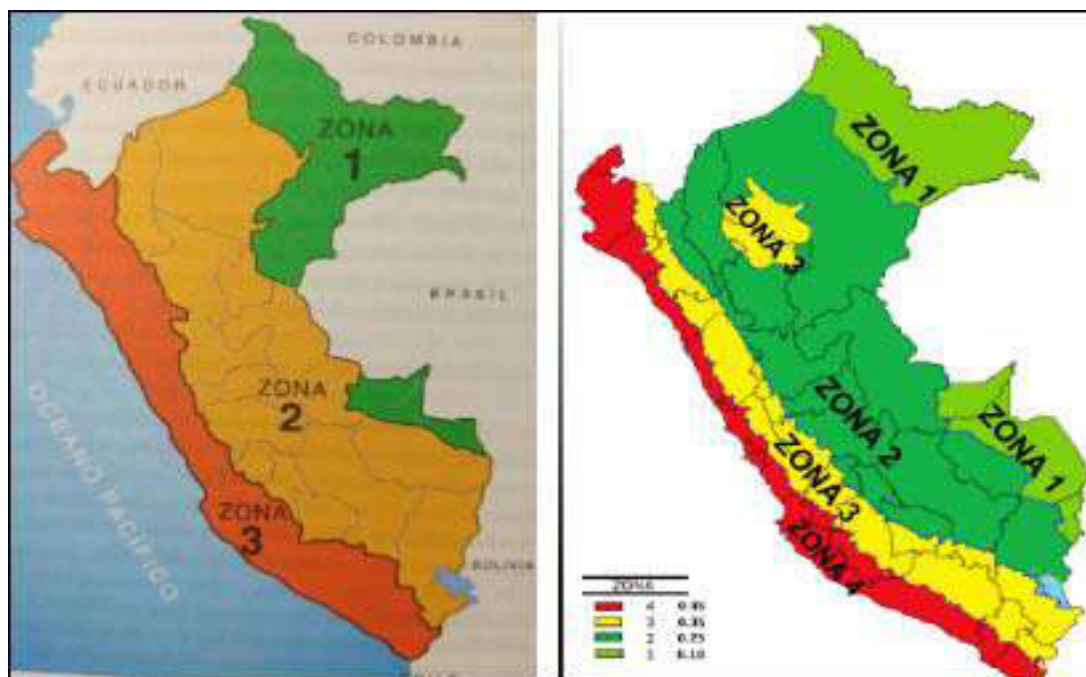


Figura 31. Antecedentes de la Norma E.030 Diseño Sismorresistente

En las Figuras se puede ver que hasta el año 2003 (izquierda), el país tenía una zonificación muy general, en tres zonas sismorresistentes: una amplia zona de Costa y Sierra calificada como Zona 3. La Zona 2, de extensos terrenos de Sierra y Selva, y la Zona 1, con los sectores más orientales de la Selva Baja. La zona de mayor peligro y, consiguientemente, la de mayor exigencia respecto a los parámetros de construcción sismorresistente es la Zona 3, seguida de la Zona 2 y, finalmente la Zona 1. Luego, la R.M de 2018, modificó esta zonificación, agregando una cuarta zona y cambiando la delimitación de las zonas anteriormente consideradas (Figura derecha). *Fuente.* Izq. (Kuroiwa J. , 2005, pág. 109). Der. (SENCICO, 2018, pág. 12).

En el Capítulo II, Peligro Sísmico, (SENCICO, 2018, págs. 12-13)., se señala:

“La nueva zonificación, se basa en la distribución espacial de la sismicidad observada, las características de los sismos ocurridos y la atenuación de estos con la distancia epicentral, así como en la información neotectónica. A cada zona se le asigna un factor Z, que se

interpreta como la aceleración máxima horizontal en suelo rígido, con una probabilidad de ser excedida en 50 años”.

La RM 355-2018-Vivienda, que modificó la Norma Técnica E.030 de Diseño Sismorresistente, acompañado de un nuevo mapa, esta vez con cuatro zonas sismorresistentes, se ajusta mejor a las isoaceleraciones identificadas para el territorio nacional. La más peligrosa Zona 4, se ajusta mucho mejor a las fuertes aceleraciones de la franja costera. La Sierra sísmica (Zona 3) también aparece mejor representada geográficamente, incluyendo un sector de Selva alta de aceleraciones similares a la Sierra sísmica. Lo mismo se puede decir de las Zonas 2 y 1, mejor adecuadas a las aceleraciones identificadas. No obstante, también puede decirse que el mapa establecido en la RM del MVCS de 2018 sigue siendo muy general, y que deberá mejorarse cada vez más con investigaciones y conocimientos nuevo que vayan surgiendo de la geografía sísmica nacional. Todo esto, además de las muy necesarias consideraciones que se debe tener para sectores específicos, relacionados con fallas activas y sectores tectónicos particulares, donde las aceleraciones pueden alcanzar localmente valores casi tan altos como los más altos de la Costa.

El Mapa Sismotectónico de la Figura 32, muestra varios de esos sectores. El esquema sismotectónico del mapa, explica mucho de la magnitud y distribución de los sismos. Como indica Tavera (2014a) en su publicación, el 70% de los sismos de mayor magnitud se presentan frente a la Costa, todos asociados a la subducción de la Placa Nazca bajo la Sudamericana, pero distribuidos en mayor número en la Costa Centro y Sur. La poca ocurrencia de sismos en la costa Norte, sugeriría que esta zona requiere mayor período de acumulación de energía. Tavera (2014a) indica también que, en el interior del país, los sismos están asociados a la formación y reactivación de las fallas geológicas existentes en las zonas andina y subandina, en los que las magnitudes de los sismos, dependen de las longitudes de las fallas.

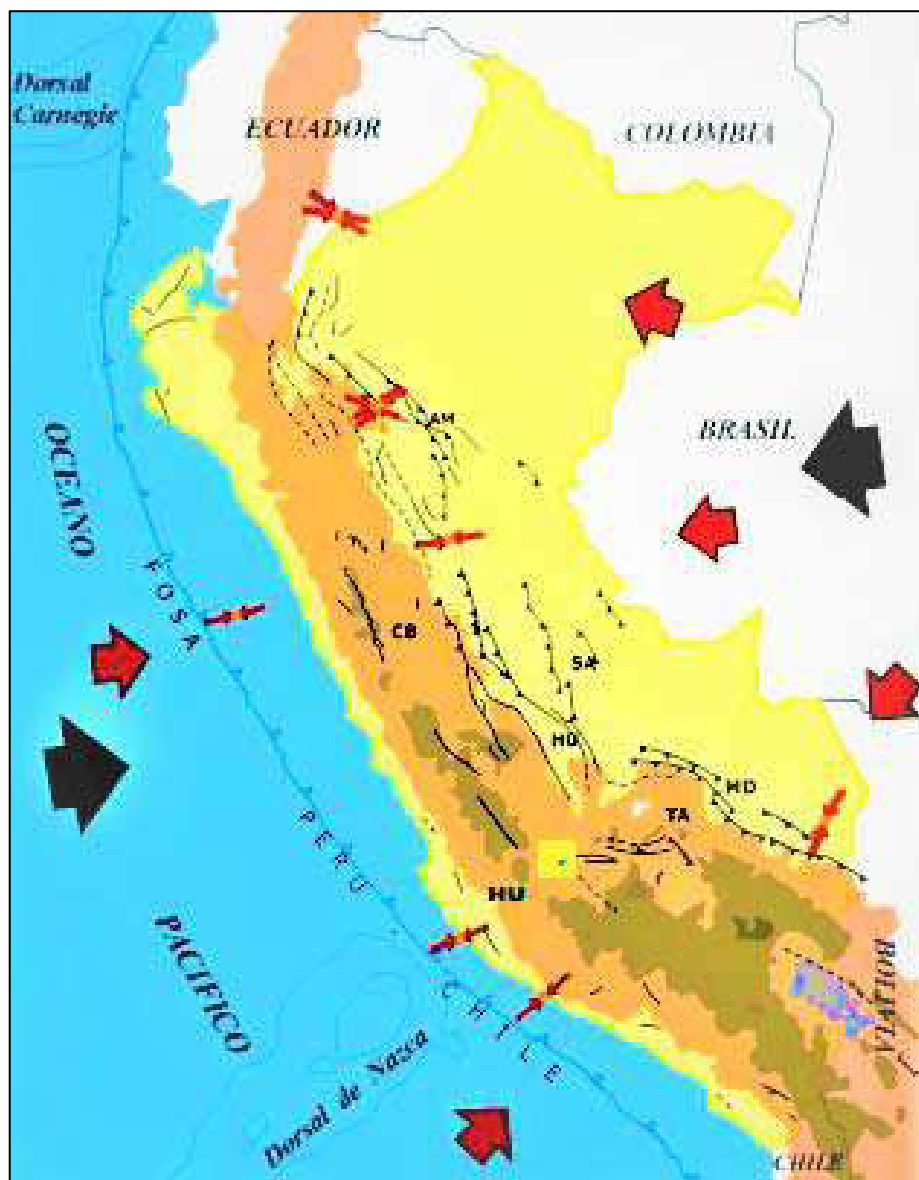


Figura 32. Esquema Sismotectónico del Territorio Peruano

En el mapa se destacan 1) la Fosa marina Peruano Chilena, bajo la cual ocurre la subducción de la placa oceánica Nazca, bajo la placa continental Sudamericana (ver también sección 2.2.2.1, pag. 21-23). 2) Fallamientos normales activos, en líneas negras gruesas y sistemas de fallas inversas (líneas negras con "dientes"). Otros aspectos que se detallan en la leyenda del mapa, que se indica a continuación. *Fuente.* (Tavera, 2014a, pág. 7).

La Figura 32 presenta los siguientes elementos (tomados de la leyenda del mapa de la citada publicación):

- *Las flechas rojas, pequeñas y grandes indican la dirección de la deformación local y regional.*

- *Las flechas negras corresponden a la dirección de convergencia de placas (Nazca y Sudamericana).*
- *AM, Sistema de fallas del Alto Mayo*
- *CB, Sistema de fallas de la Cordillera Blanca*
- *SA, Sistema de fallas de Satipo*
- *HU, Sistema de fallas del Huaytapallana*
- *MD, Sistema de fallas de Madre de Dios*
- *TA, Sistema de fallas de Tambomachay*

En esta publicación, su autor indica que, en el Perú hay tres principales fuentes generadoras de sismos:

- La superficie de fricción entre las placas Nazca y Sudamericana, presente en el borde occidental del Perú (entre la fosa y la línea de Costa), que generan sismos de magnitud mayor a 8.0 Mw.
- La deformación de la corteza continental con la presencia de fallas geológicas de diversas geometrías y dimensiones, que generan sismos de hasta 6.5 Mw.
- Sismos de hasta 7.0 Mw, que se producen por la deformación interna de la placa de Nazca por debajo de la Cordillera de los Andes a más de 100 km de profundidad.

Si bien, todavía bastante general, hay que destacar como hecho importante, que la RM del MVCS de 2018, se acompaña de un documento anexo que clasifica a todas las provincias y distritos del país, ubicándolos dentro de las cuatro zonas reconocidas en la RM. De este modo, el Estado aprueba los parámetros de construcción sismorresistente para las edificaciones en cada jurisdicción, a ser exigidas desde la fecha de su promulgación, siendo este un avance importante, por el alto riesgo sísmico de amplias zonas del país⁸. Sin embargo, el proceso de actualización zonal debe profundizarse siempre de un

⁸ Aun destacando este importante avance nacional, también deben notarse las singulares áreas geográficas de cada jurisdicción política, habiendo distritos de superficies muy extensas, que pueden contener dos de las zonas sismorresistentes, o algunos distritos y jurisdicciones calificadas, por ejemplo, en Zonas 3 o 2, y en cambio sus capitales distritales, hallarse muy cerca de las zonas 4 o 3, por lo que su caracterización sismorresistente podría ameritar reconsiderarse.

modo razonable, de acuerdo a los caracteres físico geográficos de cada zona, provincia o distrito, a su nivel de población y vulnerabilidades, exposición al peligro sísmico y a la nueva data que se va adquiriendo con cada movimiento. Esto se hace por ejemplo en México D.F., donde como señala Lomnitz (2005, pág. 10), para fines constructivos, la ciudad se clasifica en tres zonas sismorresistentes, pero que con cada sismo se van aportando cambios más o menos significativos.

La Norma E.030, Diseño Sismorresistente mencionada por el IGP (Tavera, 2014b, pág. 14), presenta una forma de clasificación de los suelos del país, adaptándolos a las exigencias de la Norma, estableciendo la clasificación diferenciada en 5 zonas (de I a V), siendo la primera la más apta para fines constructivos; las siguientes van conteniendo cada vez mayores limitaciones, siendo la última, aquella que tiene condiciones muy especiales y particulares de extremas restricciones, peligrosas para cualquier tipo de edificación.

2.2.5. Sistemas de Alerta Sísmica

Una de las máximas aspiraciones de la humanidad, especialmente de los muchos países ubicados en zonas altamente sísmicas (Perú entre ellos), es hallar formas de predecir los sismos con cierta aproximación y/o exactitud, que permita a las poblaciones potencialmente amenazadas ponerse a buen recaudo a tiempo. Pero, la suma complejidad de estos fenómenos, hace que predecir un sismo, su fecha, hora, magnitud y lugar en que se produzca, no sea una posibilidad realista, por lo menos en las próximas décadas.

Hace décadas, diversas características identificadas para numerosos sismos, condujeron a muchos científicos a creer que se estaban hallando valiosos elementos de juicio que sostengan predicciones. Así, durante mucho tiempo predominó el concepto de “silencio sísmico”, que indica que la probabilidad de que un sismo potencialmente cada vez más violento, ocurrirá en una zona en donde no se producen por muchos años sismos significativos que liberen la

energía que se acumula. Se pensaba que, una vez “liberada” esa enorme energía, se tendría mucho tiempo de relativa estabilidad.

Pero, si bien un sismo violento puede ocurrir en una zona por mucho tiempo estable, la realidad ha mostrado que no necesariamente tal sismo se debió al prolongado “silencio”, puesto que hay zonas donde se han producido sismos seguidos muy violentos, acompañados de fases de relativa calma. Se ha observado, asimismo, que ciertos grandes terremotos fueron precedidos de sismos menores cada vez más intensos; pero esto no se da siempre, y ocurren muchas veces sin movimientos menores previos. Se ha llegado incluso, a identificar comportamientos anómalos de animales, previos a la ocurrencia de un gran sismo; pero no se ha comprobado patrones concretos.

Un estudio que de algún modo implica cierta predictibilidad, es el realizado por Wiemer y Zúñiga (1994), citado en (INDECI, 2017, págs. 4-7), que muestra el resultado de una metodología estadística por la cual, mediante algoritmos se identifica las áreas de mayor o menor probabilidad de ocurrencia de sismos de determinada magnitud. Como indica el estudio de INDECI (2017, pág. 5), existen zonas a las que se puede llamar “asperezas” de la corteza, donde los movimientos que deberían resultar de la tectónica (como la subducción de la placa Nazca bajo la Sudamericana) se ven frenados y retardados, por lo que se acumulan en estas “asperezas” ingentes cantidades de energía, las mismas que se han podido detectar últimamente gracias a la exactitud de los sistemas de GPS, con los que se monitorea actualmente los movimientos de la superficie terrestre con precisión $<1\text{mm}$, considerando los desplazamientos superficiales que se producen o deben producir por el movimiento de las placas. Al observarse zonas con falta de movimiento, se infieren sectores de asperezas donde se liberará la energía en sismos de mayor magnitud.

Observaciones mediante GPS llevadas a cabo por Chlieh et al. (2011), citadas en INDECI (2017), lograron identificar en el Perú la existencia de cuatro asperezas, una frente a Lima (al parecer relacionada al terremoto de 1746; una segunda frente a Arequipa; la tercera frente a Moquegua – Tacna, y la cuarta, frente al norte chileno, de Arica a Tarapacá. Para la región central, sector de Lima, la aspereza identificada presenta dos áreas de acoplamiento

que parecen conectadas formando una zona paralela a la costa de 350 km de longitud. La magnitud del sismo para esta zona, que incluye a toda la gran Lima, ha sido estimada entre 8.5 - 8.7 Mw. La Figura 33 presenta la ubicación de las mencionadas “asperezas” en relación con potenciales sismos mayores que puedan producirse en esas zonas.

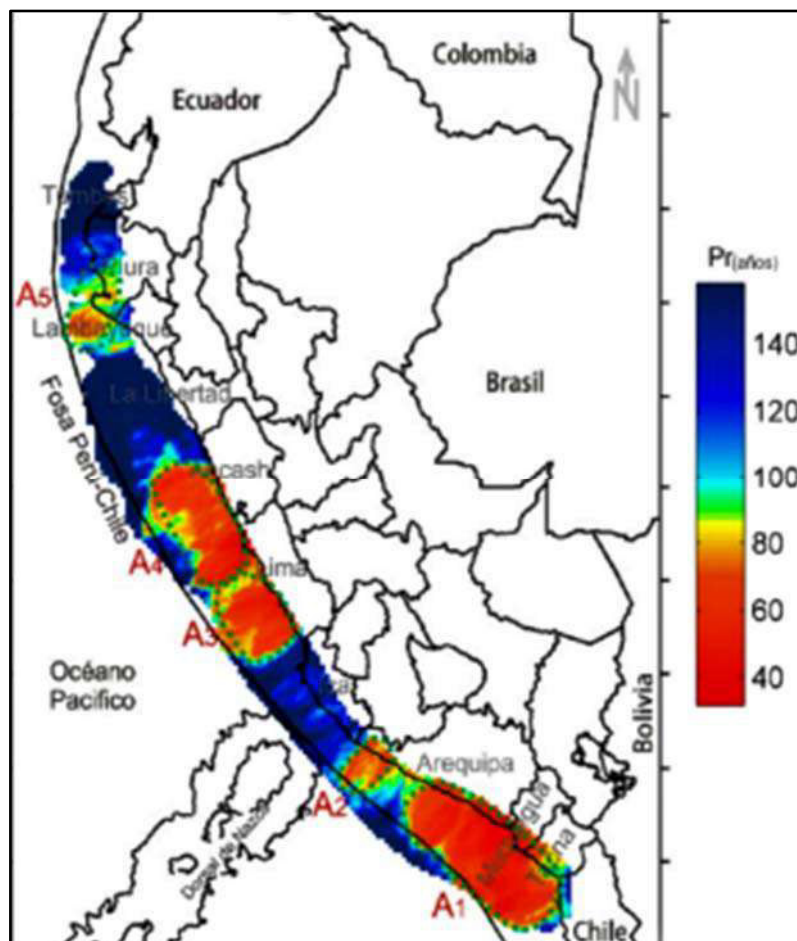


Figura 33. Períodos de retorno para las asperezas en la Costa

La Figura muestra las zonas de mayor y menor acumulación de energía por la existencia de “asperezas” en la corteza (aparecen en rojo), indicando las zonas de menor movimiento registrado por mediciones de GPS, y tienen una recurrencia potencial de plazo más breve, que las zonas en amarillo, celeste y azul. *Fuente.* (Tavera, 2014a, pág. 18).

En la misma publicación, que hace referencia a la Figura 33 (Tavera, 2014a, pág. 17), destaca que, la aspereza A1 situada frente a Arequipa, Moquegua y Tacna, posiblemente asociada al sismo de 1868 (Arica), podría causar un sismo de 8.8 Mw. Que la aspereza A2, ubicada frente a Yauca – Acarí (Arequipa), que estaría asociada al sismo de 1913, puede causar un sismo de 7.5 Mw. Sobre las asperezas A3 y A4, situadas frente a Lima, posiblemente

ligadas al sismo de 1746, podrían generar un terremoto de 8.8 Mw. Sobre la aspereza A5, ubicada frente a Chiclayo, señala que está probablemente relacionada al sismo de 1619, y que puede generar un sismo de 7.5 Mw.

Las posibles y graves ocurrencias sísmicas señaladas para la Costa en las asperezas señaladas, son de las más rigurosas formas predictivas de sismos a que se ha llegado en el conocimiento actuales. Si bien, son resultado de numerosas y profundas investigaciones, solo se llega a señalar áreas aproximadas de gran peligro y magnitudes sísmicas potenciales que podrían suceder más o menos próximamente. No hay predicción posible en términos de señalar fechas, áreas y magnitudes probables.

2.2.5.1. Sistemas de Alerta Sísmica en Tiempo Real

Aún con toda la incertidumbre y suma complejidad de la ocurrencia de sismos, de todas formas, la sismología ha progresado mucho, y en algunos países se ha llegado a implementar en los últimos años, ciertos sistemas de alerta que avisan a la población de un sismo que ya se produjo (no lo predice, solo lo pone de conocimiento muy rápidamente cuando ya este ocurrió). Esto es posible porque se han instalado en varios lugares sensores sismográficos conectados a redes satelitales y radio, programados para cuando ocurre un sismo severo, por ejemplo, de M: 6.0 o más (depende de la magnitud que se programe). En base a estas redes sismográficas, el sistema ubica el foco de un sismo de la magnitud programada a reconocerse; se activan las alarmas automáticamente, y son enviadas por señales de radio a las ciudades próximas, donde se han instalado cientos a miles de sirenas que pondrán en alerta a los pobladores, de que un sismo potencialmente riesgoso se ha producido, y sus ondas están por llegar en los próximos segundos.

México ha sido el pionero mundial en implementar estos sistemas, y es que, como una de las respuestas que se planteó el país al sufrir el devastador sismo de 1985, que dejó miles de muertos e incalculables daños económicos y sociales, principalmente en su ciudad capital, fue tratar de implementar un

sistema que pueda proporcionar una alerta eficiente, que minimice lo más posible estas tragedias sísmicas que les afectan con frecuencia.

El Sistema de Alerta Sísmica Mexicano (SASMEX) nació como proyecto en 1989, y comprende sensores sísmicos distribuidos en el centro y Costa oeste de México. El sistema hizo el primer alertamiento de ocurrencia de un sismo a una ciudad en el mundo, a la ciudad de México, (CDMEX) el 14 de septiembre de 1995. En los años siguientes, el SASMEX siguió instalando cientos de sensores sísmicos y decenas de miles de emisores de alerta (en calles, avenidas, hospitales, colegios) en CDMEX y también en otras ciudades, habiendo llegado a Oaxaca, Morelia, Acapulco, Chilpancingo, Puebla, Guadalajara y Colima, siendo ya más de 30 millones de mexicanos que cuentan con esta importantísima salvaguarda.

México sigue instalando más sensores y mejorando el sistema con cada vez mayores aportes tecnológicos, que le permiten “avisar” a la población cada vez más exactamente el lugar de ocurrencia del sismo, la magnitud y tiempo que tiene el poblador antes que lleguen las primeras ondas. Las señales están activas para funcionar en el momento de ocurrencia, incluso en los teléfonos móviles con aplicativos de forma que a los usuarios de teléfonos celulares, les llegará una alerta inmediata indicando que un sismo violento y de riesgo alto, le llegará a su ubicación en unos segundos. Otros países se han sumado al sistema, siendo Japón el segundo en implementarlo; desafortunadamente para este país, la mayoría de sus ciudades se hallan muy próximas a los frentes de convergencia de placas, y por tanto las ondas sísmicas desde los focos llegan muy pronto a las ciudades, no es el caso de CDMEX, que con frecuencia sufre sismos severos que llegan desde el mar, a más de 300 km. La circunstancia japonesa se repite en el caso de las ciudades de la Costa peruana, como también sucede a las principales ciudades chilenas, algunas ecuatorianas y colombianas, entre muchos otros países.

Con más de veinte años de retraso, en el Perú, el 20 de agosto de 2019, Hernando Tavera, presidente del IGP, informó a la colectividad que el país implementará el Sistema de Alerta Temprana de Sismos del Perú, mediante la instalación (desde 2020), de 110 sensores a lo largo del litoral (entre 30 a

40 km de distancia entre uno y otro), para que funcione de forma similar al mexicano, es decir que, una vez detectado el sismo, su ubicación y magnitud, enviará inmediatas señales de radio, conectadas a alarmas situadas en las ciudades (Redacción RPP, Perú Comenzará a instalar en 2020 su sistema de Alerta Temprana de terremotos, 2019). Tavera señaló que, en el peor de los casos, la advertencia, llegará cinco o seis segundos antes... y que, en el caso del terremoto de Pisco de 2007, la población de Lima habría sido advertida con 30 a 35 segundos de anticipación, al estar a 250 km al norte del epicentro. Indicó, además, que el sistema estaría empezando a funcionar el año 2021.⁹

Los tiempos existentes entre la alerta y llegada de las primeras ondas pueden ser muy cortos; esto sucede si los sismos ocurren a corta distancia, que es el caso dominante para las ciudades costeras, situadas frente y próximas a la convergencia de placas. Por ello, cinco o seis segundos, puede ser el tiempo en sonar las alarmas antes que lleguen las primeras ondas al Callao o La Punta, para un fuerte sismo cuyo epicentro se halle a unos 40 km al oeste. Pero, en este mismo sismo, en la zona de Chosica, sus pobladores tendrán alrededor de 5 a 6 segundos adicionales, muy valiosos, en relación a los que tienen los pobladores de La Punta y distritos litorales. Lo mismo puede decirse de un fuerte sismo que ocurra bajo el mar frente al distrito de Chilca, a donde las primeras ondas llegarán en 5 o 6 segundos; unos dos o tres segundos después llegarán a Villa El Salvador y distritos colindantes, y 4 a 6 segundos después a los distritos limeños del norte. Es decir, la distancia del epicentro define el tiempo que se dispone para ponerse a buen recaudo.

En el caso de México, su ciudad capital CDMEX, se halla a 360 km del epicentro del terremoto de 1985. Si ese año hubiera existido este sistema (que ya emitió su primera alerta de sismo ocurrente en 1995), el aviso habría llegado a la población con casi 1 minuto de anticipación. La tragedia pudo ser mucho menor y se habrían salvado miles de víctimas; lastimosamente no pudo ser. En 2017, otro severo sismo sacudió CDMEX y otras ciudades

⁹ Como sucede tantas veces en nuestro país, la generalidad de las obras, incluso las de necesidad vital demoran excesivamente, no quedando culminadas casi nunca en los plazos previstos, sino años y hasta décadas después. La corrupción, ineptitud e ineficiencia generalizadas son de las tantas taras que se deben superar como país.

centrales, pero esta vez, la alarma solo se dio entre 7 a 8 segundos antes, porque su foco se produjo muy cerca (sismo de Puebla, intra placa, no de convergencia de placas). Aun así, este corto tiempo salvó vidas en CDMEX.

La geografía sísmica del Perú, tiene a sus principales y más pobladas ciudades cerca de la convergencia de placas, es decir, en la Costa, donde son más frecuentes y violentos los sismos, siendo esta la región más poblada del país, la que crece poblacionalmente cada vez más, y la más importante económicamente. Este sistema puede ayudar mejor a algunas ciudades costeras algo alejadas del mar (como Ica, Piura y varias ciudades pequeñas). La ciudad de Arequipa, y otras como Moquegua y pequeñas ciudades andinas del interior, que se ubican a distancias de 100 a 200 km de la costa, se favorecerán mejor del sistema, puesto que un sismo que se genere en el frente de subducción, podría ser alertado en estas ciudades con tiempos cercanos a medio minuto. Si durante el terremoto de Ancash de 1970, Huaraz y las demás ciudades del valle (entre ellas, la desaparecida Yungay) hubieran contado con este sistema, habrían sido “avisadas” con este rango de tiempo, y mucha más gente se habría salvado.

Pero la técnica es reciente, y aun en caso de que se implemente en el país, no es sencillo ni poco costoso emplazarlo en los cientos de medianas y pequeñas ciudades de la Costa, Sierra y Selva Alta amenazadas por la actividad sísmica. En el caso de las ciudades costeras, lo más probable es que este novedoso sistema de alerta otorgue solo unos segundos para poner a buen recaudo a su población; pero que serán siempre vitales y evitarán pérdidas de vidas posiblemente cuantiosas. Entonces, sería muy lamentable que el país no implemente el sistema como está ideado. Se fijó 2021 como el inicio de funcionamiento del sistema y, todo día de retraso, que pudo darse, como, por la pandemia del COVID-19, y sus graves secuelas económicas, médicas y sociales, sería simplemente una negligencia gubernamental e institucional inexcusable que, se espera, por el bien del país, no siga

ocurriendo¹⁰, pero que, lastimosamente (ya en 2026), su implementación cierta sigue siendo solo una promesa.

También, y desde una visión algo pesimista (o quizá realista, según se mire), hay que decir que aún con los enormes avances de la sismología, la historia mundial presenta innumerables episodios sísmicos que aún no tienen respuestas y, en muchos casos, como lo señala Lomnitz (2005, págs. 15-18), son incomprensibles. Al respecto, cabe transcribir algunos párrafos escritos por este notable geofísico alemán, nacionalizado mexicano:

“El 26 de diciembre de 2003 un sismo destruyó la ciudad de Bam, en Irán. Nunca antes había temblado en esa histórica ciudad, y casi todas las casas eran de adobe y de un solo piso, con paredes de casi un metro de ancho y azoteas de barro muy pesadas. Más de 80% de estas casas se cayeron. El sismo ocurrió como a las cinco y media de la madrugada y murió 43% de la población. La ciudad se encuentra en un oasis en medio del desierto. El agua subterránea sube por una falla geológica en el terreno, por eso el subsuelo está húmedo y blando... Éste es un material peligroso, por su mala resistencia a los temblores. El sismo de 2003 tuvo una magnitud de 6.5, que no es tan alta... En otros países, tales como Costa Rica, el uso del adobe está prohibido desde 1910 y ya no queda una construcción de ese material. Con eso prácticamente acabaron con el riesgo sísmico...

La ciudad china de Tangshan, el 28 de julio de 1976, fue víctima de un sismo de magnitud cercana a 8. Murieron más de 300 000 personas en medio de la noche. Fue el peor sismo del siglo pasado. Pero China tiene el mejor sistema de prevención de temblores del mundo... el Buró Sismológico de China, que se encarga de predecir los temblores. Los historiadores chinos confeccionaron mapas y listas de los sismos desde siglos antes de Cristo. Sin embargo, no

¹⁰ En subsiguiente entrevista (RPP, 2022), el presidente del IGP, Hernando Tavera, precisó que en junio de ese año el IGP culminaría la instalación de los 106 sensores previstos para la Costa y, que, a fines de 2022, se estarían realizando las primeras pruebas del sistema, el cual comprende a la vez sirenas que debieran ser instaladas por los gobiernos regionales (GORE). No destacó en cambio, si el sistema será aplicado también a los teléfonos celulares. <https://www.youtube.com/watch?v=tqLhOfXEeWE>

se había registrado ningún sismo en Tangshan, y nadie se imaginaba que una catástrofe de esa magnitud podía ocurrir...

El 1 de septiembre, que es el aniversario del gran sismo de Tokio de 1923 se realizan simulacros en cada ciudad, en cada pueblo y en cada empresa o institución. Todos participan y se esfuerzan en saber qué hacer. En los lugares públicos, grupos teatrales escenifican cómo tiene que comportarse cada miembro de la familia en caso de temblor. Y, sin embargo, en el sismo de Kobe de 1995 ardieron miles de casas de dos pisos de alto y murieron más de 5,000 personas. Las casas de Kobe no eran viejas. Apenas 50 años antes, en 1945, habían sido arrasadas en un ataque aéreo durante la guerra, de modo que las casas en 1995 tenían menos de 50 años de construidas. Se supone que habían sido levantadas de acuerdo con el reglamento contra temblores, y eran casitas unifamiliares. Muchas eran de madera, material liviano excelente para sismos. Pero un brasero se vuelca con facilidad y el fuego se propaga de una casa a otra con gran rapidez. Los bomberos no pudieron pasar por los postes caídos en las calles tan estrechas. Durante varios días, la ciudad ardió y la cultura sísmica sirvió de poco...

Después del gran sismo de 1985, el valiente pueblo mexicano se levantó espontáneamente y salió a la calle para salvar gente. Hubo de todo: doctores, albañiles, hasta mineros de Pachuca que se metían entre los resquicios de los edificios derrumbados con sus cascos y lámparas... La torre de hospitalización del Hospital Juárez fue uno de los casi 400 edificios que se derrumbaron. La mayoría de los pacientes, enfermeras y doctores murieron. A los siete días se celebró una misa frente al edificio destruido, por las almas de la gente enterrada en las ruinas. De repente se supo que habían encontrado un bebé vivo entre los escombros. Entraron otra vez a las ruinas y pudieron salvar a 18 bebés recién nacidos, que se encontraban en la sección de maternidad. Todos fueron adoptados por voluntarios. Nadie sabía que un recién nacido pudiera sobrevivir siete días en las ruinas de un edificio, sin alimento ni bebida." (Lomnitz, 2005, págs. 17-19).

Lomnitz destacó el hecho de que la Torre Latinoamericana, de 44 pisos y construida en 1956, soportó sin daños el severo sismo de 1985, y que, la Torre

Mayor, un edificio moderno de 55 pisos que se inauguró en 2003, tiene 96 amortiguadores sísmicos en su estructura. Él resalta esta condición constructiva, diciendo que los autos circulando tienen una amortiguación de ~ 23%, pero que los edificios en cambio, solo tienen una amortiguación menor al 5% del crítico. Concluye diciendo que, “Si un auto se construye a prueba de vibraciones, ¿por qué no un edificio? Ésa es nuestra meta. El sismo es un enemigo serio, traicionero, pero puede ser vencido”.



Figura 34. Amortiguador en un edificio nuevo

La foto muestra uno de los amortiguadores empleados en la construcción de un edificio moderno. A diferencia de las ideas constructivas tradicionales, que privilegian cimentaciones rígidas, compactas y profundas, esta forma adiciona amortiguadores que le permitirán al edificio adecuarse a las tensiones que causan las vibraciones y aceleración sísmica. Son costosas y no sencillas de implementar en las proporciones, dimensiones y calidad de amortiguadores correctas, pero han mostrado su utilidad salvando muchas vidas en edificios que, de otro modo, tal vez hubieran colapsado con las personas dentro de ellas. Podría ser la medida ingenieril más apropiada para enfrentar los sismos, sobre todo en áreas de edificios de numerosos pisos, ahora que cada vez se requiere más de crecimientos urbanos verticales antes que horizontales, considerando, por ejemplo, a la metrópoli Lima - Callao, cuya gran extensión representa una severa condición que reduce la calidad de vida de sus pobladores y su productividad. *Fuente.*

<https://www.facebook.com/SomosHistoriaenfotos/posts/amortiguadores-s%C3%ADsmicosel-funcionamiento-de-estos-es-separar-la-base-de-la-edifi/2197587567060535/>

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y Diseño de Investigación

3.1.1. *Tipo de Investigación*

Sintetizando las opiniones de Solís E. 2008, Gay L.R., 1996, Rodríguez M.A., 1986, Sánchez C, Reyes Meza, 1984, Piscoya. 1982; Arista, 1984; Ander-Egge, 1974; Ñaupas et al, 2013; Esteban (2018), concluye que, “existen dos tipos de investigación: la básica, pura o fundamental y la aplicada, o tecnológica” (p.1). La investigación básica se dirige a generar conocimientos sin que necesariamente se busque obtener aplicaciones prácticas, las mismas que, en cambio, son el objetivo que orienta las investigaciones aplicadas. Es conveniente señalar que, las discusiones conceptuales sobre estos dos tipos de investigación, revelan que diferenciarlas en ambos tipos no se sustenta necesariamente en opiniones generales de consenso, sino que, por el contrario, y tal como resalta González (2004), citando a Gutiérrez (1984):

“De hecho el consenso parece estar más bien en que no debería existir tal división, puesto que toda investigación que se precie de ser científica requiere del uso de teorías y de ser al mismo tiempo aplicada o aplicable a la realidad”

Por el tema de investigación de esta tesis, y conforme a la clasificación de este tipo de trabajos y a los diversos conceptos existentes sobre el tema, el presente estudio es de tipo Básico – Aplicada, porque analiza la geografía del riesgo sísmico urbano en las ciudades de la Costa y Sierra, con el objeto de destacar la relevancia y utilidad del enfoque y perspectivas holísticas de la ciencia geográfica, para mejorar los procesos de evaluación y gestión del riesgo sísmico en las ciudades del país, en las regiones consideradas.

El análisis en la Geografía del Riesgo Sísmico se centra en las bases conceptuales de los peligros y vulnerabilidades existentes en las ciudades de la Costa y Sierra, examinadas desde un punto de vista integral, que comprende el análisis físico geográfico de cada ciudad y entorno afectados por los principales sismos habidos en el territorio nacional, proporcionando conclusiones de importancia para mejorar los niveles de evaluación y gestión del riesgo sísmico de las ciudades de la Costa y Sierra, en sus posibilidades de mejoras de calidad vida y desarrollo sostenible.

Sobre la evaluación y gestión del riesgo sísmico urbano, resulta valioso profundizar en la información obtenida a partir de los mismos sismos, que para el caso de esta tesis corresponden a los que tuvieron mayores repercusiones en materia de desastres ocurridos en el Perú, desde el año 1600 hasta el presente, analizados desde el punto de vista integral de la ciencia geográfica.

3.1.2. Diseño de Investigación

El tema de investigación es la geografía del riesgo sísmico en las ciudades de Costa y Sierra, en base a los mayores y más importantes sismos habidos en el país entre 1600 y el presente, por lo que se concibe como un “diseño”, que es parte del plan para absolver las interrogantes del estudio, los objetivos e hipótesis. El diseño aplicable es No Experimental, el mismo que según Hernández et al (2014, pág. 152), corresponde a “estudios que se realizan sin la manipulación deliberada de variables y en los que sólo se observan los fenómenos en su ambiente natural para analizarlos”. Es también de tipo transeccional descriptivo, que refiere a la descripción de incidencias de un evento o fenómeno sobre las variables de todo estudio; por último, es también retrospectivo, porque analiza sismos pasados, considerando los marcos geográficos propios de cada ciudad afectada en sus respectivos contextos históricos.

3.1.3. Nivel de Investigación

El nivel aplicable es el Descriptivo – Analítico. A este respecto, según Hernández et al. (2014, pág. 92) el nivel descriptivo “consiste en describir fenómenos, situaciones, contextos y sucesos; esto es, detallar cómo son y se manifiestan”. El nivel analítico busca conocer las relaciones de causa/efecto de los fenómenos. En este sentido, la presente investigación, describe cada evento sísmico considerado en la tesis, examinándolos entre los más importantes habidos en el país, analizando sus causas y consecuencias del momento, pero también las probables consecuencias que dichos sismos puedan ocasionar a futuro en los contextos urbanos cambiantes, tanto en el tiempo como en el espacio, esto es, por ejemplo, considerando los crecimientos poblacionales explosivos de las últimas décadas, de la mayoría de ciudades de la Costa, en contraste más bien con el decrecimiento poblacional de la mayoría de pequeñas ciudades de la Sierra.

Es decir, con el nivel descriptivo asumido en la tesis, se busca especificar las propiedades, características y perfiles de cada sismo y de cada ciudad, y en el nivel analítico, considerar las causalidades y efectos y las relaciones que genera cada evento sísmico en las particularidades de cada medio geográfico y regional.

3.1.4. Enfoque de la Investigación

El enfoque de la presente investigación es de tipo mixto, el cual, según Chen (2006), citado en Hernández et al. (2014, pág. 567), se define como,

“Integración sistemática de los métodos cuantitativo y cualitativo en un solo estudio con el fin de obtener una “fotografía” más completa del fenómeno, y señala que éstos pueden ser conjuntados de tal manera que las aproximaciones cuantitativa y cualitativa conserven sus estructuras y procedimientos originales”.

El análisis de los riesgos sísmicos urbanos en el país, desde el punto de vista cualitativo, está dado por la descripción e interpretación de información; y desde el punto de vista cuantitativo, por el análisis de datos desprendidos de la bibliografía, acerca de la ocurrencia de los sismos considerados en esta investigación.

3.2. Variable de investigación

La presente investigación trata sobre una única variable, que es la Geografía del Riesgo Sísmico existente en las ciudades de la Costa y Sierra del país, basándose en el análisis de los mayores sismos habidos desde el año 1600 hasta la actualidad, en el ámbito territorial de los departamentos de la Costa y Sierra occidental del país.

El CENEPRED (s.f., pág. 6) define al Riesgo de Desastres como: “la probabilidad de que la población y sus medios de vida, sufran daños y pérdidas a consecuencia de condición de vulnerabilidad y el impacto de un peligro”. Como se ha visto en la sección 2.2.1. La Geografía del Riesgo (pág.15), el riesgo (R), es resultado de multiplicar P (peligro o amenaza) por V (vulnerabilidad); estos dos elementos son las dimensiones que comprenden el Riesgo, en este caso, orientado al Riesgo Sísmico Urbano, de las ciudades de Costa y Sierra del país.

3.2.1. Matriz de Operacionalización de variables.

Cuadro 6. Matriz de Operacionalización de Variables

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Unidad de Medida / Escala
Geografía del riesgo sísmico de las ciudades de la Costa y Sierra	“Desde un punto de vista geográfico, riesgo es la situación concreta en el tiempo de un determinado grupo humano frente a las condiciones de su medio, en cuanto este grupo es capaz de aprovecharlas para su supervivencia, o incapaz de dominarlas a partir de determinados umbrales de variación de estas condiciones”. (Calvo, 1978) “El tema de los riesgos naturales tiene interés	La geografía del riesgo sísmico de las ciudades, se evaluaron analizando el peligro sísmico, y la vulnerabilidad sísmica de las ciudades de Costa y Sierra del país.	Peligro sísmico	- Magnitud	Escalas: M, ML, mb, MS, Md y Mw
				- Profundidad y Distancia al epicentro	Kilómetros (Km)
				- Aceleración sísmica	Gravedad (g – gal)
				- El Substrato Geológico (Resistencia de rocas)	Megapascal (MPa)
				- Tipos de suelos (suelos gruesos y finos, características de plasticidad y liquidez)	Sistema SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos)
				- Licuación y otros procesos (Deslizamientos de tierra, Dispersión lateral, Oscilación del suelo). - Caracteres geomorfológicos - Ocurrencia de Tsunamis	Las relativas a longitud, área, volumen, peso y tiempo.

	desde la perspectiva de la ordenación del territorio, ya que obliga, o debería obligar, a adaptaciones ante la repetición de los mismos" (Capel, 2010)		Vulnerabilidad sísmica	- Distancia a diversas fuentes de actividad sísmica	Kilómetros (Km)
				- Área urbana	Las relativas a áreas (Ha y Km ²)
				- Población estimada para sismos antiguos - Población total para sismos recientes	Número de habitantes
				- Diseño y caracteres constructivos - Condiciones socioeconómicas, históricas y políticas	Las relativas a longitud, área, tiempo y monetarias.

Fuente. Elaboración Propia.

3.3. Unidad de Análisis

La investigación tiene como unidad de análisis al territorio comprendido por las regiones de Costa y Sierra, que incluyen los sismos históricos más severos sufridos en el Perú (ver pág. 117, Mapa de Principales Sismos).

3.4. Población y Muestra

3.4.1. Población.

Está constituida por los mayores sismos ocurridos en el Perú desde el año 1600. (ver pág. 108, Sismos habidos en el Perú desde el Siglo XVI (> M:6.0).

3.4.2. Muestra

Se examinan los sismos más violentos e importantes habidos en el país desde 1600, que resultaron particularmente críticos y emblemáticos, especialmente en las ciudades, e incidir en la temática de la evaluación y gestión del riesgo sísmico urbano. (ver pág.102, Matriz de Instrumentos, Metodología, Muestra).

3.4.3. Selección de la Muestra / Muestreo

La selección de muestra es de tipo no probabilístico, método que es “una técnica de muestreo que no realiza procedimientos de selección al azar, sino que se basa en el juicio personal del investigador para realizar la selección de los elementos que pertenecerán a la muestra”. (Vásquez, 2017, pág. 9)

3.4.3.1. Matriz de Instrumentos.

Cuadro 7. Matriz de Instrumentos

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	METODOLOGÍA
Problema General ¿De qué manera influye la geografía del riesgo sísmico en las ciudades del Perú, considerando las características y consecuencias de los mayores sismos ocurridos en el país desde el año 1600 hasta la fecha?	Objetivo General Identificar las condiciones geográficas temporales y espaciales relacionadas con los peligros y vulnerabilidades, en las ciudades de la Costa y Sierra afectadas por los mayores sismos habidos en el territorio peruano desde el año 1600 a la fecha, con el objeto de demostrar la importancia de la Geografía del Riesgo como disciplina útil para la Evaluación y Gestión del Riesgo.	Hipótesis General La Geografía del Riesgo Sísmico es una disciplina de carácter integral que aporta significativamente en el tratamiento de la problemática sísmica nacional, particularmente en el de las ciudades de Costa y Sierra, que son las más amenazadas del país.	Tipo de Investigación: El tipo de investigación es básica o pura. Nivel de Investigación: El nivel de investigación es explicativo.

Problemas Específicos	Objetivos Específicos	Hipótesis Específicas	Diseño de la investigación:
PE1: ¿De qué modo influye el peligro sísmico en las ciudades de la Costa y Sierra del Perú, considerando como referentes a los mayores sismos ocurridos en el país desde el año 1600 hasta la fecha?	OE1: Examinar las características físico geográficas, que inciden decisivamente en el peligro sísmico de las ciudades de Costa y Sierra, afectadas por los mayores sismos habidos desde el año 1600 a la fecha.	HE1: Las condiciones físico geográficas inciden decisivamente en los peligros sísmicos que amenazan a las ciudades de Costa y Sierra, que son las más amenazadas por la actividad sísmica nacional.	El diseño de investigación es no experimental
	OE2: Examinar las características geográficas, temporales y espaciales, que inciden decisivamente en las vulnerabilidades sísmicas de las ciudades de Costa y Sierra, afectadas por los mayores sismos habidos desde el año 1600 a la fecha.	HE2: Las condiciones geográficas del momento inciden decisivamente en las vulnerabilidades sísmicas que afectan a las ciudades de Costa y Sierra, las más amenazadas por la actividad sísmica nacional.	Población: Los mayores sismos ocurridos en el Perú, desde el año 1600 hasta la actualidad.

PE2: ¿De qué modo influye la vulnerabilidad en las ciudades de la Costa y Sierra del Perú, considerando a los mayores sismos ocurridos en el país desde el año 1600 hasta la fecha? PE3: ¿Existen patrones geográficos regionales particulares que inciden decisivamente en el Riesgo Sísmico en las ciudades de Costa y Sierra?	OE3: Establecer las condiciones comparativas, globales y específicas de las geografías regionales propias de las ciudades de Costa y Sierra, bajo una perspectiva holística que integre el conocimiento del medio físico y socioeconómico.	HE3: Existen patrones de comportamiento y dinámicas sísmicas, particulares y más o menos propios en cada región geográfica del país, por lo que su adecuado conocimiento aporta significativamente al tratamiento de la problemática sísmica urbana en el país.	Muestra: - 1600, Moquegua - 1746, Lima - 1868, Arica (por entonces ciudad peruana) - 1912, Piura - 1940, Lima - 1946, Ancash - 1966, Lima - 1970, Ancash - 1974, Lima - 2001, Arequipa - 2007, Ica
--	--	---	--

Fuente. Elaboración propia

Si bien, este tipo de muestreo es considerado a veces como poco riguroso o carente de suficiente base teórica, en cambio, como señalan Scharager y Armijo (2001, pág. 1):

“Hay situaciones en que es más conveniente usar un muestreo no probabilístico, por ejemplo, cuando vamos a hacer estudios de casos, de poblaciones heterogéneas, o en estudios que son dirigidos a poblaciones y grupos muy específicos donde interesa una cuidadosa y controlada selección de sujetos con determinadas características”.

Dentro de la estructura del modelo no probabilístico de esta tesis, se ha preferido desarrollar el tipo de muestreo por juicio, el cual, según Vásquez (2017, pág. 11), “consiste en que los sujetos se seleccionan con base del conocimiento y juicio del investigador”; según esta autora, este método se recomienda utilizarlo “cuando el responsable de realizar el estudio conoce estudios anteriores similares o idénticos y sabe con exactitud que la muestra fue útil para el estudio”. En este sentido, la problemática de la Geografía del Riesgo Sísmico Urbano en el país, se sostiene también en el conocimiento acumulado en décadas de vivencias personales y profesionales del autor, con evaluaciones y recorridos en diversas ciudades del Perú.

El universo de la población a estudiar considera los sismos más severos (en cuanto a magnitud y/o intensidad) habidos en el Perú desde el año 1600, que son los siguientes: 1600, Moquegua; 1746, Lima; 1868, Arica (por entonces ciudad peruana); 1912, Piura; 1940, Lima; 1946, Ancash; 1966, Lima; 1970, Ancash; 1974, Lima; 2001, Arequipa, y 2007, Ica. Técnicas e Instrumentos de recolección de datos

3.4.4. Técnicas de Investigación

La técnica empleada en esta tesis está basada en la investigación documental, la cual como señala Arias-Odón (2016), citado en Arias-Odón (2023, pág. 12), está definida como:

“proceso dirigido a la búsqueda de nuevos conocimientos mediante la recuperación, análisis e interpretación de datos secundarios, es decir, los obtenidos y publicados por otros investigadores o instituciones científicas en fuentes documentales: impresas, audiovisuales o electrónicas”.

Esta técnica se aplica por la naturaleza transversal del tema referido al Riesgo Sísmico en las ciudades del país (Costa y Sierra), que involucra una gran amplitud de aspectos conceptuales y realidades heterogéneas en el tiempo y espacio. En este sentido, la tesis ha examinado una numerosa cantidad de textos, artículos y publicaciones relacionadas al tema, sin menoscabo de su antigüedad o fecha de publicación. Se tienen examinados documentos desde mediados del siglo pasado hasta la actualidad. A este respecto, cabe destacar la opinión del propio Arias-Odón (2023, pág. 16), que dice:

“la vigencia de un documento no se refiere a la actualidad o a una reciente publicación, sino a su trascendencia y aceptación sostenida en el tiempo por una comunidad científica, mientras sus contenidos no sean refutados o desplazados por nuevos y más relevantes conocimientos. Un documento publicado hace siglos puede seguir siendo vigente”.

También cabe incidir en que la investigación documental empleada parte de una revisión crítica, la misma que según Arias-Odón (2023, págs. 19-20) “se ocupa de examinar una o varias obras, así como la postura de distintos autores respecto a un tema específico, con la finalidad de evaluar la validez de los argumentos y la coherencia entre las ideas expresadas en el texto”.

3.4.5. Instrumentos de investigación

El instrumento básico de la investigación fue obtener una matriz bibliográfica acorde a la amplitud y transversalidad del tema. Esta matriz incluye textos, artículos y exposiciones en físico y digital, que tratan de la temática sísmica desde el punto vista de su origen y dinámica natural desde el año 1600.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS

Con lo expuesto en los capítulos anteriores, principalmente en el CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO, en esta sección se examinan los principales sismos habidos en el territorio nacional desde 1600 a la fecha. Se trata de examinarlos bajo una visión que abarque tanto su fenomenología natural en sus marcos físico geográficos propios, como los aspectos socioeconómicos y coyunturales que los rodearon, y que determinaron mucho de las severas consecuencias traídas a las poblaciones de las ciudades afectadas. En primer término, se examina el conjunto de los sismos habidos con magnitud mayor a 6.0, estableciendo conclusiones generales, y luego, se examina en cierto nivel de detalle, los principales sismos habidos, en función de su magnitud, pero principalmente en función de la gravedad con que produjeron muertes, heridos y pérdidas materiales y económicas y de deterioros sociales.

4.1. Los Sismos en el Perú, Caracteres y Efectos

El Cuadro 8, muestra la historia sísmica, más o menos referencial, habida desde el Siglo XVI, indicando aquellos sismos de magnitud calificada por sus autores (investigadores de reconocido prestigio en la especialidad) como superior a M: 6.0, presentándolos por departamentos, epicentros, profundidad en km, fecha y hora de ocurrencia. Sin embargo, la data obtenida y presentada por sus investigadores no está libre de controversia y diferencias significativas de valoración y ubicación, por lo que las conclusiones siempre se deben tomar como estimativas. De los 88 sismos indicados en el Cuadro 8, 44 son del Siglo XX y 29 del Siglo XXI (hasta 2016). Hay solo 15 sismos de los siglos anteriores, por la gran dificultad de identificarlos antiguamente. Es así que mientras más reciente es un sismo, lo más probable es que sus caracteres hayan sido mejor reconocidos, en tanto que, para los tiempos más antiguos su referencia sea menos precisa.

Cuadro 8. Sismos habidos en el Perú desde el Siglo XVI (> M:6.0)

Siglo	Departam.	Mag	Prof	Fecha	Hora	Lati.	Long.	Fuente
XVI-XVII	Moquegua	7.9	20	1600/02/19	16.00	16.70	71.70	Tavera et al. (2010d)
	Tacna	8.4	30	1604/11/24	18.30	17.88	70.94	Silgado (1985); Askew y Algermissen (1985); Dorbath et al. (1990)
	La Libertad	7.8	40	1619/02/14	16.30	08.90	79.30	Silgado (1983); Dorbath et al. (1990)
	Cusco	7.2	30	1650/03/31	13.50	13.50	71.70	Tavera et al. (2010d)
	Ica	7.8	15	1664/05/12	09.15	14.10	75.85	Dorbath et al. (1990)
	Huancavel.	6.0	20	1687/01/28	00.00	12.58	74.55	Tavera et al. (2010d)
	Lima	8.2	30	1687/10/20	09.15	11.35	78.20	Silgado (1983); Dorbath et al. (1990)
XVIII	Ancash	7.7	40	1725/01/07	04.15	09.20	79.30	Silgado (1985)
	Lima	8.4	30	1746/10/29	03.30	11.99	77.19	Silgado (1983); Dorbath et al. (1990); Beck y Nishenko (1990)
	Arequipa	8.0	30	1784/05/13	12.36	16.50	72.00	Silgado (1985); Askew y Algermissen (1985); Dorbath et al. (1990)
XIX	Arequipa	7.9	90	1821/07/10	13.00	16.10	72.96	Tavera et al. (2010d)
	Tacna	7.7	60	1833/09/18	10.45	18.25	71.00	Silgado (1985); Dorbath et al. (1990)
	Arica	8.6	25	1868/08/13	21.46	18.29	70.79	Silgado (1983); Kausel (1985); Askew y Algermissen (1985); Dorbath et al. (1990)
	Iquique	7.9	40	1877/05/10	01.28	18.33	71.18	Kausel (1985); Silgado (1985)
	Lima	7.7	70	1897/09/20	16.25	11.80	78.00	Tavera et al. (2010d)
XX	Lima	7.0	60	1904/03/04	10.17	12.00	76.95	Tavera et al. (2010d)
	Piura	8.0	30	1912/07/24	11.50	05.60	80.40	Sieberg (1930)
	Arequipa	7.0	30	1913/07/24	06.40	16.60	73.30	Dorbath et al. (1990)
	Arequipa	7.7	80	1913/08/06	22.14	15.80	73.50	Campbell (1913); Umlauff (1915); Dorbath et al. (1990)
	Apurimac	6.2	20	1913/11/04	21.33	14.20	72.90	Umlauff (1915)
	Amazonas	7.3	30	1928/05/14	22.14	05.00	78.00	Arrigoni (1928)
	La Libertad	6.7	60	1937/06/21	15.13	08.50	80.00	Tavera et al. (2010d)
	Arequipa	8.5	120	1939/10/11	14.51	15.30	72.20	Tavera et al. (2010d)

Siglo	Departam.	Mag	Prof	Fecha	Hora	Lati.	Long.	Fuente
	Lima	7.8	50	1940/05/24	16.34	10.50	77.00	Silgado (1978); Dorbath et al. (1990)
	Ica	8.4	70	1942/08/24	22.50	15.00	76.00	Silgado (1973)
	San Martín	6.1	15	1945/08/06	23.02	06.00	77.00	Silgado (1946)
	Pasco	6.7	120	1945/08/21	16.29	10.50	74.90	Tavera et al. (2010d)
	Ica	7.0	50	1946/09/30	00.59	14.00	76.50	Tavera et al. (2010d)
	Ancash	7.2	30	1946/11/10	17.42	8.30	77.80	Silgado (1951)
	Junín	7.5	60	1947/11/01	14.58	11.00	75.00	Silgado (1948)
	Moquegua	7.1	60	1948/05/11	08.55	17.50	71.00	Tavera et al. (2010d)
	Lima	6.7	55	1948/05/28	05.36	13.10	76.20	Silgado (1951)
	Cusco	6.0	15	1950/05/21	18.37	13.50	72.00	Ericksen et al. (1954)
	Ica	7.0	60	1950/12/10	02.50	14.25	75.75	Silgado (1952)
	Tumbes	7.7	30	1953/12/12	17.31	03.60	80.50	Silgado (1957)
	San Martín	6.6	100	1954/06/15	13.30	05.00	77.00	Tavera et al. (2010d)
	Arequipa	7.3	60	1958/01/15	19.14	16.50	72.00	Huaco et al (1978)
	Arequipa	7.5	63	1960/01/13	15.40	16.00	73.00	Huaco et al (1978)
	Ica	7.0	150	1960/01/15	09.30	15.00	75.00	Tavera et al. (2010d)
	Ancash	7.0	80	1963/09/24	16.30	10.60	78.00	Tavera et al. (2010d)
	Lima	7.5	38	1966/10/17	21.41	10.70	78.60	Lomnitz y Cabre (1968); Silgado (1977); Beck y Nishenko (1990)
	San Martín	7.0	28	1968/06/19	08.13	05.60	77.20	Hansen (1968); Kuroiwa y Deza (1968)
	Junín	6.2	43	1969/10/01	05.45	11.60	75.20	Deza (1971)
	Ancash	7.7	43	1970/05/31	20.23	09.20	78.80	Gajardo (1970); Silgado (1977)
	Tumbes	7.1	25	1970/12/10	04.34	04.00	80.70	Silgado (1978)
	Lima	6.6	98	1974/01/05	08.33	12.30	76040	Tavera et al. (2010d)
	Lima	7.8	13	1974/10/03	14.21	12.30	77.80	IGP (1974); Herrera y Giuliani (1975); Espinoza et al. (1977); Giesecke et al. (1980), Tavera (2020)
	Arequipa	6.9	41	1979/02/16	10.08	16.51	72.60	Orihuela (1981); SISAN (1984); SISRA (1985)

Siglo	Departam.	Mag	Prof	Fecha	Hora	Lati.	Long.	Fuente
	San Martín	6.1	26	1990/05/30	02.34	06.10	77.06	Huaco-P et al. (1990)
	San Martín	6.5	20	1991/07/23	04.19	05.81	76.86	Huaco-P et al. (1991)
	Tacna	6.3	124	1991/05/24	20.50	16.90	70.83	Tavera et al. (2014d)
	Loreto	6.4	110	1992/07/13	18.11	03.67	76.29	Tavera et al. (2014d)
	Lima	6.3	107	1993/04/18	09.16	11.65	76.84	Huaco P y Zamudio (1993)
	Ancash	6.5	54	1995/09/23	22.31	10.70	78.69	Tavera et al. (2014d)
	Ica	7.7	20	1996/11/12	16.59	15.21	75.93	Ocola et al. (1997); Chatelain et al. (1997)
	Loreto	7.0	110	1997/10/28	06.15	04.47	76.99	Tavera et al. (2014d)
	Cusco	6.4	38	1998/01/10	04.54	12.20	72.20	Tavera et al. (2014d)
	Ucayali	6.6	117	1998/04/03	22.01	07.97	74.01	Tavera et al. (2014d)
	Arequipa	6.3	94	1999/04/03	06.17	16.62	72.83	Tavera et al. (2014d)
XXI	Arequipa	8.2	30	2001/06/23	20.33	16.46	73.93	Kosaka et al. (2001); Tavera et al. (2002a)
	Arequipa	6.6	44	2001/07/07	13.53	16.32	74.01	Tavera et al. (2002b)
	Brasil	7.1	624	2003/06/20	06.19	07.80	71.20	Tavera et al. (2003a)
	Cajamarca	6.1	104	2005/04/11	14.54	07.45	77.62	Tavera et al. (2014d)
	Ecuador	6.3	50	2005/05/21	05.11	02.98	80.68	Tavera et al. (2014d)
	Loreto	7.5	118	2005/09/26	01.55	05.56	76.47	Tavera et al. (2005a)
	Arequipa	6.0	90	2006/09/30	16.26	15.63	73.37	Tavera et al. (2014d)
	Ica	6.7	28	2006/10/20	10.48	13.65	77.09	Tavera et al. (2006)
	Ica	6.0	45	2006/10/26	22.54	13.43	76.94	Tavera et al. (2014d)
	Lambayeque	6.0	19	2007/02/24	02.36	07.16	80.71	Tavera et al. (2014d)
	Ica	8.0	40	2007/08/15	23.40	13.54	76.89	Astroza (2007); Tavera y Bernal (2008a)
	Arequipa	6.2	117	2008/07/08	09.13	16.16	72.59	Tavera et al. (2014d)
	Tacna	6.2	36	2010/05/05	02.42	18.34	71.17	Tavera y Villegas (2010)
	Amazonas	6.0	121	2010/05/19	04.15	05.61	77.78	Tavera et al. (2014d)
	Ayacucho	6.1	110	2010/05/23	22.46	14.08	76.64	Tavera y Torres (2010)

Siglo	Departam.	Mag	Prof	Fecha	Hora	Lati.	Long.	Fuente
	Loreto	7.0	148	2011/08/24	17.46	07.56	74.75	Tavera et al. (2010c)
	Ica	6.7	35	2011/10/28	18.54	14.48	76.12	Tavera et al. (2011)
	Ica	6.3	49	2012/01/30	05.10	14.31	76.00	Tavera et al. (2012a)
	Tacna	6.1	98	2012/05/14	10.00	18.05	70.06	Tavera et al. (2012c)
	Arequipa	6.1	110	2012/06/07	16.03	15.98	72.75	Tavera et al. (2012d)
	Arequipa	7.0	31	2013/09/25	16.42	16.15	74.86	Tavera et al. (2013c)
	Ica	6.2	30	2014/03/15	08.59	14.42	76.99	Tavera et al. (2014d)
	Piura	6.2	38	2014/03/15	23.51	05.65	81.12	Tavera et al. (2014b)
	Ayacucho	6.8	108	2014/08/24	23.21	14.70	73.74	Tavera et al. (2014b)
	Ucayali	6.0	130	2014/10/26	10.45	10.57	74.24	Tavera et al. (2014d)
	Tacna	6.2	125	2015/03/23	04.51	18.76	69.75	Tavera et al. (2016b)
	Loreto	7.6	643	2015/11/24	22.45	10.59	71.67	Tavera y Fernández (2015)
	Loreto	6.1	119	2016/09/10	10.08	05.54	77.09	Tavera et al. (2016b)
	Puno	6.0	10	2016/12/01	22.40	15.43	70.93	Tavera et al. (2016c)

Fuente. (Tavera et al., 2016, págs. 17-22).

Muchas hipótesis y conclusiones pueden extraerse de la historia sísmica mostrada en el Cuadro, pero hay que considerar que los datos en muchos casos, son resultados de estimaciones muy complejas que solo pueden resultar referenciales, especialmente, cuanto más antiguos son. Los datos incluso, de los sismos más recientes y mejor instrumentalizados, siguen siendo revisados y reajustados por diversos investigadores. La Figura 35 muestra, por ejemplo, algunos datos sobre sismos, en una presentación pública del IGP a cargo de su presidente, Hernando Tavera (2020b) en la que se muestran y exponen datos parcialmente distintos a los que se muestran en el Cuadro 8, el mismo que proviene de un trabajo exhaustivo del IGP un poco anterior (2016) a la presentación pública del IGP en 2020. Algunas diferencias indicadas en dicha presentación ya se han incorporado al Cuadro.

Terremotos Costa Central

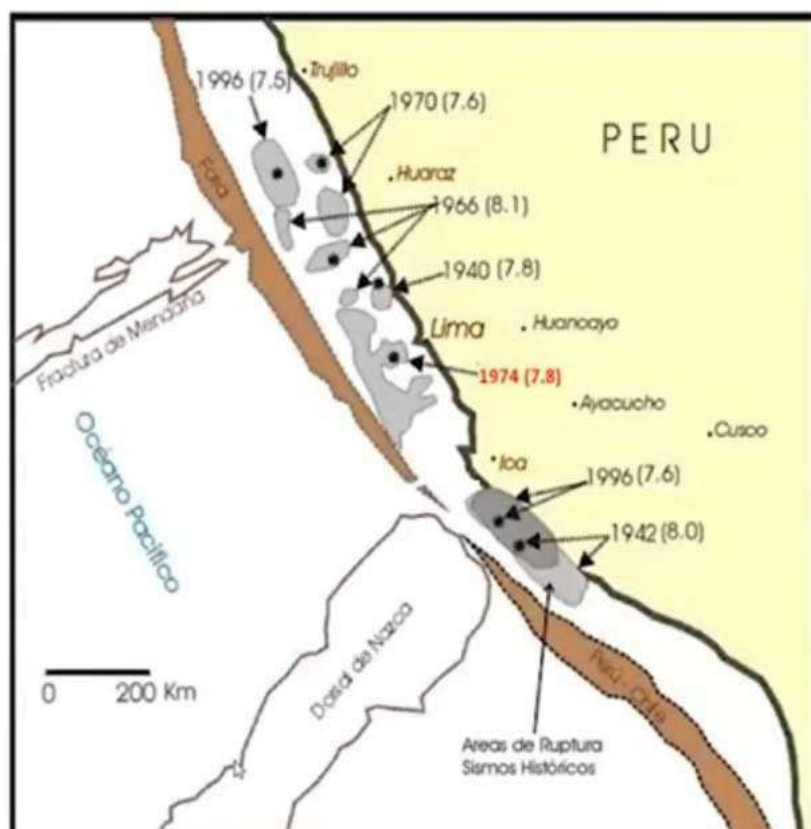


Figura 35. Ubicación de sismos en la Costa central

Algunos datos de la imagen modifican los datos originales del Cuadro 8.
Fuente. (IGP, Conferencia virtual “Terremoto de 1974: el sismo que cambió el rostro de Lima y el Callao”, 2020b), [vídeo] 34’30”

A continuación, se presentan las siguientes caracterizaciones y conclusiones respecto de lo que presenta el Cuadro 8.

1. De los 88 eventos incluidos en el Cuadro 8, 10 de ellos (~11%) tienen $M > 8.0$, es decir muy graves¹¹. Cinco sismos de estos ocurrieron entre los siglos XVI a XIX. Tres de ellos se documentan para el Siglo 20 y ya hubo dos en este primer cuarto del siglo actual. Se puede decir que hay una media cercana a un sismo muy grave/40 años. Sin embargo, hay una irregularidad marcada, que muestra sismos muy graves en corto lapso, concretamente los ocurridos en 1,939 ($M:8.5$, Arequipa), y el de 1942 ($M:8.4$, Ica), es decir en la Costa Sur y Central; ambos sismos muy potentes, aunque felizmente, no superficiales sino intermedios. Desde ese último año, no hubo otro sismo de $M>8.0$ en el país hasta el año 2001, en que en Arequipa sucedió el sismo marino de $M: 8.2$. Es decir, entre 1939 y 1942 (solo 4 años), hubo dos sismos muy graves de $M>8.0$, y desde entonces pasaron 59 años para que vuelva a ocurrir en el país otro de esa magnitud (Arequipa, 2001), y de este, solo 6 años para que ocurra otro de $M>8.0$ (Ica, 2007). Luego han pasado ya otros 18 años (hasta la fecha actual) sin que hayan ocurrido. Es decir, una marcada irregularidad, que es común en todo el mundo altamente sísmico.
2. Aún en los lapsos más prolongados sin sismos de $M>8.0$, ocurrieron diversos sismos de $M: 7.0 - 7.9$ y, teniendo en cuenta, además, que muchos datos son estimaciones o registros aproximados, es posible que la sistematización tenga márgenes de imprecisión. Por ejemplo, si bien los sismos de 1939 y 1942 en Arequipa e Ica, respectivamente fueron muy graves ($M: 8.5$ y 8.4), prácticamente extremos, en cambio su relativa profundidad, de 120 y 70 km respectivamente, contribuyó sin duda a una significativa reducción de la potencia con que golpearon las regiones afectadas. En sentido contrario, se puede decir lo mismo de sismos, como el de Lima de 1974, de $M: 7.8$ y solo 13 km de profundidad, que más bien acrecienta la severidad de ese sismo.

¹¹ El concepto de muy graves o graves para los sismos se mencionan según los clasifican Keller & Blodgett (2007), ver pág. 39.

3. El Cuadro 8 muestra que hasta 2016, todos los departamentos del país (salvo Huánuco), sufrieron sismos mayores a M:6.0; Puno solo muestra un evento, justamente de M: 6.0. Arequipa prevalece ampliamente como el departamento más sísmico con 14 eventos mayores a M:6.0, de los cuales 3 son mayores a M:8.0; sigue Ica con 12 eventos, de los cuales 2, son mayores a M:8.0, y luego Lima, con 12 eventos, de los cuales, 2 son mayores a M:8.0. Piura, solo registra 2 eventos, pero 1 de ellos de M: 8.0, en 1912. Hay muy poca información sobre este sismo y tal vez no haya tenido la magnitud señalada.
4. De lo expuesto, se puede reconocer una clara mayor frecuencia de sismos, y más violentos, para las regiones sur occidental y centro occidental del país (de Tacna a Lima). Hacia el norte la frecuencia y potencia de las rupturas sísmicas muestra un claro decrecimiento. Investigaciones recientes, como el realizado por Wiemer y Zúñiga (1994), citado en (INDECI, 2017, págs. 4-7), que demostraría la existencia de zonas de fuertes “asperezas” corticales en la Costa centro y sur (ver págs. 86-88), que apoya fuertemente esta hipótesis. Sin embargo, el período muestral es de solo 500 años, y esto no permite ser del todo concluyente, para una fenomenología que requiere conocer una historia sísmica mucho más amplia, lo cual es obviamente imposible.
5. Respecto a la alta sismicidad de Arequipa (tradicional creencia reflejada en el dicho de “Arequipa, Tierra de Terremotos”), lo más probable es que se deba a la mayor extensión de Costa que tiene este departamento (450 km de litoral), frente a la que tienen los otros, como Ica (que le sigue en actividad sísmica) con 300 km, y Lima, con 370 km. Siguen, Piura, con 270 km; La Libertad, con 230 km; Ancash, con 200 km; Lambayeque, con 135 km; Tumbes, con 120 km; Tacna, con 100 km, y Moquegua, con solo 75 km. Es decir, la Costa del departamento de Arequipa es tan extensa, que hace un frente a la convergencia de placas, tres veces más extenso que el que tienen en conjunto los departamentos de Moquegua y Tacna.
6. La profundidad de los sismos habidos en el Perú, van de superficiales a moderadamente profundos, (hipocentros ocurridos desde 10 km a 148

km, con un rango mayoritario por debajo de 60 km; es decir, superficiales). En todo el registro, hay solo dos sismos profundos ocurridos en 2003, cuya profundidad fue de 624 km (M:7.1) y en 2015 (M:7.6), con una profundidad de 643 km; el primero ocurrido en Brasil (cerca del límite con Loreto, y el segundo en Perú, cerca de la frontera con Brasil). Son sismos fuertes en la Selva baja, pero poco peligrosos debido a su profundidad.

7. Por el contrario, sismos no tan violentos, como el habido en Puno (2016, M: 6.0), a solo 10 km de profundidad, en San Martín, en 1945, a 15 km de profundidad (M:6.1), o en Lima, en 1974, ya severo (M: 7.8), a solo 13 km de profundidad, acrecientan su peligrosidad y, por tanto, sus efectos, sobre todo en zonas accidentadas como las fuertes pendientes de sus cordilleras o en zonas de suelos de baja calidad geotécnica. Cabe destacar la gran peligrosidad de sismos muy severos y además, superficiales; como el de 1868 en Arica, con una M:8.6, el más violento registrado en el territorio peruano en el lapso considerado, ocurrido a solo 25 km de profundidad, que además de las inmensas pérdidas de vidas y daños materiales que causó en la región, trajo luego uno de los maremotos más violentos que prácticamente barrió con lo que quedaba de la destruida ciudad de Arica inmediatamente concluido el sismo
8. La hora de ocurrencia de un sismo (parámetro indistinto respecto de su magnitud y violencia), es en cambio, muy importante por sus peligrosos efectos, asumiéndose, que un sismo severo, que ocurre en altas horas de la noche, cuando la población descansa en sus viviendas, es más catastrófico que si ocurriera en horas diurnas en que la población está despierta. Esto no es general, pero sí un elemento muchas veces decisivo. A modo de ejemplo, cabe mencionar los sismos nocturnos de Lima (1746) y Arica (1868), los dos generadores de tsunamis subsiguientes, en los que la hora de ocurrencia nocturna tuvo mucho que ver en los niveles de catástrofe, particularmente, en lo que concierne a la llegada de las grandes olas que barrieron a estas ciudades litorales en la noche, que ya estaban sumamente castigadas por los sismos previos.

Los sismos de los siglos pasados se dieron en condiciones muy diferentes a la actual, con actividades socioeconómicas más reducidas, escasa población, ciudades pequeñas o muy pequeñas y aislamiento entre ellas; baja productividad, servicios de salud y sanidad apenas incipientes, entre muchos otros aspectos tan distintos de la actualidad. Aun así, algunos de estos sismos, los más potentes y ocurridos sobre zonas más pobladas o relevantes para las sociedades de entonces, dejaron secuelas por muchos años y también enseñanzas útiles para la sociedad actual. Los sismos de la primera mitad del Siglo XX, son un poco transicionales a la vida moderna, y hasta estos años, los sismos se documentaban únicamente por referencias verbales y empíricas. Es solo desde esos años que aparecen los registros instrumentales y, por lo tanto, los sismos empiezan a ser mejor estudiados y conocidos. Por otra parte, desde mediados del siglo pasado, el transporte y los intercambios poblacionales crecieron; la urbe limeña empezó su crecimiento poblacional explosivo, y otras ciudades del país también alcanzaron alguna condición de urbes medianas. La realidad del país cambió mucho desde finales del siglo pasado, por lo que los últimos terremotos tienen caracteres y consecuencias también diferentes.

Como es natural, la veracidad y rigurosidad de las fuentes consultadas para el análisis geográfico de los sismos ocurridos, es menos numerosa y confiable cuanto más antiguo y alejado de las mayores ciudades fue el evento. Obviamente, a medida que los sismos ocurridos son más recientes, las fuentes son más numerosas, ha habido ya registros instrumentales y, en general, se puede decir que resultan más confiables.

A continuación, se presenta una breve descripción de los principales sismos considerados en esta tesis, empezando desde los más antiguos y continuando en orden cronológico, con énfasis en los de mayor tragedia y trascendencia, en el corto y mediano plazo. La Figura 36, presenta los sismos que se examinan en menor medida en este trabajo; en general se aprecia que la mayoría ocurre en la Costa o en el mar y, principalmente en la zona central y sur. La Sierra, y más aún, la Selva tienen menos sismos.



Figura 36. Mapa de Principales Sismos

El mapa presenta los principales sismos habidos en el país desde el año 1600 a la fecha, representados por círculos. Los de mayor tamaño son sismos de magnitud 8.0 a más, y los pequeños, son sismos de 7.0 a 7.9. Asimismo, los círculos de color rojo son superficiales (0 a 59 km) y los de color verde son de profundidad intermedia (mayores a 60 km). *Fuente.* Elaboración propia, en base a información adaptada de (Tavera et al., 2016, págs. 17-22) y presentaciones públicas del IGP

4.1.1. El Sismo y Erupción Volcánica de 1600 en Moquegua

El 19 de febrero de 1600, en pleno verano y meses de lluvias, en la Sierra alta de Moquegua, se produjo una gigantesca erupción del volcán Huaynaputina, que provocó a la vez un sismo de M: 7.9 y de profundidad superficial de 20 km (valores estimados e indicados en el Cuadro 8), por (Tavera et al., 2016). Sobre este enorme evento, Thouret et al. (1997, págs. 931-938), señalan que la erupción habida tuvo un IEV de 6¹².

La erupción del Huaynaputina de 1600 fue mil veces más potente que la erupción del nevado El Ruiz (1985, Colombia), que mató a ~ 25,000 personas, y fue de ligera menor potencia a la de la famosa erupción del volcán Krakatoa (1883, Indonesia), que se considera la mayor de la historia mundial, que causó ~ 40,000 muertes por los grandes tsunamis que ocasionó. La erupción del Krakatoa produjo en los años siguientes prolongados cambios en el clima y ecología mundiales.

La erupción del Huaynaputina produjo la muerte de más de 1,600 personas, en un siglo en que la región estaba poco poblada (Aun actualmente, las zonas volcánicas altas de Moquegua y Tacna son poco pobladas por su severa sequedad y frialdad climática, que hacen de estas tierras poco productivas). Según Thouret et al. (1997). la erupción produjo una emisión de 8 km³ de tefra¹³ ardiente (frente a los 10 km³ estimados del cataclismo mundial del Krakatoa). Estos 8 km³ de tefra se depositaron en un área de 85,000 km² (~ 7% del territorio nacional). Actualmente mucha de la tefra de entonces se observa depositada en las altiplanicies del sur, en los flancos andinos occidentales, y en las pampas costeras, como Majes, La Joya, Clesesí y otras, donde las acumulaciones eólicas y pequeñas dunas que avanzan por su superficie, están formadas en gran parte por las cenizas expulsadas por

¹² La violencia de la actividad volcánica se mide por su IEV (Índice de Explosividad Volcánica), en escala de 0 a 8, donde a partir de 5, se considera “Muy Grande” o “Catastrófica” (Carenas et al., 2014, pág. 186).

¹³ Sobre este término, Carenas et al. (2014, pág. 184), lo definen como el conjunto de materiales volcánicos, piroclastos de diverso tamaño, que son arrojados por las erupciones, siendo de menor a mayor: ceniza (< 2mm); lapilli (2 a 64 mm); y bloques y bombas (> 64 mm).

esta erupción. El suelo de estas áreas comprende también mucho del lapilli, bloques y bombas de esta erupción, como de otras habidas durante el Holoceno y Pleistoceno superior.

Similarmente a los enormes efectos mundiales que provocó la erupción del Krakatoa, el Huaynaputina generó también cambios climáticos globales muy sentidos, especialmente en el hemisferio Norte. Ciertamente, desde entonces, los volcanes del Sur del Perú no han tenido actividad tan notorias y violentas, sino solamente erupciones leves a moderadas, en lapsos de tiempo bastante amplios y esporádicos; pero, nada puede descartar erupciones similarmente violentas, en cualquiera de los siete volcanes activos del Sur del país.

En muchos países y regiones (Filipinas, Hawai, sudeste asiático, Italia, Islandia, México, Ecuador, Guatemala y otros), el volcanismo es parte del imaginario social de su población por los potenciales desastres y temor que allí genera. En el Perú, este imaginario casi no existe, o está solo muy concentrado en parte de la población de la Sierra suroccidental, la cual, con excepción de la ciudad de Arequipa, tiene una población no muy numerosa y pequeñas ciudades dispersas. También, en cierto modo, el casi ausente imaginario volcánico nacional, obedece en gran medida a la visión centralista del país (en la cual, solo los pobladores de Arequipa, Moquegua y Tacna, que tienen a la vista a sus grandes volcanes con sus eventuales fumarolas), y la ausencia en los últimos 100 años, de grandes manifestaciones volcánicas, hacen que en el país la actividad volcánica – sísmica sea apenas reconocida como un riesgo muy puntual y poco considerado.

El sismo de M: 7.9 generado por la erupción, no es el tipo característico de regiones no volcánicas, sino que las violentas sacudidas del terreno, se deben básicamente a las erupciones y expulsiones de coladas y tefras, en acciones que no son únicas ni casi instantáneas, como sí lo son los movimientos sísmicos generados por las rupturas de fallas en el interior de la corteza. Los sismos de volcanismo ocurren en fases sucesivas que pueden tomar minutos u horas y uno o varios días. Pero, si tiene en común que esta actividad volcánica – sísmica tiene su origen en el mismo proceso de la subducción de la placa Nazca bajo la Sudamericana, generadora de la mayor actividad

sísmica nacional. (Figura 4, pág. 23). La Figura 37, tomada de Thouret et al., (1997, pág. 933), muestra el ámbito geográfico de la erupción y algunos de sus efectos. El rectángulo de esta área se reproduce aproximadamente en la imagen Google Earth en la Figura 38.

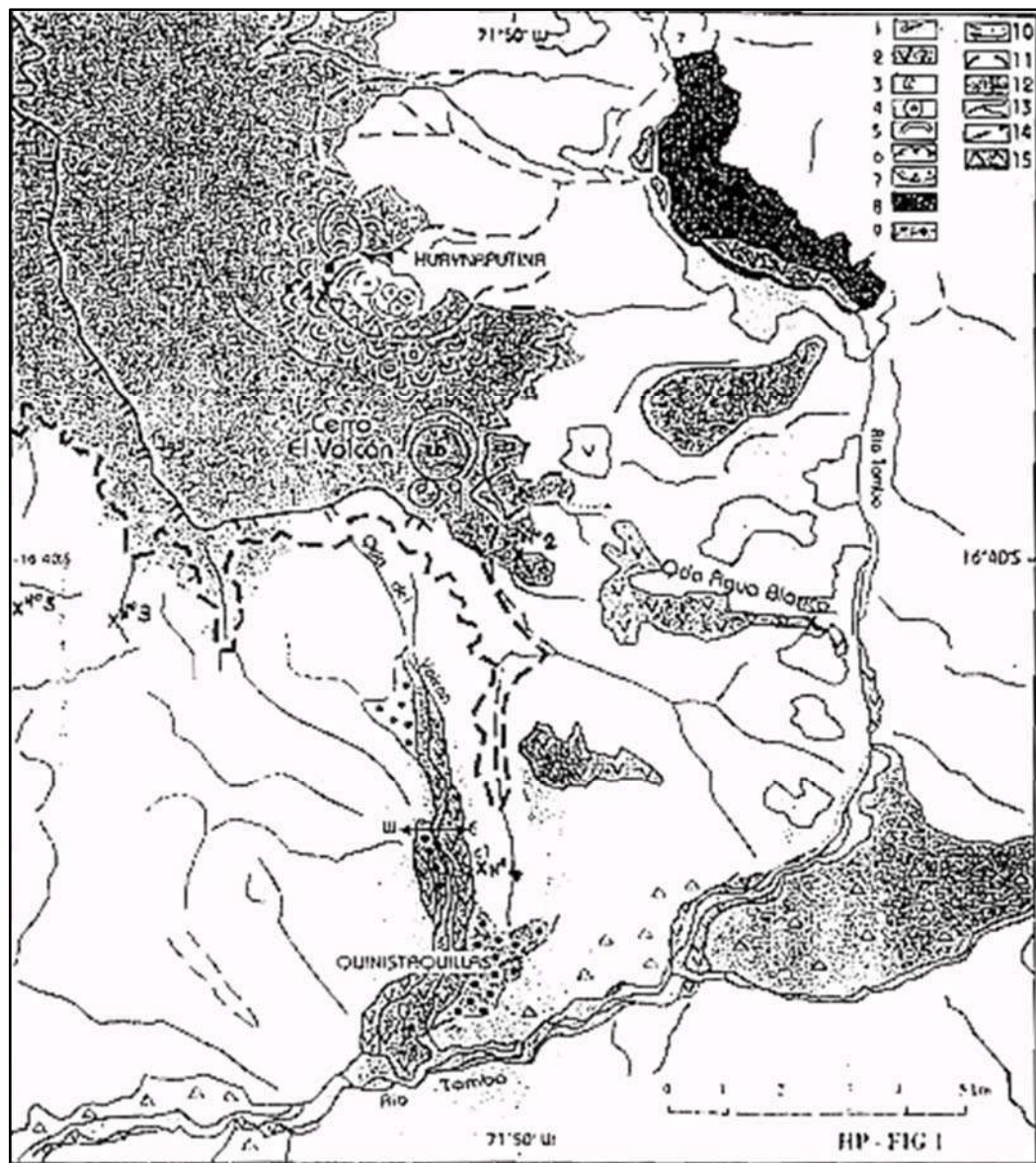


Figura 37. Esquema de la erupción del volcán Huaynaputina (1600)

La Figura muestra detalles geológico – geomorfológicos de la erupción del Huaynaputina en 1600. Elaborada por sus autores con una imagen satelital SPOT de 1991. El volcán está situado al norte de otro volcán ("Cerro El Volcán). Abajo a la derecha se tiene una escala en línea de 5 segmentos de 1 km de longitud cada uno, por lo que, se tiene un rectángulo evaluado de aproximadamente 450 km², es decir, unos 45,000 ha (cifra obtenida por el suscrito en Google Earth, al transponer la carta esquemática). La Figura 38 presenta el área en imagen satelital. Fuente. (Thouret et al., 1997, pág. 933)



Figura 38. Área geográfica del volcán Huaynaputina

El volcán Huaynaputina queda en la meseta (tono gris cenizo de la parte superior), de la cual descienden pequeñas cuencas hidrográficas hacia el río Tambo. La meseta y zonas altas cordilleranas son algo lluviosas pero muy frías, y sostienen una escasa población de ganaderos. Por debajo hay grandes montañas de topografía abrupta y clima casi árido, donde solo unos pocos fondos de valles (Quinitaquillas, Omate, en tono casi negro) tienen las poblaciones más importantes. Las limitaciones climáticas y topográficas definen un medio de baja densidad poblacional. Quinistaquillas está directamente amenazada por flujos de lahares del volcán; Omate (capital provincial), a 2,100 msnm y de solo unos 4,000 habitantes, está menos amenazada por lahares, pero sí por “lluvias” de cenizas. *Fuente.* J. Osejo (2025) sobre una imagen Google Earth.

Entre los diversos detalles identificados por Thouret et al. (1997), en lo que sería la Geografía del Sismo, en la Figura 37, cabe destacar en primer término los voluminosos depósitos piroclásticos ricos en piedra pómez, que bordean al Huaynaputina y Cerro El Volcán al noreste (en gris medio), formando una

extensa altiplanicie ondulada y de colinas situadas entre 4,400 y 4,900 mnsnm, que incluyen pequeños tramados en semicírculos (Nº 3, de la leyenda), que representan megadunas de depósitos y, en círculos con punto central (Nº 4), erupciones habidas entre 1600 y 1667. En la imagen satelital de la Figura 38, esta zona se aprecia en tono gris medio muy homogéneo, que revela una zona sin mayores irregularidades topográficas o suavizadas por las acumulaciones de cenizas.

Una línea continua delgada bajo el Cerro El Volcán, en el mapa de la Figura 37, señala el límite de los paquetes de ignimbritas y lavas cuaternarias de la alta meseta, mientras que más abajo, la línea gruesa y discontinua señala una gran cicatriz semicircular generada por antiguos deslizamientos de masa, que en la imagen satelital de la Figura 38 se ven como grandes descensos montañosos abruptos.

Al sur del mapa, en Quinistaquillas, en tramado de puntos y matices grises, se indican bloques de piroclastos y cenizas que han rellenado el valle de la quebrada del Volcán (entre 2,000 - 1,800 msnm), que han llegado hasta su desembocadura en el río Tambo, a 1,550 msnm. Aguas arriba de este valle, el río Tambo forma una extensa acumulación de valle, formada por depósitos de avalanchas (lahares) provenientes de erupciones del volcán Ticsani. Acumulaciones similares se emplazaron también en laderas y quebradas tributarias (como Agua Blanca y otras). El río Tambo presenta también al norte, una extensa acumulación de lahares y derrubios anteriores a la erupción del año 1600. En la imagen Google Earth (Figura 38), el valle de Quinistaquillas se aprecia en tono netamente oscuro, revelando una fuerte presencia agrícola, mientras que, en los otros depósitos de valle, que son también terrenos agrícolas, la densidad de cultivos es más abierta.

La geografía sísmica de esta zona, presenta una cierta lejanía del frente de convergencia de placas submarino, de 100 – 150 km, distancia que modera un tanto los efectos de los grandes sismos costeros, pero no así el de las actividades esporádicas de los volcanes, que afectan directamente a la Sierra suroccidental (Arequipa, Moquegua y Tacna). En esta región, los sismos inciden sobre extensas altiplanicies, grandes laderas montañosas, y estrechos

valles profundos que descienden abruptamente a las grandes llanuras de la Costa. Las altiplanicies se distribuyen entre 3,800 a 5,000 msnm; las laderas montañosas que encierran pequeños valles, tienen pendientes muy pronunciadas y 2 a 3 km de desnivel entre cumbres y bases de las laderas.

El altiplano consta de terrenos llanos a ligeramente ondulados con colinas un tanto dispersas, y en menor proporción elevados cerros y conos volcánicos de pendientes pronunciadas. Es decir, la zona alta tiene una topografía favorable a la ocupación humana, pero su clima, propiamente periglaciario, es muy desfavorable por ser muy frígido y de escasas lluvias distribuidas en una corta estación lluviosa. Todo el año hay temperaturas nocturnas negativas, y en invierno con frecuencia alcanzan entre -15 y -25°C. La precipitación total anual bordea en promedio solo 300 a 400 mm. La frialdad y sequedad climáticas resultan muy restrictivas a la productividad de la tierra, salvo para la minería y para la actividad ganadera extensiva basada en las pobres pasturas naturales de la puna de esta región, siendo esta la razón de un escaso poblamiento, de caseríos y pequeños poblados dispersos, y de campamentos e instalaciones mineras; sin embargo, desde hace unos 20 años, el turismo se está constituyendo en una fuente de actividad y poblamiento relativamente importante, que intenta aprovechar los paisajes volcánicos y fuentes termales.

Las grandes laderas montañosas que descienden de las altiplanicies, tienen un régimen térmico más moderado; así, entre 3,700 y 3,100 msnm las temperaturas negativas durante el año son pocas y de baja intensidad, y casi inexistentes bajo esta altitud. Por encima de 3,400 – 3,500 msnm el volumen de lluvias es similar a las del altiplano, pero hacia abajo se van haciendo muy escasas rápidamente. En Arequipa, a 2,500 – 2,600 de altitud, la lluvia anual fluctúa entre solo 100 a 200 mm y, a 2,000 msnm el clima es ya desértico. Por las condiciones térmicas más favorables, la zona entre 2,500 y 3,800 msnm es la que concentra la actividad agrícola y mayor población urbana y rural en las laderas y valles. Pero la sequedad climática, cada vez más acentuada hacia abajo, y las muy pronunciadas pendientes, limitan el poblamiento de estas áreas, no habiendo en la actualidad poblados o pequeñas ciudades de

más de 10,000 o 15,000 habitantes, como si hay en otras regiones andinas de las mismas altitudes, pero más lluviosas.

Debe decirse, finalmente, que la sequedad climática de las altiplanicies, laderas montañosas y valles andinos suroccidentales, conformadas en su gran mayoría por material volcánico, es una condición que favorece la estabilidad sísmica de los suelos, los cuales muy pocas veces son plásticos; siendo en gran parte formaciones rocosas poco meteorizadas (lo que las hace más resistentes), y donde, al ser las lluvias poco abundantes, estas tampoco favorecen la ocurrencia de movimientos de masa en las laderas por la escasa infiltración. Si bien los movimientos de masa son fenómenos también presentes con o sin sismos, debido a las fuertes pendientes y magnitudes de los desniveles, los riesgos por estos movimientos se atenúan en esta región, justamente por la sequedad climática y dominante compacidad de las formaciones rocosas, así como por la baja densidad de la población.

No obstante, hay años de veranos regularmente lluviosos, en los que la coincidencia con sismos severos (sean producidos por los volcanes o por fricciones de la convergencia), pueden provocar que los movimientos de masa generen situaciones críticas, tal como sucedió en los terremotos asociados a esta erupción del Huaynaputina, como la que indica Silgado (1978, pág. 19) cuando dice: “El río Tambo quedó represado por los torrentes escombros y lavas, la rotura posterior de ese dique terminó por asolar ese valle”¹⁴.

¹⁴ En realidad, los valles interandinos (como todo valle entre grandes montañas), está sujeto a eventuales movimientos de masa, a consecuencia de sus grandes desniveles (llamada al vacío) y fuertes pendientes. Estas ocurrencias se agravan con la abundancia de depósitos de material suelto, plasticidad de los depósitos, masas rocosas poco compactas, fallas y pliegues complejos, períodos lluviosos y sismos. En el sur andino (zona del Huaynaputina), si bien es una sierra poco lluviosa, el sismo ocurrió justamente en los cortos meses más lluviosos del año, y en las fuertes pendientes del área, la escorrentía de la lluvia debió arrastrar las voluminosas masas de tefras sueltas eyectadas por la erupción.

4.1.2. El Sismo y Tsunami de Lima de 1746

A las 10.30 de la noche del 28 de octubre de 1746, ocurrió un terremoto en Lima, que ha sido probablemente el más violento que haya sufrido el país en los últimos cinco siglos. Todas las referencias de la época señalan que tuvo una duración de varios minutos catastróficos, destruyó gran parte de la ciudad de Lima, que por entonces era una de las mayores urbes en los tiempos imperiales europeos en el nuevo mundo. En el Cuadro 8 (pág. 108), tomado del estudio de Tavera et al. (2016), se le asigna una magnitud ~ 8.4 , y superficial (~ 30 km), cuyo epicentro se fija bajo el mar, frente al Callao. Casi no dejó edificaciones en pie o condiciones habitables en la gran ciudad, pero también en las pequeñas poblaciones de la Costa y sierra central. Además del destructivo sismo, este causó un devastador tsunami, que finalmente provocó la mayor tragedia en el territorio peruano antes del Siglo XX, que en su época fue motivo de asombro entre los imperios coloniales de todo el mundo.

4.1.2.1. El Terremoto

Para describir lo acontecido en este terremoto se debe recurrir a cronistas y personas de la época. Sus relatos son controversiales, pero, aun así, muy importantes porque revelan mucho de la situación habida, las cuantiosas pérdidas de vidas, daños y secuelas sociales y económicas que se prolongaron por décadas. El Diario “El Comercio”, en su suplemento El Dominical del 27 de marzo de 2011, destaca que, el entonces virrey Manso de Velasco, contaba en su “Relación”, que Lima era “un lugar de espanto, a la manera que suelen verse en una guerra los lugares cuando entra el enemigo a sangre y fuego, y convierte en montones de tierra y piedras los más hermosos edificios”. Este dominical, describe que el cronista José del Llano Zapata, decía que “Lima no podría ser reconstruida en dos siglos ni con doscientos millones de pesos. De sus 3,000 casas, distribuidas en 150 manzanas, solo unas 25 habrían quedado en pie”.

Hay que decir que Lima de entonces, desde la ínfima dimensión que tuvo en su fundación, hasta los dos siglos después en que ocurrió este sismo, había alcanzado un nivel de desarrollo y magnitud notables para la época. Así, el Padre Lozano (citado en: Giesecke y Silgado, 1981, pág. 23), transcrito a su vez por García (1997, pág. 9), escribía poco antes de que ocurriera el sismo:

“la ciudad había llegado al punto de perfección de lo que era capaz una ciudad de este Nuevo Mundo, por la suntuosidad de sus edificios, las viviendas que adornaban sus bien regladas calles, sus vistosas fuentes, la elevación de sus templos, y la construcción de los monasterios, los cuales podían competir con las más grandes fábricas de este género en el mundo”.

Desde un punto de vista sísmico, es importante destacar que como dice García (1997, pág. 10), muchas de las viviendas limeñas habían incorporado la quincha como material de construcción, al ser más liviana que el adobe, que había demostrado ya su mala calidad frente a sismos pasados, como el que hubo la tarde del 20 de octubre de 1687, del que Silgado (1983) y Dorbath et al. (1990), citados en el Cuadro 8, le asignan una magnitud de 8.2; lo ubican también como submarino, cercano a Lima, y superficial.

García (1997, págs. 52-58), destaca un hecho habido a raíz del sismo que, si bien no se concretó, hubiera representado desde la Colonia, el primer avance serio en la construcción de viviendas frente a sismos. Refiere a que el virrey Manso de Velasco, al año de ocurrido el sismo (1747), dio una ordenanza por la cual, en consideración al riesgoso comportamiento sísmico limeño, se debía eliminar o destruir todas las partes altas de las edificaciones, incluyendo habitaciones, cúpulas, tejados y balcones, porque las edificaciones bajas y techos livianos evitarían en gran medida las catástrofes vividas. Pero, como señala esta investigadora, la nobleza limeña se opuso férreamente a esta ordenanza con argumentos hoy banales, pero que en la época tenían sustento en la realeza española y criolla, como acusar al virrey Manso de pretender semejarse al emperador Nerón, quien en la antigua Roma ordenó incendiar la ciudad para construir una a su medida; se acusaba al Virrey de querer hacer lo mismo, aprovechando que el sismo había arrasado la capital del virreynato.

Argumentaban también, que una ciudad de un solo piso, sin balcones ni altas edificaciones se parecería a las ciudades indígenas, pudiendo ser insultante a la corona del imperio español. El Virrey tuvo que dar marcha atrás en este primer intento de crear ciudades asísmicas.

En su Artículo, García (1997, pág. 10) también destaca el papel de las epidemias causadas por la contaminación orgánica (miles de cadáveres de hombres y animales expuestos entre los escombros), y falta de personal que los entierre adecuadamente y la destrucción de las fuentes de agua y canales; es decir la casi total ausencia de agua en condiciones más o menos salubres, la hambruna generalizada y posterior desnutrición. Pérez-Mallaina (2005, pág. 48), destaca la severa destrucción del sistema hospitalario, a la vez que la total falta de empatía de las clases pudientes, militares, burocracia y alta jerarquía eclesiástica con los pobladores más pobres. Señala también, que los impuestos recaudados para la reconstrucción se dirigieron hacia España, por entonces muy necesitada de fondos por su guerra con Inglaterra, en tanto que los pudientes de Lima hicieron lo mismo para reconstruir sus mansiones e iglesias. El Dominical de El Comercio del 27 de marzo del 2011, refiere que los cronistas relataban que en Lima no había alimentos porque

“los almacenes de la Costa habían sido devastados... que el virrey Manso de Velasco, temeroso del desorden de la plebe, ordenó disparar y ahorcar a los saqueadores... Que los códigos sociales que regían la ciudad se habían roto y que ya no se podía distinguir entre ricos y pobres, pues todos andaban en harapos y hambrientos”.

Respecto a las condiciones físico geográficas del sismo de 1746, cabe decir que, hasta las primeras décadas del Siglo XX, la ciudad estaba emplazada casi totalmente en una parte céntrica del abanico aluvial del río Rímac (a orillas del mismo), cuyos suelos desde el punto de vista geotécnico son en su mayoría, de los mejores de la llanura. No había viviendas en los cerros que bordean el actual centro de Lima, y sin habitantes que ocupen los actuales distritos de suelos arenosos del norte y sur de la ciudad, salvo pequeñas viviendas dispersas en las zonas cultivadas próximas a los ríos Chillón y Lurín. La ciudad amurallada de entonces se muestra en la Figura 39. La enorme

de la destruida ciudad, afrontó un clima un tanto favorable para la población sobreviviente, aminorando las condiciones de proliferación de enfermedades respiratorias propias del invierno y las enfermedades propias del verano.

Pérez-Mallaina (2005, pág. 48), describe que la ciudad de Lima y el Callao con sus barrios periféricos, aglomeraban un aproximado total de 65,000 habitantes (elevada población urbana en el mundo para esos siglos) que, por lo tanto, las muertes estimadas en ~ 6,000 habitantes, implican 8 a 9% de la población total. Si se hiciera una semejanza de este orden con la Lima y Callao actual, implicaría casi 1 millón de habitantes fallecidos.

Esquivel y Navia, 1980, p. 358, citados por O’Phelan (2022, pág. 16) señala que, según versiones de entonces, las secuelas del sismo se sintieron hasta Trujillo por el norte y hasta Ica en el sur. Que la destrucción habida en Lima, fue casi la misma en los pequeños poblados del norte chico: “quedaron destruidas Chancay, Huaura, además de los valles de Barranca, Supe y Pativilca”. Estas anotaciones en O’Phelan, sugerirían que la directividad mayor de este potente sismo se orientó esencialmente más hacia el norte.

4.1.2.2. El Tsunami

El violento sismo generó un tsunami que, en cuanto a daños y número de fallecidos, fue hasta la fecha el más catastrófico habido en el territorio peruano. De los ~ 65,000 habitantes que tenía el conjunto de Lima – Callao y sus periferias, se estima que, en el puerto de Callao, habitaban unas 4,000 personas, de las cuales solo sobrevivieron al tsunami unos 400 (Pérez-Mallaina, 2005, pág. 48). Algunos investigadores, como Jiménez y Ortega (s.f., pág. 1) dan cifras aún peores, indicando que en Callao había unos 5,000 habitantes de los que solo sobrevivieron 200. El tsunami fue una catástrofe inmensa para el Callao, que fue prácticamente barrida.

La Figura 40, muestra una simulación realizada por Jiménez y Ortega (s.f.), aproximadamente para el área alcanzada por las olas en el terreno. El actual

distrito de La Punta fue totalmente cubierto, puesto que la península que ocupa está íntegramente a < 5 msnm. Los distritos de La Perla y Bellavista también fueron cubiertos en gran parte, aunque es posible que algunos sectores de estos distritos situados ~ entre 10 a 20 msnm hayan sido poco o nada afectados por la desigual penetración marina.



Figura 40. Mapa de inundación modelizada para el Callao

La Figura muestra el producto de un modelo numérico que, señala en azul, el área que habría sido inundada por el tsunami de 1746. *Fuente.* (Jiménez & Ortega, s.f., pág. 5)

Según el modelo mostrado en la Figura, casi todo el distrito del Callao Cercado fue cubierto, pudiéndose notar en la imagen que, el sector del aeropuerto internacional también fue afectado, y más aún lo habría sido el sector del nuevo aeropuerto, (situado algo más cerca al mar). La inundación también habría alcanzado un pequeño sector occidental del distrito de San Martín de Porras. El distrito de Ventanilla y, seguramente parte del distrito de Mi Perú, también habrían sido afectados. Hacia el sur, el modelo arroja inundación en la estrecha faja litoral de la Costa Verde, aunque en el Siglo XVIII, dicha faja casi no existía o era muy reducida. Muy probablemente, el tsunami de entonces habría inundado también los sectores bajos del distrito de Chorrillos (Villa – Los Cedros) y de otros del sur, despoblados en ese entonces.

Los efectos de una inundación por tsunami no son uniformes a lo largo y ancho del área inundada, aunque, por regla general, puede asumirse que las alturas más bajas del terreno serán las más arrasadas; pero hay mucha variabilidad; así, por ejemplo, la propia península de La Punta puede aminorar la energía de las olas que chocan con ella, y la masa de agua que continúa avanzando puede ser menos alta que allí donde el tsunami golpee una costa abierta. Al respecto, Dollfus (1965, págs. 350 - 352) hace notar la importancia que tiene la isla San Lorenzo, diciendo que “Esta isla, lo mismo que el islote de El Frontón, protegen parcialmente el Callao”. Señala también que, al proteger el cono deyectivo del Rímac del oleaje litoral, estas islas “han permitido la formación de la península de La Punta”. Lo indicado por Dollfus hace notar que, a pesar del devastador tsunami de 1746 que barrió con gran parte del Callao, el efecto hidrodinámico y geomorfológico sería mayor de no existir estas islas en el frente costero limeño, las mismas que actúan como grandes obstáculos que reducen la magnitud de las olas provenientes de alta mar.

De otro lado, las irregularidades topográficas existentes al interior del terreno inundado, ya en la Costa, pueden provocar crecimientos puntuales dispersos de las masas de agua, cuando estas convergen en ciertos puntos de la inundación por el tsunami, pero también provocar disminuciones del nivel en otros sectores; todo esto mientras las aguas están en movimiento. Hay que considerar que son trenes de olas, unas más altas que otras, y algunas más o menos seguidas que otras, habiendo lugares donde las crestas de dos olas están más cerca o más lejos entre sí en diversos sectores. Igual sucede con el oleaje de retroceso, que se encuentra con las nuevas olas que van llegando de alta mar; los encuentros generan elevaciones y disminuciones dispersas del nivel de aguas en cada lugar, y las variaciones del nivel de las aguas, del orden de 0.5 a más de 1 m, pueden ser determinantes en la penosa tragedia que significa un tsunami en áreas litorales pobladas.

También, cuando hay tsunami y las olas entran a tierra, los obstáculos fijos que hay en el terreno litoral (grandes rocas, espigones, puentes, postes, casas, edificios, árboles, etc.), se convierten en verdaderos proyectiles muy peligrosos si son arrancados por las olas, lo cual es frecuente, sobre todo en

las zonas más bajas y cercanas a las rompientes del litoral. Los objetos móviles (autos, embarcaciones, enseres de las viviendas) constituyen otro grave peligro, aunque paradójicamente, muchos de estos obstáculos, resultaron muchas veces providenciales a pobladores que lograron salvarse aferrándose a ellos.

El modelo numérico empleado por Jiménez y Ortega (s.f.), identifica una máxima altura de olas producidas por el sismo, de ~ 10 m, a la vez que la máxima cota de inundación en el terreno (establecida también en el modelo) llegó a ~ 21 m. Es decir, hay amplificación en la altitud a que llega la inundación, porque la topografía y geometría de los terrenos sometidos al ingreso del oleaje puede favorecer o no, según las circunstancias, la concentración de energía en ciertos lugares. Las condiciones del momento en el tsunami, favorecieron el avance de las masas de agua en determinados lugares, en una altitud que llegó al doble de la máxima del oleaje alcanzada en el mar (antes de las rompientes).

Que de 4,000 habitantes que tenía el puerto, solo haya sobrevivido $\sim$ el 5%, dice mucho de la magnitud del evento, pero no puede establecerse, si fue el sismo o el tsunami el fenómeno que causó la mayor cantidad de víctimas. El hecho de que el sismo ocurrió a las 10.30 de la noche, con gran parte de la población ya descansando, es una condición que favoreció el desastre. El terremoto destruyó gran parte de las viviendas aplastando seguramente a muchos. Entre los escombros y oscuridad nocturna, los sobrevivientes no podían orientarse cuando llegaron las olas del tsunami.

A falta de instrumentación en la época los datos históricos deben tomarse con mucha reserva, y por ello, es posible que la potencia del sismo y tsunami haya sido de magnitud menor o mayor a la indicada, lo mismo que el número de víctimas. Aún hoy en día, con todos los elementos tecnológicos, ni los países más avanzados logran cuantificar del todo la magnitud, intensidades ni consecuencias de cada desastre. Además, la devastación nocturna alcanzó tal dimensión, que era muy difícil la labor de quienes se esforzaban en esos días, por lograr informes realistas para las autoridades coloniales de entonces.

Fernández (2007, pág. 71), citando a viajeros de esa época, dice que por entonces “pululaban en la ciudad y puerto, no más de cuatro mil habitantes”; pero, Pizarro, E. (2007, pág. 53), basado en los censos de 1862 y 1876, señala que vivían unos 3,000 habitantes. Más adelante (Pizarro, 2007, pág. 58) dice, “Se estimó que 500 personas –un sexto de la población– perdieron sus vidas en la ciudad y el puerto”. Fernández, que no hace referencia al número de víctimas mortales, anota que la ciudad de Arica tenía siempre mucha población flotante de viajeros mestizos e indígenas, que llegaban por las actividades comerciales del puerto. Pizarro señala que Arica era, después del Callao, el segundo puerto en nivel de actividad del país, y tenía mucha importancia comercial y abastecimiento de gran parte de todo el sur del país.

Barrenechea, (2020, pág. 18), describe que el tsunami produjo en Arica olas de 14 m de alto; en Iquique (200 km al sur), olas de 12 m y, a 2,000 km más al sur, en Talcahuano, 5 m. La catástrofe fue relatada por sobrevivientes, tanto residentes como marinos que estaban en los barcos anclados en el puerto durante el sismo. Los relatos (Palacios, 2016) son invalorable para el conocimiento de estos terribles eventos. A continuación, se presentan algunos extractos de dicha publicación:

“Anteayer a las cinco, se ha experimentado el terremoto más fuerte que en mi vida he visto y veré... duró como cuatro minutos; salí a la calle...y vi que todas las casas de una y otra vereda habían caído... Corrimos hacia la falda del Morro y no bien estaba a la altura de 30 a 40 pies, el mar invadía... arrastrando cuanto encontraba a su paso; levantando los edificios que quedaban en pie transportándolos de un lado y otro hasta deshacerlos en su totalidad y retirándose en seguida para invadir nuevamente, cuatro o seis veces. El mar subió como 30 o 35 pies¹⁵... Toda la bahía se transformó en remolinos de sur y norte y viceversa, con corrientes que pasaban de 10 millas¹⁶... Solo la “América”, toda averiada, el “Wateree” y el bergantín “Eduardo” permanecen con el casco entero, los demás se han hecho pedazos¹⁷... Al amanecer el espectáculo era conmovedor; todo en ruinas...La playa desde el morro hasta

¹⁵ Equivalentes a 10 u 11 m.

¹⁶ Equivalentes aproximadamente a 17 km/h.

¹⁷ El relator se refiere a los nombres de los barcos que, según él, aún subsistían al oleaje.

más allá de Chacalluta, como 8 millas¹⁸, está sembrado de toda clase de bultos, mercaderías, equipajes, restos de buques, edificios, etc. El pueblo desde el amanecer recoge lo que cree útil... no respeta... Hoy a las 2 h. Llegó el Prefecto con alguna fuerza de caballería. Mucho se hará para establecer el orden..." (Palacios, 2016, pág. 241)

Otro relato del 16 de agosto, es una carta dirigida al comandante General de la Marina, por Carlos Ferreyros, oficial de la corbeta "América".

"el temblor duró 4 m...ordené fuese un bote con cuatro hombres para apagar incendios que se notaban en tierra...Antes que desembarque vino una corriente del sur tan fuerte que el bote y la corbeta eran arrastrados por ella...5 minutos duró la primera corriente que era de 5 y 1/2 millas, y que inundó la población, vino una segunda en sentido opuesto, es decir del norte, y dejó la bahía casi en seco varando en su fondeadero la barca inglesa "Chañarcillo", la "América", "Rosa Rivera" y todas las embarcaciones menores... Las corrientes de sur a norte se sucedían con tanta frecuencia y sus cambios tan rápidos que era imposible mandar botes a salvar a las muchas personas que se veían flotando encima de las palizadas pidiendo auxilio...Durante los cambios de corrientes perdimos todas las embarcaciones. Así seguimos hasta las 6 horas 45 minutos p.m. en que las corrientes aumentaron hasta 9 y 1/2 millas y su duración era de 5 a 10 minutos. A las 7 p.m. vino una corriente del Sur con una fuerza de 10 y 1/2 milla que hizo saltar nuestras amarras e instantáneamente quedamos en la playa. Este momento fue terrible... Estando el buque destrozado sobre la playa y completamente lleno de agua, en la popa comenzó un incendio...En esta circunstancia, sin botes y oyendo los ayes de los que esperaban y no podíamos socorrer, vino una segunda e inmensa ola que acabó de llenar de agua el buque y que fue nuestra salvación porque apagó el incendio. Nos hallamos en esta situación sin esperanza de salvar, y pidiendo a Dios nos enviara la muerte, pues ya no había paciencia para sufrir tanto y ver desaparecer personas queridas, cuando secó repentinamente la mar retirándose como dos millas, y dejando el buque en

¹⁸ A razón de 1,609 m/milla resultan unos 13 km de litoral inundado según el relator.

seco, inmediatamente todos bajamos a la playa y corriendo logramos escapar, pues ya venía otra marea detrás de nosotros...” (Palacios, 2016, pág. 150)

Otro relato, de E. Sturdy, marino del barco norteamericano “Wateree”, anclado en Arica cuando ocurrió el sismo; su relato fue publicado en un extenso Artículo, por Scribner’s Monthly, New York, 1872.

“Las casas de Arica estaban construidas de adobe y juncos, de un piso de altura, había unas pocas de piedra y madera...Una imponente Aduana e iglesia...los interiores de las casas más acaudaladas estaban lujosamente amoblados. La población de la ciudad era muy agradable y la gente la más hospitalaria... A las cinco de la tarde del 13 de agosto la primera sacudida del gran terremoto se sintió en Arica. Ningún síntoma premonitorio indicaba que algo de esa magnitud iba a ocurrir... Era la más fuerte que ellos habían experimentado por años. Echó abajo muchas casas, y dañó otras...Los barcos parecían perfectamente a salvo...el agua no mostraba signos perturbadores. Estaba tan calmado y sereno como un lago en miniatura...Eran cerca de las cinco y media cuando ocurrió la segunda y más fuerte sacudida...Los aterrados habitantes...Muchos escaparon a tiempo, otros eran sepultados por las ruinas...Una inmensa masa de tierra se desprendió desde el “morro” y cayó con un horrendo ruido sordo, enviando tal nube de polvo hacia arriba como para cubrir la ciudad completa...Esta nube lentamente se abatió a sotavento y reveló una ciudad en ruinas... Ahora, por primera vez, se notó una alteración en el agua. Esta retrocedió una corta distancia, y entonces regresó más allá de la más alta marca de marea. El muelle que se extendía desde la costa hacia las aguas profundas estaba abarrotado de gente...El agua los alcanzó, los barrió por los pies y los dejó luchando por sus vidas, en una masa flotante de restos que se retorcíán y giraban en todas direcciones. Algunos fueron recogidos por botes, unos pocos fueron arrastrados hacia la costa, muchos otros se hundieron y no se vieron más...Las corrientes y contracorrientes se apreciaban en cada dirección. Masas de ruinas movedizas se abalanzaban unas a otras en direcciones opuestas; y los botes, en los cuales algunos se habían trepado al ser alcanzados por el agua, fueron arrastrados por todos lados...Los botes del vapor americano Wateree y de la

corbeta peruana América fueron enviados a recoger a los infortunados que aún estaban colgados de árboles, de masas de tierra, o de lo que fuese que los mantenía a flote. Aunque rescataron a algunos, un gran número fueron dejados a su suerte, porque cuando el bote se acercaba a ellos eran alcanzados por la marea que los lanzaba desesperanzadoramente lejos...Estas visiones aterradoras nunca habían sido vistas antes...ver esta misma tierra estable hasta entonces, abierta en inmensas grietas, desde donde el agua salía aparentemente desde las mismas entrañas de la tierra, era suficiente para congelar la sangre del más valiente...Los padres perdieron de vista a sus hijos, los esposos a sus esposas, los hermanos a sus hermanas...Los oficiales recorrían la cubierta discutiendo las posibilidades de salvar el barco...Arrastrados sin misericordia por la corriente, éramos llevados de uno a otro lado- precipitados hacia una dirección para luego ser cogidos por otra corriente y enviados rápidamente de regreso...Pero al final nuestro tiempo parecía haber llegado. Con un horrendo estruendo chocamos en un costado del barco, y la inmensa ola se lanzó completamente sobre nosotros, ...Nuestra destrucción parecía cierta...estábamos de costado, y esperábamos ser revolcados y sumergidos en las furiosas aguas, pero al momento siguiente nos enderezábamos, y la ola, retrocediendo, nos dejaba en la playa, mostrando el suelo vacío por un buen trecho frente a nosotros. Cuando la ola creció más fuerte, asumió una apariencia diferente...Permanecemos en la cubierta y esperamos, viendo que no había oportunidad de salvación ni escape posible de nuestro destino...Con los más intensos sentimientos permanecemos en espera cuando la ola cayó sobre nosotros. Casi sin aliento, y con los nervios estirados al máximo recibimos el impacto...Y luego como un juguete nuestra nave giraba sin cesar, y fue lanzada muy lejos hacia la costa con su proa apuntando al mar... La tripulación paralizada, estaba asida a las cuerdas salvavidas...Nuevamente el agua retrocedió; otra vez estábamos a salvo, pero para nosotros parecía solo una postergación a la muerte...El América había desembarcado cerca nuestro y los gritos y aullidos agonizantes que salían de su cubierta eran tan espantosos que estremecían los corazones más duros. Otra vez volvió la ola con toda su furia, y esta vez, golpeándonos en la proa, avanzó a ambos lados de nosotros, y por un momento se irguió como dos inmensas murallas que parecían cerrarse por encima de nosotros.

Nuestros corazones latían salvajemente al verlas, pero dejándonos intactos las olas cayeron y tomaron su curso de regreso al mar. Hasta el amanecer el oleaje iba y venía...Su fuerza estaba lentamente menguando...Todo lo que ocurrió en esa larga y terrible noche hizo que la gente en tierra permaneciera en los cerros. Parecía haber apenas una pausa entre las réplicas...Antes del estruendo que precedía cada temblor se escuchaba a los perros que, por peculiar instinto, reconocían su proximidad con los aullidos más sobrenaturales...Las familias fueron dispersadas, y los seres amados se perdieron. Muchos fueron heridos, y personas con piernas quebradas y todo tipo de contusiones imaginables yacían por todos lados. Al amanecer, la visión de lo ocurrido desgarraba el corazón... El mar entrante había arrastrado los escombros en todas direcciones, lo que hacía casi imposible ubicar cualquier punto de la ciudad. Se supo por cálculos, que el mar había alcanzado 45 pies por encima de la marca de pleamar y que el arrastre de las olas era alrededor de 15 pies más alto. Ningún barco estaba en el puerto. El Wateree estaba cerca de 500 yardas en la costa, perfectamente erguido, sin la pérdida de ningún hombre... El América yacía a la orilla del mar en la más deplorable condición. El Chañarcillo estaba ladeado con cada mástil fuera de su sitio...Era evidente que había sido revolcada una y otra vez por las olas...Ninguna alma a bordo de esa nave se había salvado. Nada era visible del Fredonia, excepto una pequeña parte del barco naufragado que flotaba, en la cual había dos hombres, únicos sobrevivientes. Cómo permanecieron allí durante toda la noche en ese mar agitado es algo que aún maravilla...La vista de la playa era increíble. Escasamente se podía pensar en algo que no pudiese ser encontrado allí...sedas, satines, terciopelos, y telas...vinos y licores de todo tipo en gran profusión; pianos y birimbaos; carros de ferrocarril y coches de niños— en realidad casi todo lo que se podía usar u ornamentar. Había una inmensa Aduana en Arica, repleta con mercaderías en su interior, y al anegarse fueron llevados por la corriente hacia la costa. Esta colección incongruente resultó una bendición y ruina para Arica. Una bendición porque la gente había perdido todo en sus viviendas. Y en sus precipitadas escapadas no pudieron salvar nada; toda la ropa que poseían era la que tenían puesta. La playa les otorgaba cosas no solo para vestirse, sino para carpas en las cuales podían vivir en los cerros. El licor tirado por todas partes era lo malo.

Por varios días el nativo más humilde podía beber champaña y cuando se terminaba ellos podían recurrir al whisky y al brandy. Las desenfrenadas escenas que siguieron eran en extremo desagradables. Ninguna orden se mantenía en Arica, y había riñas fatales con mucha frecuencia, hasta que el orden finalmente fue establecido por la policía de Tacna...” (Fernández M. , 2007, pág. 224)

Las muertes y daños afectaron a toda la región sur, a la costa boliviana y norte chileno de esa época. Palacios (2016, pág. 247), cita una carta del 16 de agosto, enviada por el prefecto de Moquegua, al ministro de Gobierno. Es un testimonio del relator, que vive el sismo en Moquegua, ciudad situada 150 km al norte del probable epicentro, a 1,400 msnm. Aquí, algunos extractos:

“El 13, a las 5 horas, tuvo lugar un fuertísimo terremoto...de cinco minutos. Estaba en Tacna cuando sucedió, y desde entonces hasta ahora hay un ligero y continuo temblor que se interrumpe cada cuarto de hora por un sacudimiento más fuerte. Ni puede imaginarse ni es posible describir con detalles los horribles resultados de tan tremendo fenómeno. La mendicidad ha abierto sus falaces puertas a multitud de familias, y el luto vino también a anunciar sus desgracias. Tacna, la capital del departamento, es la que menos ha sufrido que otros pueblos. Ha perdido unas sesenta casas, y sólo ha tenido tres heridos que a la fecha, deben haber muerto...Arica, ese importante y segundo puerto de la República no existe ya... Aún no se sabe a qué número asciende la gente muerta por el temblor y ahogada por el mar. El telégrafo no funciona, porque la oficina desapareció con la salida del mar... Iquique: como casi todos los edificios de ese puerto eran de madera, el terremoto derribó algunos; pero el mar en su salida barrió tres cuartas partes de la población. Se calcula en poco más de cien los muertos. Pisagua: Este puerto siguió la misma suerte que Iquique... La caleta Mejillones fue completamente barrida. Moquegua, ...esta ciudad ha sido destruida en más de la mitad de sus edificios. Todas las iglesias y edificios notables cayeron a tierra... Algunas personas muertas. De otros pueblos de las provincias aún nada se sabe; pero es muy probable que hayan sufrido las consecuencias destructoras del terremoto... Ilo: de este puerto menor nada ha quedado. El terremoto lo derribó, y el mar concluyó toda

la destrucción. Locumba: Toda la población destruida... Ya puede imaginarse vuestra señoría que todos o la mayor parte de los hacendados de este importante valle se han arruinado. Los habitantes de esos puertos pronto tendrán que sufrir los rigores del hambre, pues ya no hay ocupación que darles...Conviene que su excelencia, el presidente de la República...dicte órdenes para que venga a esta bahía uno de los buques de la Armada Nacional, cargado de víveres para auxiliar a tantos infelices, antes que el hambre los lleve al sepulcro o se entreguen a toda clase de crímenes para proporcionarse los medios de subsistencia. De aquí no se puede proporcionar el agua necesaria a los puertos del sur, porque la fuente o pozo que surtía a los buques se ha perdido con la inundación” (Palacios, 2016).

Los extractos de los relatos presentados por Fernández (2007) y Palacios (2016), son testimonios del sismo y tsunami más violento habido en el territorio peruano; son presenciales y exponen muchos aspectos de muy alta relevancia práctica. A pesar de ser fenómenos de hace más de siglo y medio, muestran que los efectos naturales y estructurales de los sismos, las reacciones humanas e imprevisibilidad de las mismas y la tragedia en su conjunto, tienen mucha semejanza a lo que se ve en televisión y documentales sobre los dantescos tsunamis de Japón e Indonesia de este siglo.

Así, observando el tsunami de Japón de 2011, se puede ver los cientos o miles de embarcaciones y autos, incluyendo casas y toda clase de enseres yendo de un lado a otro en las oleadas, chocando entre sí o dando vuelcos a veces con personas en su interior en aguas agitadas, que invaden la ciudad formando remolinos y reflujos de corrientes en varias velocidades y sentidos, todos convertidos en proyectiles mortales para los sobrevivientes, y a la vez en medios de agarre, flotación y posible salvación de las miles de víctimas. El terror en la gente es el mismo hoy que hace siglos, porque no es posible, por más preparación moderna que se tenga, enfrentar con otra actitud desastres y tragedias de esta magnitud, en las que los hechos se desencadenan de modo tan repentino e impredecible, que es muy poco lo que se puede hacer.

El conocimiento de varias de las características de los sismos y tsunamis de Lima (1746) y Arica (1868), permite obtener las siguientes conclusiones:

- a. Ambos eventos son de origen marino costero, de gran magnitud y superficiales. El de Lima ocurrió ya avanzada la noche, y el de Arica al atardecer. Arica puede semejarse a la ciudad del Callao en extensión y población, y en ambos casos, casi todas sus edificaciones resultaron destruidas, primero por el sismo y luego por el tsunami.
- b. A pesar de la destrucción casi total de ambas ciudades, en el Callao murió el 95% de su población, y en Arica entre 10 y 15%. Las diferencias de suelo para las edificaciones de ambas ciudades, no parecen significativas para explicar la gran diferencia en porcentaje de muertes, que sin duda se debe a dos hechos principales: el que en Callao el sismo y tsunami fueron plenamente nocturnos; en Arica, se vivió el sismo de día, y parte del tsunami, de noche. El otro aspecto clave es la topografía de ambas ciudades litorales; Gran parte de la Arica de entonces tiene al lado los terrenos altos del Morro, y también la llanura costera se eleva más rápido hacia el interior; es decir, parte de la población ariqueña sobreviviente al sismo pudo alcanzar terrenos altos cercanos y salvarse del tsunami (como se dice en extractos del primer relato). En el Callao de entonces, del litoral hasta zonas altas seguras hay mucha distancia, imposibles de alcanzar, más aún en medio de los escombros y total oscuridad nocturna. En el caso de Arica, aun había luz diurna para las primeras olas.
- c. El tercer relato (de Sturdy; presentado en la pág. 136), indica que en Arica se formaron grietas en el suelo y expulsiones violentas de agua; es decir, hubo procesos de licuación que, si ocurriesen ahora las edificaciones colapsarían en gran medida. Si bien Arica es ya desde hace casi siglo y medio una importante ciudad chilena, es de esperar en numerosas ciudades del litoral costero nacional, que tienen geomorfologías y suelos geotécnicamente similares al de Arica (incluyendo sectores diversos de aguas freáticas superficiales en varios sectores) tengan igualmente alto riesgo por este fenómeno. El cuarto relato (del prefecto de Moquegua, pág. 139), menciona que, al igual que en Arica, los pequeños puertos de Iquique, Mejillones y Pisagua (por entonces peruanos), fueron barridos por el tsunami, lo mismo que el puerto de Ilo (en Moquegua). En la

actualidad la ciudad de Ilo, queda sobre el litoral, pero aquí los terrenos ascienden muy rápido, y en menos de 200 m desde la orilla, los terrenos ya se hallan sobre 50 m de altitud. Por ello, esta ciudad se halla libre de amenazas de tsunamis, salvo en sus instalaciones portuarias y algunas edificaciones menores.

- d. El relato de Sturdy, indica que también hubo fuertes derrumbes desde el Morro, que por entonces no tenía edificaciones. Hay que decir que, colinas similares hay en muchas urbes litorales del país, siendo elementos topográficos clave para la supervivencia en caso de tsunamis (debería garantizarse el rápido acceso a los pobladores en esos casos). Sin embargo, el actual poblamiento creciente de estos cerros viene reduciendo la posibilidad de ser rápidamente usados en esos casos, a la vez que las viviendas construidas están amenazadas por los derrumbes que muy probablemente ocurrirán en los sismos costeros más violentos. Una amenaza particular es la caída de viviendas situadas en la parte superior de los cerros, sobre las ubicadas más abajo, que generalmente fueron las primeras en construirse.
- e. En el relato del prefecto de Moquegua, este señala una duración del sismo de 5 minutos. Moquegua está a 150 km al norte de Arica y ya en la Sierra. En los relatos de Arica se indican 4 minutos; es decir, se puede corroborar una muy larga duración del sismo, la cual es posible pero rara. Hay que tener en cuenta que, uno de los factores que agravan la catástrofe es precisamente la duración, la cual, para el sismo de Arica, debe reconocerse como muy prolongada y factible de volver a ocurrir en toda la región costera, sobre todo en la Costa central y sur.

Las Figura 42 y Figura 43 presentan cuatro fotografías de Arica, días después del sismo y tsunami. Las dos primeras fotos muestran el estado de total devastación de lo que era la ciudad; la primera muestra el Morro de Arica, a cuyo pie se hallaba la parte sur de la ciudad; la segunda, la planicie de la ciudad devastada por el sismo y luego por el tsunami; la tercera, al barco "Wateree", varado en tierra a ~ 500 m de la costa, el único que salvó

plenamente del tsunami, y la cuarta, al barco peruano “América”, que quedó varado, con su maquinaria muy dañada y parte de su tripulación perdida.



Figura 42. Fotos de Arica, luego del sismo y tsunami de 1868
Fuente. (Palacios, 2016)

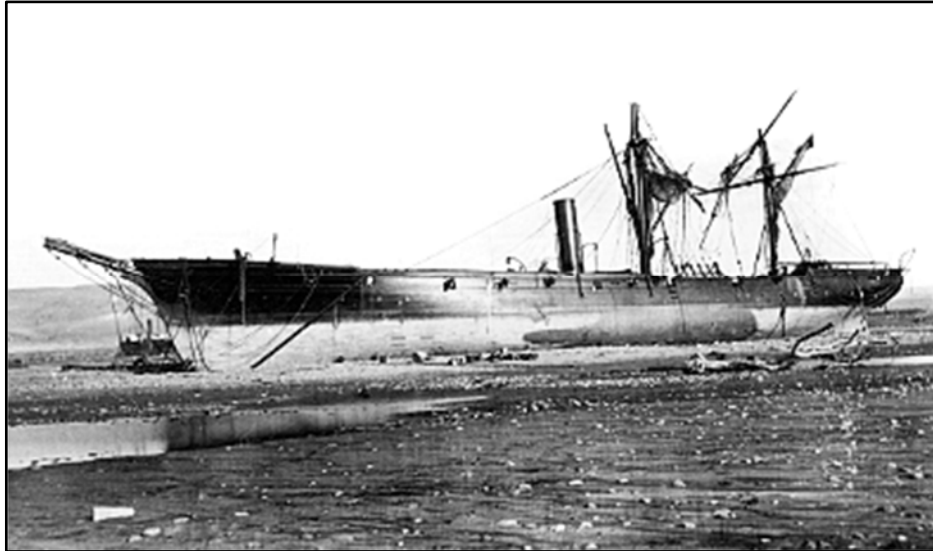


Figura 43. Corbeta peruana “América” varada por el tsunami de 1868

Once años después esta nave militar se necesitaría por la guerra con Chile.

Fuente. (Palacios, 2016, pág. 253)

Hay que destacar que apenas nueve años después (1877), Arica, al igual que muchas de las poblaciones del sur peruano de entonces, que en esos años se hallaban en proceso de reconstrucción por la destrucción que dejó el sismo de 1868, vuelven a sufrir otro violento terremoto marino costero, esta vez con epicentro frente a Iquique (200 km al sur de Arica). La Figura 44, muestra el estado en que quedó la ciudad de Arica con este nuevo sismo y tsunami.



Figura 44. Foto de Arica, luego del sismo y tsunami de 1877

Fuente. (Palacios, 2016, pág. 279)

Según Kausel (1985) y Silgado (1985), citados en el Cuadro 8 (pág. 108), este terremoto tuvo una magnitud ~ 7.9 y profundidad superficial de ~ 40 km. Si bien este sismo fue 5 a 6 veces menos potente que el sismo de Arica, su magnitud es también la de un sismo muy violento y, sobre todo, nocturno, que ocurrió a las 8:15 de la noche, y donde después sobrevino un tsunami, que terminó por destruir las pequeñas ciudades litorales del sur, causando numerosas víctimas, siguiendo seguramente los patrones de desastre y tragedia ya conocidos en los relatos del sismo y tsunami de Arica de 1868.

Entre muchas realidades, se pueden destacar a los incendios como secuela fatal de los sismos, sobre todo en esa época en que no había energía eléctrica, como en el caso del sismo de 1877, cuando a poco más de las 8.00 pm, la población, aún despierta, usaba en gran medida las lámparas y velas.

No se puede decir lo mismo del sismo de Lima de 1746, en que, si bien fue nocturno, el sismo ocurrió ya bien avanzada la noche (10.30 pm) con la gente ya descansando (y por ende con lámparas apagadas). Este hecho, que podría parecer irrelevante, no lo es en absoluto, porque en la realidad del momento, puede significar una condición de vida o muerte para cientos o miles de pobladores en una ciudad, incluso, en los tiempos actuales.

Palacios (2016, pág. 278), presenta una serie de relatos hechos por residentes que documentan lo acontecido durante este nuevo sismo de 1877. Respecto a la magnitud de las tragedias y a las reacciones humanas y del conjunto de las sociedades afectadas, los relatos son en esencia similares a los mostrados para el sismo de Arica 1868, o el de Lima de 1746, con las diferencias que aluden a la hora y fecha de los eventos, a la topografía y caracteres geográficos de detalle de cada sitio, y a las diferencias de época. A continuación, algunos extractos de una carta dirigida por el prefecto de Tarapacá, el 10 de mayo de 1877, dirigida al director de gobierno, a propósito de lo ocurrido ese año en Iquique:

“El derribo de los andamios arrastró en su caída lámparas de parafina, tenían inevitablemente que producir una conflagración...se presentó un incendio en una pulpería distante como siete cuerdas del mar, al cual dieron una actividad

que supera todo...la compañía de bomberos. Como el lugar en que el siniestro se presentó no permitía funcionar y dar a las bombas, se situaron...en la playa, para darles agua a las mangueras. Todo trabajo fue infructuoso, pues, recogién dose el mar y precipitándose después sobre la bahía, ocultó las dos bombas...Los trabajos de los bomberos se concretaron a aislar el fuego...Merced al tesón y actividad de todos, bomberos y pueblo...se extinguieron en su origen varias tentativas de incendio en distintas direcciones. Mientras tanto el mar comenzaba su obra devastadora". (Palacios, 2016, pág. 277)

Sobre lo acontecido en Iquique, parte del relato de un sobreviviente anónimo:

"El cuadro que ofrecía la ciudad y sus moradores no tienen cómo pintarse...Ver las calles llenas de hombres, mujeres, niños y ancianos que gritan, lloran, invocan a la providencia y llamando, quién a su esposa, quién a sus hijos, quién a sus padres...La población se acampó...hasta la distancia de dos leguas de este puerto, en las faldas de los cerros. Solo el terror puede haber empujado a tantos a atravesar la pampa arenosa y fría y las laderas roqueñas. Los estremecimientos de la tierra continuaban de 5 en 5 minutos...mientras tanto el mar destruía cuanto encontraba a su paso. Que noche tan espantosa, y que horas tan eternas las que pasamos hasta que vino el día". (Palacios, 2016, pág. 278)

4.1.4. El Sismo de Piura de 1912

El 24 de julio de 1912, a las 06.50 de la mañana, un violento sismo sacudió Piura y el norte peruano, afectando también al territorio ecuatoriano colindante, incluyendo la ciudad de Guayaquil. Sieberg (1930), citado en el Cuadro 8, (pág. 108), le atribuye una magnitud de 8.0 y una profundidad de ~ 30 km, aunque Silgado (1978, pág. 46) los considera un tanto exagerados. Su epicentro estuvo en pleno desierto de Sechura, a solo unos 50 km al sureste de Piura, la ciudad más grande y poblada del área de influencia destructiva del sismo, que para entonces tendría una población de ~ 10 mil habitantes.

Cabe destacar que, de la lista de 88 sismos más fuertes registrados en el Cuadro 8, (pág. 108), este es el único en el departamento de Piura y, además, con magnitud 8.0, es decir grave a muy grave. Entre la escasa información existente sobre este sismo hay, por ejemplo, una entrevista radial que le hace RPP a Hipólito Cruchaga, por entonces director del INDECI Norte, diciendo que hay en Piura un peligroso silencio sísmico desde 1912 (Redacción RPP, 2015), señalando para este sismo una magnitud de 7.5 a 7.9 (distinto a la M: 8.0 indicada por Sieberg). La Plataforma del IGP señala que hubo otros sismos en Piura, como en 2014 (M: 6.2) y en 2021 (M: 6.1). En este contexto, han pasado ya 113 años sin que un sismo muy severo haya sacudido la extensa región piurana, la Universidad de Piura en su página web (Araujo, 2025), resalta que Hernando Tavera (presidente del IGP), señale que el prolongado silencio sísmico en esta región es una acumulación peligrosa de energía, que solo se liberaría mediante un sismo estimado en 7.5 Mw.

Silgado (1978, págs. 46-49) detalla que la ciudad de Piura fue la más afectada “quedando en condiciones de habitabilidad solo el uno por ciento”, aunque indica también severa destrucción en Huancabamba, Jaén (Cajamarca) y las poblaciones ecuatorianas del Guayas. El CENEPRED y el GORE-Piura (2023, pág. 9) indican que este sismo tuvo una magnitud de 8.2 Mw, a 30 km de profundidad, y que ocasionó muertos y heridos sin proporcionar cifras. Solo en Wikipedia (2025) se indica una cifra refiriendo que “No se conoce la cantidad exacta de fallecidos, se presume encima de 500” lo cual, para una ciudad que por entonces solo tendría unos 10 mil habitantes, sería una mortandad proporcionalmente alta, y en un sismo diurno. Esta publicación indica también que hubo destrucción casi total en el centro histórico de la ciudad, y grandes deslizamientos de tierra, así como agrietamientos (que seguramente responden a procesos de licuación).

La geografía del desierto piurano y norteño es distinta a la del extenso desierto del centro y sur del país. Es bastante más cálido y tiene lluvias estacionales de verano, las cuales pueden ser muy voluminosas cuando hay mega eventos El Niño, en los que las lluvias totales en pocos meses veraniegos pueden superar las lluvias anuales de cualquier lugar de la Sierra e, incluso, de la

Selva. En esta condición, el desierto es más bien un semidesierto de bosque seco, xerófito, que permite la presencia de cierta población en pequeños caseríos que viven del pastoreo extensivo. Son poblaciones muy pobres que tienen a la ciudad de Piura como su centro orgánico, social y económico.

La cuenca de Sechura es una parte mayoritaria de la Costa de Piura, y es donde se ubican la ciudad de Piura, y algunas otras pequeñas ciudades, como La Unión, Sechura, Parachique, Mórrope, Olmos (estas dos últimas, ya en Lambayeque). La Figura 46 muestra dos cortes geológicos estructurales característicos de la costa norte del país, donde la cuenca Sechura – Olmos aparece en la Figura superior.

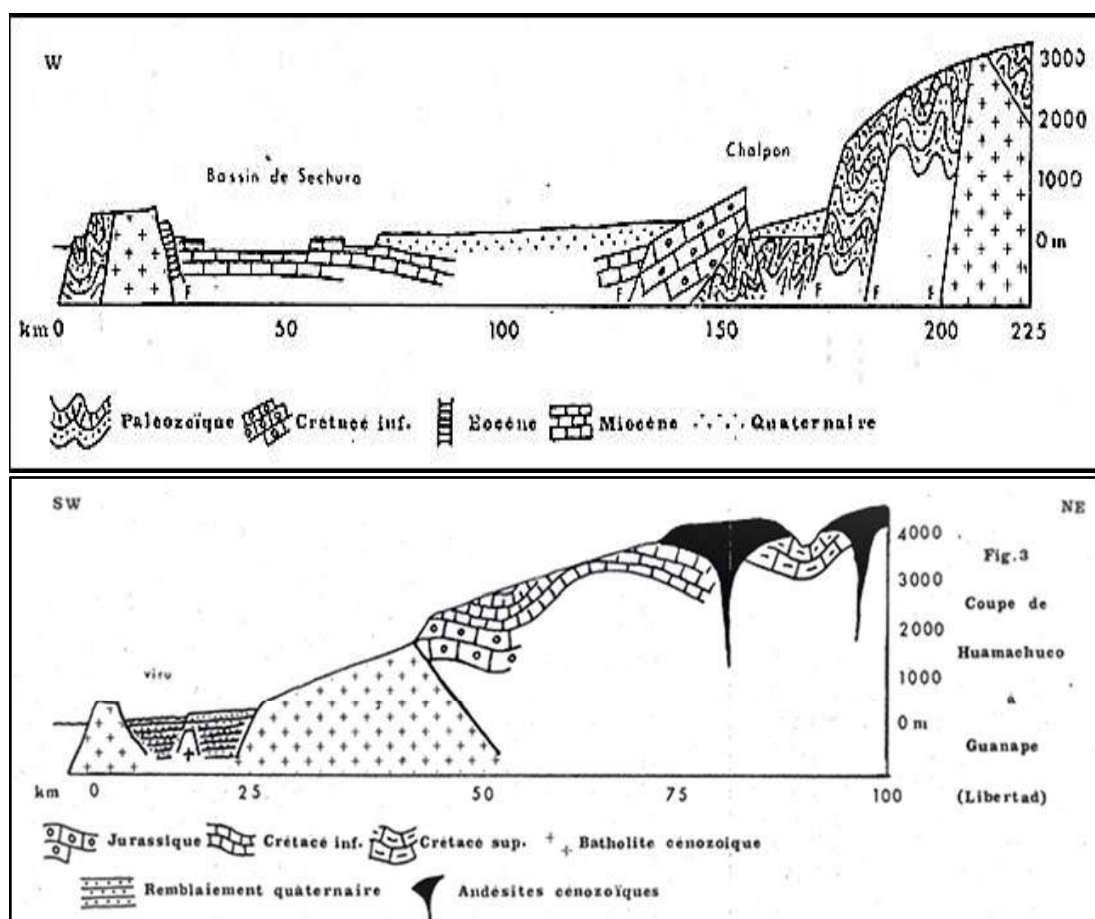


Figura 45. Cortes estructurales en Piura y La Libertad

La Figura muestra dos cortes estructurales del norte del país; el superior es un corte en Piura, que va de Bayóvar, en el mar, a la Sierra, en las cumbres de la Cordillera Occidental, pasando por el desierto de Sechura. El segundo, es un corte en Libertad, entre las alturas de Huamachuco y Virú, ya cerca al mar, donde se aprecia que la depresión costera ya es bastante reducida, en comparación a la depresión de Sechura. *Fuente.* (Delavaud, 1968, pág. 21).

Al norte de la cuenca de Sechura - Olmos se halla el río Chira, donde quedan otras ciudades, como Sullana (actualmente ya una ciudad de tamaño y población considerable), otras pequeñas como Las Lomas, Tambo Grande, etc. Pegado al mar se tienen otras ciudades como Talara y Paita. Todas estas ciudades eran muy pequeñas y rurales durante el sismo de 1912 y, seguramente confrontaron una importante destrucción, considerando que las viviendas de la época eran casi todas de adobe. Felizmente, no hubo tsunami y el sismo fue diurno, con la población ya levantada, algo que sin duda redujo la cantidad de muertes y heridos; pero es difícil considerar las labores de rescate y apoyo a las poblaciones damnificadas, en una época en que no había carreteras ni apoyo aéreo, especialmente para la zona andina de topografía accidentada donde, seguramente hubo muchos derrumbes y deslizamientos; la muy limitada infraestructura hospitalaria, saneamiento básico, incluso carencias de productos alimentarios y de primera necesidad.

La Figura 45 superior muestra como el desierto de Sechura es una amplia cuenca costera de 150 km de ancho, que está rellena por sedimentos terciario cuaternarios ligeramente plegados, cuenca que queda encerrada entre las rocas intrusivas, sedimentarias y metamórficas paleozoicas del macizo Illescas (bloque de montañas bajas pegado al mar) y las formaciones rocosas paleozoicas y mesozoicas de la Cordillera Occidental, muy plegadas y falladas, que llegan en sus cumbres de la Sierra piurana a poco más de 3,000 msnm. La Figura 45 inferior, que queda en La Libertad, muestra como la Costa es más estrecha, y la cuenca sedimentaria costera mucho más pequeña (20 a 25 km de largo entre las colinas intrusivas del batolito costero pegado al mar, y los cerros del mismo batolito de la Cordillera Occidental, ya entrando en la Sierra). La cordillera prosigue hacia el Este, con formaciones sedimentarias y volcánicas plegadas en la Sierra, que llegan a más de 4,000 msnm. Hacia el sur de La Libertad, en los departamentos de Ancash y Lima, la Costa se hace más estrecha, y la Cordillera Occidental, más elevada.

Para la población afectada de toda esta extensa área, el sismo ocurrió en julio, mes en que las temperaturas son bastante frescas, en comparación con la mayoría de meses muy cálidos. No hay evidencia de que el sismo coincidió

con algún Fenómeno El Niño severo; más bien uno de lluvias ligeras (Woodman, 1984, citado en Mabres et al. (1993, pág. 404)); en esta publicación se indica también que dos años después del sismo, las lluvias si fueron muy abundantes, propias de un “Niño” muy intenso (que, si hubiera ocurrido el año del sismo, las consecuencias serían distintas).

4.1.5. Los Terremotos de Lima de 1940, 1966 y 1974

Por su antigüedad, los sismos antes descritos, de Lima (1746), Arica (1868) y Piura (1912), son eventos ocurridos en sociedades bastante distintas a las actuales. En los terremotos de 1746 y 1868, que generaron enormes tsunamis y cuantiosas víctimas, las posibilidades de supervivencia eran muy limitadas; las comunicaciones mismas podían durar semanas o meses, y las noticias, ser fácilmente inciertas. Las mismas actividades económicas eran muy distintas a las actuales; no existía aún turismo y la migración era excepcional. Actividades económicas nocturnas casi inexistentes y, como característica principal, que la población nacional y mundial eran básicamente rurales. Sobre el terremoto de Piura, este ocurre ya entrado el Siglo XX, pero también en un contexto social y económico similar por el severo atraso de las provincias, En el Perú, solo la ciudad de Lima era una excepción, ya que las otras siempre tuvieron una dimensión urbana muy reducida. De esta manera, los terremotos destruían pueblos pequeños y muchas veces aislados.

Los terremotos de Lima de 1940, 1966 y 1974, ocurren en una ciudad ya modernamente constituida, con avenidas y transporte motorizado, con la ciudad ya electrificada, edificaciones que empiezan a tener varios pisos y uso de ascensores; actividad social y económica mucho más intensa, y barrios en constante crecimiento poblacional, incrementada por la cada vez más fuerte migración interna del interior del país; organización política administrativa ciudadana, servicios públicos, etc. En suma, ciudades ya modernas, que dan paso al cambio social fundamental, de mayoritariamente rural a urbana. En este contexto es que ocurren estos fuertes sismos. La Figura 46, presenta el área urbana que tenían en 1940 Lima y Callao.

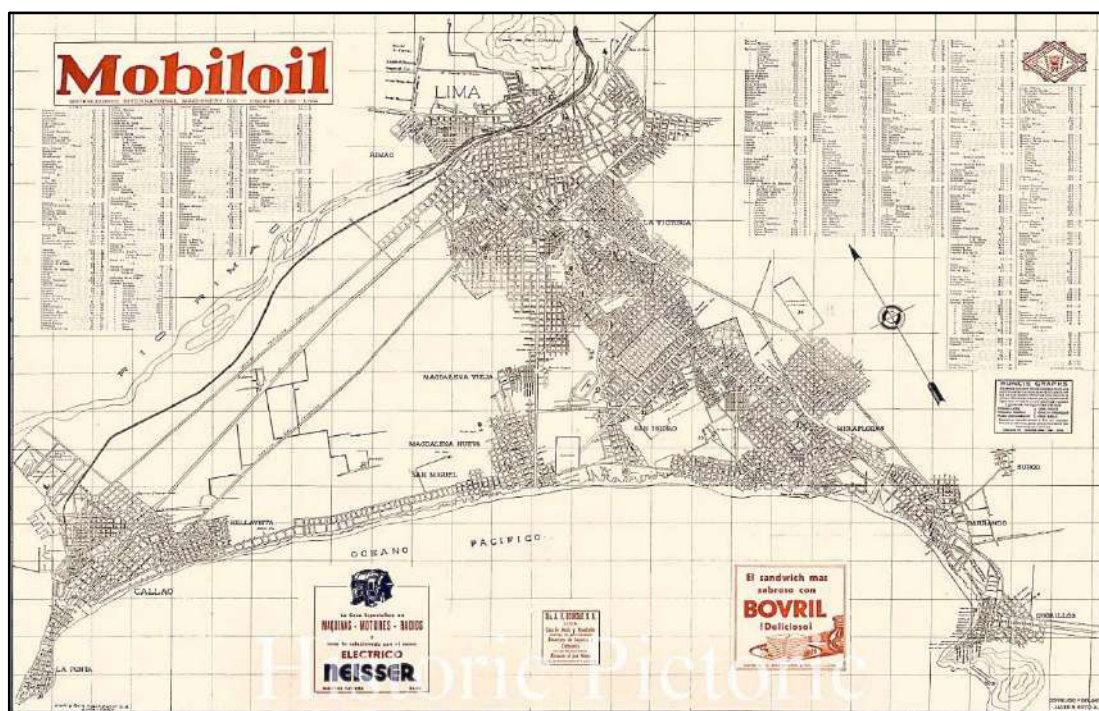


Figura 46. Mapa de Lima y Callao en 1940

Nótese que los actuales conos norte, este y sur, lo mismo que gran parte del abanico aluvial del Rímac, el Cerro San Cristóbal, el Morro Solar y el resto de cerros que bordean Lima antigua y tradicional eran, en 1940, zonas francamente despobladas. *Fuente.* (historicpictoric.com, s.f.)

https://www.historicpictoric.com/products/map-lima-peru-1940-plano-callao-balnearios-con-una-guia?srsId=AfmBOor74502FBgjWxRfURFxpE_w1qkDFzIFR_v5bBIL4TcgLbd1Dv1h

4.1.5.1. El terremoto de 1940

El viernes 24 de mayo de 1940, a las 11.34 de la mañana, un violento sismo sacudió Lima. Silgado (1978) y Dorbath et al. (1990), citados en el Cuadro 8, le asignaron una M: 8.2 y profundidad de ~ 50 km. Su epicentro fue a unos 100 km al noroeste de Lima – Callao, una corta distancia que redujo en algo la potencia con que las ondas sísmicas llegaron a la ciudad. Ese año, Lima asomaba ya como la megalópolis de la actualidad. El INEI (s.f.), dice que la ciudad (Lima y Callao) tenía 661,508 habitantes (ver Cuadro 9), y sus áreas urbanas, aunque cercanas y conectadas ya por avenidas troncales, no formaban la extensa conurbación metropolitana que se consolidó recién a

finis de los sesenta, estando separadas por amplios espacios no urbanizados (ver Figura 46), ocupados con cultivos y viviendas dispersas.

Cuadro 9. Crecimiento poblacional de la gran Lima en el país

AÑO	POBLACIÓN TOTAL		LIMA METROPOLITANA RESPECTO AL PAÍS (%)
	PERÚ	LIMA METROPOLITANA	
1940	7'023,111	661,508	9.4
1961	10'420,357	1'901,927	18.3
1972	14'121,564	3'418,452	24.2
1981	17'622,231	4'835,793	27.2
1993	22'639,443	6'434,323	28.4

Fuente. (INEI, s.f.)

<https://proyectos.inei.gob.pe/web/biblioineipub/bancopub/est/lib0002/cap0101.htm>

La misma publicación del INEI (s.f.), muestra como a partir de 1940, la proporción poblacional del área metropolitana Lima – Callao, empieza a crecer a tasa mayor al del crecimiento poblacional nacional, crecimiento que luego se hace explosivo (Cuadro 9). En 1940, la metrópoli representaba ya casi el 10% del total de la población nacional, pero solo 22 años después la ciudad pasó a contener la cuarta parte de los habitantes, y actualmente ya supera la tercera parte de la población del país viviendo en la megalópolis. La alta proporción poblacional limeña de las últimas décadas, es producto de masivas migraciones internas debidas al severo centralismo que afecta la nación, sin que ninguna medida intentada (como la fallida descentralización del año 2002), haya tenido algún efecto mitigante. Cabe agregar que poco antes de la reciente pandemia (y también durante esta), se produjo una migración externa atípica al Perú, que trajo casi un millón y medio de venezolanos, de los que al menos 2/3 se emplazaron en la Gran Lima, causando un aumento y presión poblacional adicional en la ciudad, nada desdeñable.

El espacio urbano ocupado por Lima en 1940 era aproximadamente 10 veces mayor al que tenía Lima virreynal de 1746; pero este espacio es menos del 10% del que ocupa hoy la zona metropolitana, que se ha extendido en una muy alta proporción solo desde mediados del siglo pasado, cuando se inició un crecimiento explosivo del espacio territorial limeño, fenómeno que a la vez ocurrió con una cada vez mayor densificación poblacional de cada distrito. Es decir, la ciudad no solo es cada vez más grande en extensión, sino cada vez

más densamente habitada por unidad de superficie ocupada, sobre todo en los distritos y barrios más pobres y populosos. Cabe notar que el acelerado crecimiento poblacional porcentual de la gran Lima no ha amenguado en los años actuales, pese a la marcada disminución de la natalidad en el país.

Silgado (1978), citado en Aparcana et al. (2022, pág. 3), señala que el sismo de 1940 dejó 179 fallecidos y 3,500 heridos en Lima, y 100 muertos y 2,000 heridos en el Callao. Para una población metropolitana de ese año, de 661,508 habitantes (Cuadro 9), en porcentaje de víctimas mortales fue “solo” 0.06% de la población total de Lima y Callao, mucho más bajo que el causado por el sismo y tsunami de 1746 (8 a 9% de la población total). El número de heridos ya es cuantioso (0.8%). La Figura 47, presenta las isosistas sobre el llamado norte “chico” de Lima, tanto el del año 1940, como el que ocurrió subsiguientemente, en 1966, que tuvo similar magnitud y origen de ubicación.

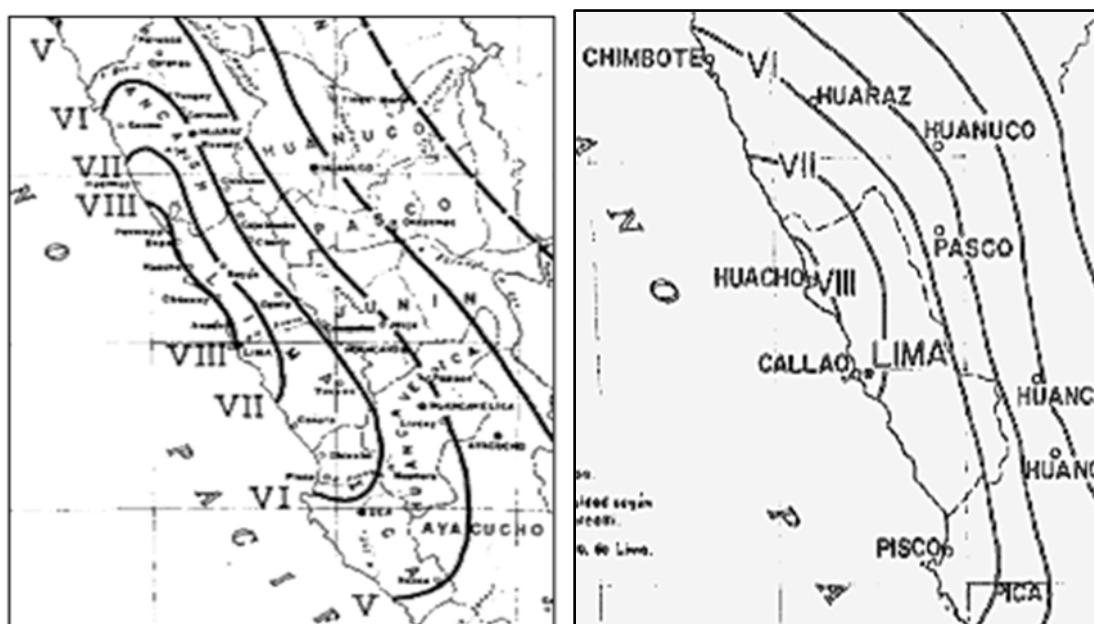


Figura 47. Isosistas de los terremotos de Lima de 1940 y 1966

El mapa de la izquierda muestra las isosistas (Mercalli Modificada), del sismo de 1940, y el de la derecha, de 1966. Las isosistas muestran que la magnitud de los daños y los lugares donde estos se produjeron fueron muy similares en ambos sismos. *Fuente.* (Silgado, 1978, págs. 60-69), recortes parciales).

En ambos mapas y sismos se aprecia que el valor VIII a IX (destrutivo a altamente destructivo) estuvo muy pegado al litoral del llamado norte chico en ambos casos (Huacho, Supe, Chancay, etc); le siguen con intensidad VII a VIII, la zona costera interior, que incluye la ciudad de Lima, y toda la zona

donde se encuentran la mayoría de los actuales terrenos de los Conos Norte, Este y Sur, y parte del abanico aluvial del Rímac, incluyendo los cerros que bordean Lima antigua y tradicional. Siguiendo hacia el este, le siguen los terrenos de la Sierra baja y media, con valores de intensidad sísmica de VI a VII. Las ciudades Huaraz, Pasco e Ica se muestran en el terremoto de 1966, en intensidad V, ya sísmicamente irrelevante.

Otras fuentes consultadas toman los datos dados por Silgado, pero no se indican números de víctimas en los pequeños poblados del norte chico, donde los efectos destructivos fueron posiblemente en proporciones, mayores a los habidos en Lima. A falta de datos o de imprecisión en ellos, cabe suponer un relativo mayor número de víctimas en términos porcentuales en esas localidades. En cambio, los daños materiales sí fueron cuantiosos, y así, Aparcana et al. (2022, pág. 3), citando a Silgado (1978), describen que:

“El 38 % de las casas de quincha fueron afectadas, el 23 % de adobe, el 20 % de ladrillo, el 9 % de cemento, 10 % de diversos materiales. Algunas casas modernas sufrieron daños debido al tipo de suelo en el que estaban construidas, como en Chorrillos —el distrito más dañado— que era una zona próxima a barrancos de terreno aluvial, o el puerto del Callao, que presentaba un terreno arenoso saturado de agua”.

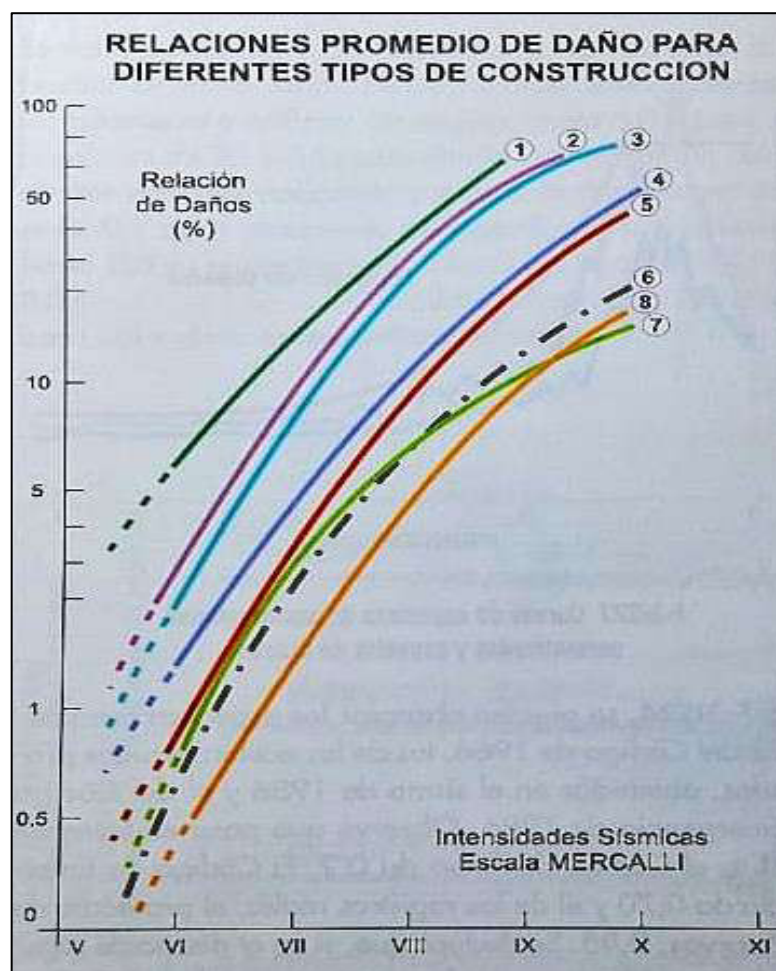
Silgado (1978, pág. 58), también describe algunos efectos destructivos en la Sierra de Lima, indicando, por ejemplo, que el poblado de Huascoy (cuenca media alta del río Huaura) y varios pueblos de la cuenca media del río Chancay quedaron totalmente destruidos; Indica también que se produjeron numerosos derrumbes en los cerros de los valles que descienden a la Costa.

La geografía de la ciudad de Lima de 1940 todavía tenía una alta proporción de viviendas de material precario, y de ellas, casi el 40% de las construidas con quincha y poco más de la quinta parte hechas con adobe fueron severamente afectadas; también casi la quinta parte de viviendas de ladrillo fue afectada, y menos del 10% en viviendas con cemento, confirmando así lo peligrosas que son las viviendas de quincha y adobe. Pero, hay que hacer salvedades, como los tipos de suelo en que estas se hallan, además de su

antigüedad, altura y estado de conservación. Por ello, aunque son edificaciones hechas con material de alto riesgo, no cabe generalizarlas a un comportamiento sísmico uniforme, ya que, históricamente en la Costa, diversas estructuras prehispánicas de adobe han resistido sismos (si bien, no todas). Respecto a las viviendas de ladrillo, estas tuvieron un porcentaje destructivo apenas superior a las de adobe, lo que sugeriría defectos severos de técnica constructiva, como la “autoconstrucción” mala calidad del ladrillo y/o la ubicación de estas viviendas en suelos de baja calidad geotécnica, criterios también aplicables a las viviendas hechas con cemento.

La Figura 48 muestra relaciones entre daños por sismos y tipos de construcción, establecidas en base a experiencias realizadas principalmente en Centroamérica. La Figura 48 demuestra que la relación entre daños por sismos y tipos constructivos es directa, y si bien, fue establecida por su autor Frank Sauter en base a experiencias foráneas, el reconocido experto peruano Julio Kuroiwa, señala que él verificó estas relaciones con los estudios de campo que realizó en el Perú durante 35 años (Kuroiwa J. , 2005, pág. 122).

La mala calidad de los materiales y deficiencias constructivas son hechos muy conocidos de hace siglos, siendo un problema de muy larga data, por los altos costos que tienen las edificaciones seguras, muchas veces inalcanzables para países, sociedades o grupos poblacionales de bajos ingresos. Este problema se agrava cuando debe construirse en suelos poco aparentes que, en muchos casos, son los únicos o accesibles para la población más necesitada. En este sentido, deben valorarse los esfuerzos de destacados profesionales de la ingeniería civil en el mundo, quienes, reconociendo la peligrosidad sísmica de materiales como el adobe, quincha y otros, han desarrollado mejores formas constructivas para estos materiales, reduciendo su vulnerabilidad en estas edificaciones, entendiendo la realidad de muchas poblaciones pobres forzadas a construir y convivir con estos materiales para cubrir su necesidad de vivienda. Siendo un esfuerzo valioso y muy bien intencionado, el peligro no necesariamente se elimina, y pudiera incluso resultar contraproducente.



1. Adobe. 2. Albañilería No Reforzada. 3. Estructuras de concreto reforzado (CR) sin diseño sísmico y con defectos de estructuración. 4. Albañilería reforzada de calidad media sin diseño sísmico. 5. Estructuras de CR con diseño sísmico (Normas anteriores a los años 80). 6. Edificios con paredes de corte de CR diseño sísmico (Normas posteriores a los años 80). 7. Viviendas de estructura de madera (y quinchahareque). 8. Albañilería reforzada de alta calidad con diseño sísmico. También edificios de CR con Normas de los años 90, simetría en planta y elevación y deflexión lateral controlada

Figura 48. Relaciones de daños por sismos y tipos de construcción

La Figura muestra 8 tipos de construcción entre materiales y técnicas empleadas frente a porcentajes de daños causados por sismos medidos en intensidades Mercalli Modificada (MM). Con adobe (curva 1) se tiene casi 100% de pérdida de edificaciones con una MM de IX, mientras que las curvas 2 y 3 requieren de IX a X para llegar al mismo porcentaje de afectación de viviendas que tiene la curva 1. La curva 8 comprende edificaciones donde menos del 10% han sido afectadas severamente solo a partir de la intensidad VIII, llegando a 40% en la intensidad IX. El esquema fue establecido por Frank Sauter, en Costa Rica, *Fuente*. (Kuroiwa J. , 2005, pág. 122).

Considerando la severa magnitud que tuvo este sismo de 1940, el número de víctimas fatales y heridos fue bastante reducido frente a lo que se puede

esperar, sobre todo con las muchas viviendas que todavía existían de adobe y quincha, destruidas total o parcialmente. El hecho de que este sismo ocurrió antes de mediodía fue determinante para que se salven muchos habitantes. Si hubiera sido nocturno, los pobladores no habrían tenido tiempo suficiente para ponerse a buen recaudo en horas de pleno descanso, pudiendo haberse visto en mucha mayor cantidad, atrapados o sepultados por la caída del alto porcentaje de edificaciones que cayó según las anotaciones de la época.

4.1.5.2. El terremoto de 1966

El viernes 17 de octubre de 1966, a las 4.40 de la tarde, cuando Lima ya era una metrópoli casi consolidada, un sismo de $M: 7.5$, estimada por Lomnitz y Cabre (1968); Silgado (1977) y Beck y Nishenko (1990), citados en el Cuadro 8 (pág. 108), de Tavera et al. (2016), atribuyéndole una profundidad bastante superficial de 38 km. Su hipocentro fue bajo el mar frente a Huacho, muy cerca del epicentro del sismo de 1940. Este fue el primer sismo severo en el país del que se tuvo registro instrumental y, similarmente al de 1940, fue un terremoto del llamado norte chico, ocurrido entre 100 a 150 km al noroeste de la metrópoli, distancia que también redujo en algo la potencia con la que se desencadenó el sismo sobre la ciudad. Otra condición parecida al de 1940, fue que ambos sismos fueron diurnos y sucedidos en días laborables.

Si bien los investigadores citados en el Cuadro 8, le asignan una magnitud de 7.5, otros, como Jiménez et al. (2016, pág. 1) indican una magnitud de 8.1 Mw. Las sucesivas correcciones y ajustes en los métodos de medición que se vienen realizando en el mundo desde mediados del siglo pasado, hacen más compleja la caracterización de la potencia real de los sismos ya que, considerando una variación logarítmica, un sismo de 8.1 es ~ 4 a 5 veces más potente que uno de 7.5. (ver Cuadro 3, pág. 38).

Para 1966, la geografía de Lima había variado significativamente desde el terremoto de 1940. La ciudad se acercaba a 2 millones de habitantes (el triple que en 1940 como se aprecia en el Cuadro 9, pág. 152), y la ocupación del

suelo también se expandió radicalmente. Para 1966, la Ciudad Universitaria (CU) sanmarquina ya tenía algunas de sus edificaciones, y la Unidad Vecinal de entonces (al lado de la CU) ya estaba construida. No obstante, quedaban aún en el amplio abanico aluvial del río Rímac entre Callao y Lima, amplios espacios agrícolas en proceso de urbanización (por ejemplo, aún no existía la ciudad universitaria de la Universidad Católica), terreno que aún era un espacio agrícola y ganadero.

El centro se densificó en población, con un proceso de tugurización que ya existía en viviendas casi siempre de material precario (callejones y antiguas quintas limeñas), que cada vez alojaban más inquilinos y propietarios. Los cerros colindantes habían empezado a ocuparse desde mediados de los años 50, apareciendo así el inicio del actual Cono Este en contacto con Lima tradicional céntrica. El lugar del aeropuerto actual, y prácticamente todo el Cono Norte eran todavía terrenos rurales, lo mismo que los distritos del sur, desde Surco. Las áreas urbanizadas del Cono Sur eran incipientes y no existía aún Villa El Salvador. Es en este contexto, en que ocurre el sismo diurno de 1966, sobre una ciudad, ya bastante grande (ver Figura 49) que, aun así, tenía la quinta parte de la población que tiene la metrópoli actual.

Entre los datos cuantitativos de la potencia del sismo (que no se tenían para los sismos de años anteriores), Silgado (1978, pág. 98), describe que: “La aceleración registrada en Lima estuvo acompañada de períodos dominantes del orden de un décimo de segundo. La amplitud máxima fue de 0.4 g., entre ondas de aceleración menores de 0.2 g.”.

Los valores de aceleración de 0.4 g, se consideran como severos con potencial de daños moderados a fuertes. Esta amplitud alcanzada por el sismo, significa que el suelo se movió con una aceleración máxima de 0.4 veces la aceleración de la gravedad, y si los períodos son del orden de 0.1 segundos, resultan ondas sísmicas de alta frecuencia. Combinando alta frecuencia y elevadas aceleraciones, los efectos sísmicos se magnifican sobre las edificaciones, explicando en parte el alto nivel de destrucción de muchas viviendas, en su mayoría de material precario, como también ocurrió durante el sismo de 1940, variando, sin embargo, para distintos tipos de suelo.

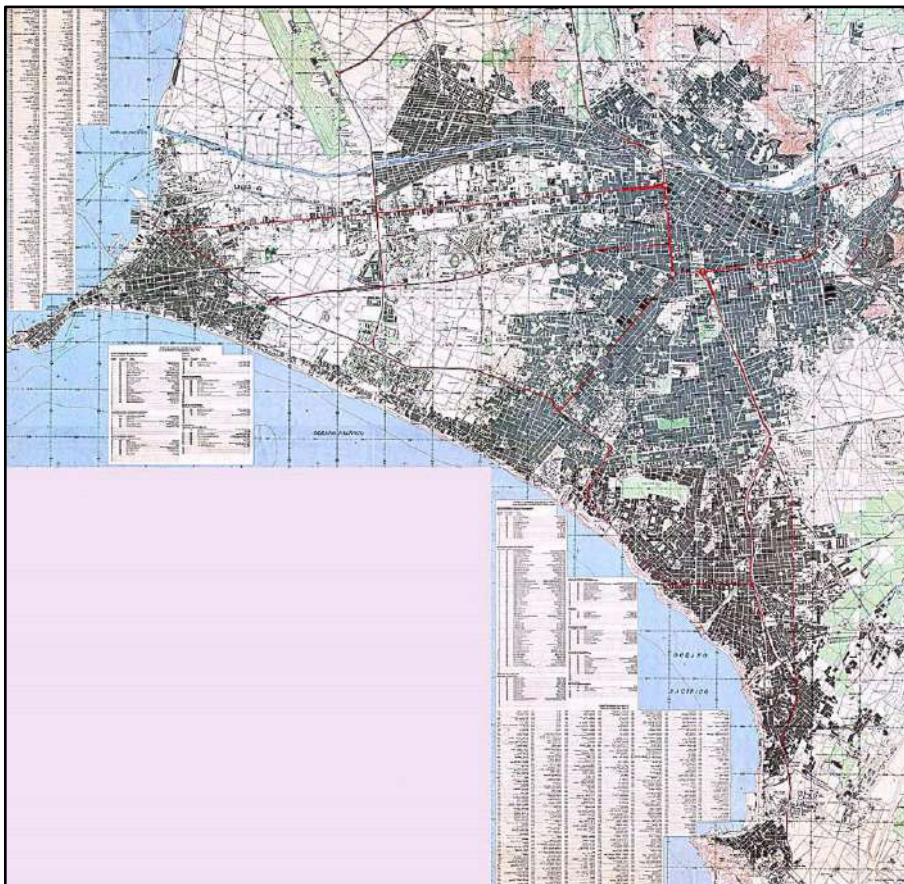


Figura 49. Mapa de Lima y Callao en 1970

Comparando visualmente los mapas de 1940 (Figura 46) y 1966 (Figura 47), se aprecia que la ocupación del suelo en Callao no varió significativamente, pero sí la de Lima, que se densificó y amplió en todas direcciones, aunque todavía subsistía la discontinuidad urbana entre Lima y Callao, con amplios espacios no urbanos en el amplio abanico aluvial del Rímac. *Fuente.* (Plano histórico de Lima, 1970).

<https://lima2000.com/wp-content/uploads/2016/12/1970plano90.jpg>

Una nota sísmica muy importante (Silgado, 1978, pág. 101), es la siguiente:

“Según el informe de la UNESCO, los edificios altos, a pesar de la aparente falta de resistencia lateral de muchos de ellos, en su mayoría no sufrieron daños de consideración, lo cual estaba ligado seguramente a los períodos largos de oscilación comparados con los períodos dominantes del sismo y la lejanía del foco”

También Silgado (1978, pág. 98), entre los numerosos testimonios de esos años, describe uno expuesto por un docente sanmarquino de la época (no indica su nombre):

“Estaba en el sótano de la Ciudad Universitaria finalizando mi clase, cuando mis alumnos y yo sentimos un temblor, al cual no dimos importancia, pero como este arreciaba, nos protegimos bajo el pórtico de la salida. Llegó un momento en que era difícil mantenerse en pie; luego, en un instante el edificio crujía y se bamboleaba tan peligrosamente que creí se iba a desplomar. Había rotura de vidrios por doquier y el ruido era enorme, Felizmente las trepidaciones disminuyeron hasta desvanecerse. Habían pasado más o menos 40 segundos y pudimos salir del sótano del edificio”.

En general, la condición del suelo de toda la Ciudad Universitaria es de mediana a buena calidad geotécnica (la que predomina en el amplio abanico aluvial del Rímac); suelos granulares gravo arenosos con frecuencia mediana a bien graduados y con napas freáticas profundas (a más de 40 y 50 m). Los efectos narrados por el docente que hizo el testimonio, fueron sin duda mayores en zonas de suelos limeños de menor calidad geotécnica, como los arenales, o en los suelos finos de napas freáticas superficiales, que ambos por entonces, casi no tenían edificaciones.

Respecto a los cambios en la geomorfología del área y los efectos sísmicos sobre las edificaciones Silgado (1978, págs. 98-101), pone en evidencia numerosas situaciones, como, por ejemplo:

- ♦ Que en los terrenos de la hacienda San Nicolás (por entonces, Km 156 de la carretera panamericana norte), aparecieron numerosas grietas de las cuales brotó agua de color amarillo. En otras zonas cercanas también hubo agrietamientos y hasta pequeños asentamientos del terreno. (Silgado cita uno de 15 cm).
- ♦ Derrumbes en los cerros por los valles que ascienden a la Sierra, tanto en la carretera central, como en la vía a Canta.

- ♦ Derrumbes en los acantilados, desde Chorrillos hasta Magdalena, en lo que actualmente se conoce como Costa Verde¹⁹.
- ♦ Serios efectos destructivos en la mayoría de edificaciones de adobe, en viviendas antiguas y en lugares de suelo poco consistente (como actualmente se reconoce en sectores de arena fina, de napa freática superficial, entre otros).
- ♦ Algunos daños severos en edificios modernos de material noble.
- ♦ Un pequeño tsunami se desencadenó en varios lugares de la Costa (La Punta, en el Callao, Chimbote, Casma, Tortugas y San Juan), esto en los 50 minutos posteriores al sismo.

Este sismo de 1966, cuya magnitud, finalmente estimada en ~ 7.5 , provocó severos daños en viviendas precarias, no así en las de material noble ni en las edificaciones más altas. El Ministerio de Educación, situado en el Parque Universitario, con 21 pisos, era el más alto de la época, y solo había unos pocos que se le acercaban, con excepción del Residencial San Felipe, en Jesús María, con 33 edificios de 10 a 15 pisos, recién construidos para esos años, que no tuvieron afectación significativa por el sismo. Este es un hecho que resulta positivo o alentador si se piensa en la Lima actual, ya sembrada con cientos de edificios entre 20 y 35 pisos.

Sin embargo, la relativa distancia al epicentro (frente a Huacho), habría ejercido alguna disminución en su potencia, aunque hay que considerar que este sismo fue seguramente más superficial que el de 1940. De alguna forma también, este sismo podría demostrar que, para los suelos estándar del abanico aluvial limeño, las edificaciones altas de material noble y medianamente bien construidas pueden soportar sismos de este orden de magnitud ($\sim 7.0 - 7.5$), por lo menos en los suelos de mediana a buena calidad geotécnica como los que predominan en el amplio abanico aluvial limeño.

El número de víctimas mortales fue también felizmente bajo, definido por las autoridades de entonces en ~ 100 personas (Jiménez et al. (2016, pág. 1), y

¹⁹ Como anotación personal cabe mencionar que el cielo vespertino de Magdalena se oscureció con la polvareda levantada en los derrumbes de los acantilados litorales de la actual Costa Verde.

Silgado (1978, pág. 97). En cuanto a heridos, una reciente publicación diaria de “El Comercio”, tomando sus reportes propios de la época, indica unos 500 heridos, aunque reconociendo que algunos diarios exageraban con números de hasta 3,000 heridos, saldo que, a pesar de todo, es bastante bajo, lo que se debe sin duda a las razones siguientes:

- ❖ Sismo no muy severo (M : ~ 7.5) de epicentro ligeramente lejano (Huacho) y, sobre todo, diurno (tarde de un día laborable usual).
- ❖ Por entonces Lima, iniciaba un proceso de relativa densificación de la ciudad, ocupando sobre todo los suelos de mediana a buena calidad geotécnica del amplio abanico aluvial del Rímac. Los suelos arenosos, los de napas freáticas superficiales, los depósitos coluviales gruesos de los cerros de mayor pendiente, entre los principales de los más riesgosos, no tenían todavía edificaciones, o estas eran muy puntuales.
- ❖ La metrópoli, aunque ya expandida y con casi 2 millones de habitantes, era una ciudad extensa, pero de baja altura y bajo nivel de complejidad constructiva; solo tenía unos pocos edificios de menos de 20 pisos. Las avenidas y calles eran en su mayoría relativamente amplias para la altura de las casas que las bordeaban. En toda la ciudad había un único paso a desnivel (entre las avenidas Javier Prado y Arequipa), y la actual vía expresa Paseo de la República recién había empezado a construirse el año del sismo; ninguna otra vía expresa o viaducto existía por entonces.

4.1.5.3. El terremoto de 1974

El jueves 3 de octubre de 1974, a las 9.21 de la mañana, un fuerte sismo bajo el mar se produjo al suroeste de la ciudad de Lima, cerca de Chilca. El IGP (1974); Herrera y Giuliani (1975); Espinoza et al. (1977) y Giesecke et al. (1980), citados en el Cuadro 8, (pág. 108), le asignaron una M : 7.5^{20} , y

²⁰ Posteriormente, Tavera, presidente del IGP, en presentación pública, le asignó una M : 7.8 y 8.0 Mw, que es bastante más potente de lo estimado inicialmente. Fuente: (IGP, 2020b)

profundidad de ~ 13 km; es decir, un terremoto muy superficial, hecho que sin duda tuvo fuerte incidencia en la potencia con que las ondas sísmicas golpearon la ciudad. Fue el último sismo severo ocurrido hasta hoy en la capital, y a diferencia de décadas pasadas, cuando sismos más o menos violentos o similares a este de 1974, ocurrían a ritmos de 2 o 3 décadas como máximos usuales, en octubre de este año (2025) se cumplen 51 años de relativo silencio sísmico sobre la capital, lo que seguramente ha aumentado la energía que puede ser liberada en un sismo siguiente (ver sección 2.2.5. págs. 86-88, a propósito de las “asperezas”).

Este sismo tuvo una duración inusual, de poco más de 2 minutos, hecho un tanto extraño para la población (acostumbrada a que los sismos duren entre medio minuto o un minuto como máximo). Como se ve en la sección 2.2.3.4. Duración pág. 42, las vibraciones prolongadas producidas por un sismo no solo afectan en mayor medida a las edificaciones que las soportan, sino que resultan más aterradoras a la población que las percibe. No obstante, los testimonios de sobrevivientes que relatan sismos muy antiguos (como el de Arica, 1868, y también en otras partes del mundo), se ha citado duraciones mayores a tres minutos e incluso hasta cuatro. El terrible terremoto de Japón de 2011, de M: 9.0, ha tenido una duración estimada de 160 segundos (Susuki et al., 2011) citados en Goto & Morikawa, (2012, pág. 772), y el de México de 1985, hasta 180 segundos en los suelos pantanosos del lago Texcoco en la ciudad capital (Kuroiwa J. , 2005, pág. 112). Algunos autores generalizan las duraciones a valores aún mayores²¹.

Silgado (1978, pág. 112), indica que por este sismo fallecieron en total 78 personas, dato replicado en la web por diversas instituciones. Sin embargo, el IGP (2019), en presentación pública indica que, en base a los registros del INDECI, en total murieron 250 personas, 3,600 heridos y 2,700 millones de

²¹ Como se ha visto, la duración de un sismo es relativa porque depende de muchos factores. Varía con la magnitud, pero también con los tipos de suelo, ya que un mismo sismo puede “durar” más en un suelo blando que en uno rocoso o duro. También, en edificaciones altas, las oscilaciones duran más que en la superficie al aire libre o en edificaciones bajas. Aun así, a igualdad de condiciones, un sismo severo de mayor duración tendrá mayor efecto destructivo sobre las edificaciones que uno más corto.

soles en daños materiales²². A pesar de tal incongruencia de datos, se puede considerar que, igual que en los sismos anteriores de 1940 y 1966, este de 1974 también tuvo bajas consecuencias en cuanto a pérdidas humanas.

A diferencia de los sismos de 1940 y 1966, cuyos epicentros estaban centrados un poco al norte de Lima (latitud aproximada entre Supe y Huacho, entre 100 y 150 km al norte de Lima) que afectaron sobre todo al llamado norte chico, el sismo de 1974 tuvo su epicentro entre 50 y 70 km al suroeste de Lima, el cual, por una mayor cercanía que los sismos del norte chico, habría golpeado con cierta mayor dureza a la ciudad capital y al llamado sur chico, que por entonces se hallaba muy poco poblado.

La ya muy rápida cambiante geografía urbana de la ciudad de Lima para 1974 se puede ver en el Cuadro 9 (ver pág. 152), en que la ciudad ya había sobrepasado 3 millones y medio de habitantes, frente a los menos de 2 millones del sismo de 1966 y los menos de 700,000 del sismo de 1940. Es decir, en solo 34 años, de 1940 a 1974, la población metropolitana de Lima y Callao creció casi 6 veces; un ritmo descomunal que haría muy difícil cualquier tarea de planificación urbana, incluso en los países mejor desarrollados; peor aún en un país en severa crisis socioeconómica, con gobierno dictatorial y en pleno centralismo desbordado. En cuanto al espacio ocupado por la urbe, la ciudad se expandió en muy alta proporción, pero menor al del crecimiento poblacional, lo que sugiere una consolidación de la densificación urbana de la ciudad para esos años. La Figura 50 muestra de modo aproximado el espacio ocupado por la urbe en 1974, frente a la ocupación de suelo ya casi actual (2018), mostrando el enorme crecimiento poblacional y territorial ocurrido en las décadas siguientes al sismo de 1974.

²² La cuantificación de muertes, heridos y daños materiales y económicos que deja un desastre tan crítico como un sismo severo es una tarea muy difícil, que implica desarrollar un conteo tan amplio en las condiciones más extremas de complejidad; donde, además, no es fácil discriminar la causa de las fatalidades, accidentes y daños, sin olvidar la falta de rigurosidad que con frecuencia existe en las personas e instituciones encargadas. Por ello, los resultados deben tomarse siempre como referenciales dentro de cierto orden de magnitud, a pesar de que, como en este caso, los datos de muertes difieren casi en 4 veces.

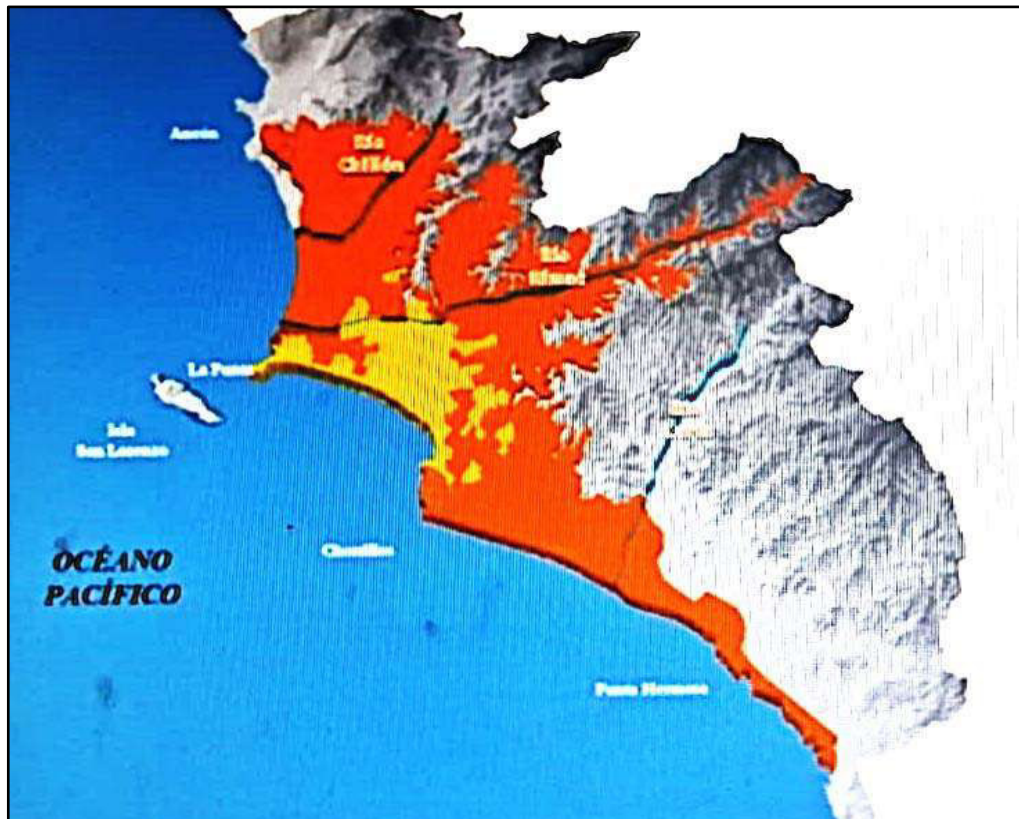


Figura 50. Ámbito urbano de Lima Metropolitana en 1974 y 2018

La Figura muestra la ocupación territorial de la metrópoli en 1974 (amarillo) y en 2018 (rojo). Hasta 1974, la ciudad se ubicaba principalmente en los suelos del amplio abanico aluvial del Rímac, pero en los años 2000 la ciudad creció intensamente hacia el norte (San Martín de Porres a Puente Piedra y Ancón) y al noreste (valle del Chillón), de Comas a Carabayllo y valles menores de quebradas secas en San Juan de Lurigancho. Hacia el este, la ciudad creció por el valle del Rimac y algunos valles tributarios de quebradas secas (Jicamarca y Huaycán), casi hasta llegar de forma continua a Chosica (a 1,000 msnm). Hacia el sur, ya en 1974 existía Villa El Salvador, y se hizo denso el extenso piedemonte de San Juan de Miraflores, Villa María, Pachacamac y Lurín, hasta casi llegar a Chilca, al sur de Punta Hermosa. *Fuente.* (IGP, 2020b). <https://www.youtube.com/watch?v=r7JbEhfoFUU>

Para 1974 se ocuparon ya todos los amplios suelos del abanico aluvial del Rímac, que quedaban todavía como tierras agrícolas entre Lima y Callao, principalmente con gente de clase media. Los distritos tradicionales como Lima Cercado, Rímac y La Victoria se densificaron hasta tugurizarse, tanto por el intenso fenómeno migratorio desde las provincias mayormente andinas, como por la intensificación de la crisis económica que se arrastraba desde los gobiernos civiles y militares de entonces. Aparecen incipientes, la población

de los Conos Norte, Este y Sur bordeando la Lima antigua, y se intensificó el proceso de ocupación de los cerros más cercanos al centro.

El sismo ocurrió en octubre, 4 años después del terrible sismo de 1970 en Ancash, y 8 años después del sismo de 1966. Como la población limeña también sintió fuertemente el sismo de 1970, se remarcó la creencia eventual sobre un sismo fuerte cada 4 años. Así, en 1976, un científico estadounidense, Bryan Brady, difundió su predicción supuestamente basada en rigurosos estudios y cálculos, de que un sismo de inmensas proporciones, cataclismo de orden mundial ($M > 9$ a 9.5), ocurriría en julio de 1978 bajo el mar, en las cercanías de Mala. (Redacción Perú21, 2019) Al acercarse esa fecha y en los meses siguientes, el terror en Lima, sobre la probabilidad de que un terremoto de ese orden pudiera ocurrir se fue intensificando. Al no ocurrir sismo alguno en el mes indicado y subsiguientes la penosa sensación se fue relegando. Han pasado ya 51 años sin que haya habido un sismo severo sobre la capital.

Con la instrumentación, para 1974, se tuvo mediciones y mapeos más detallados. Tavera (IGP, 2020b) señala que, en el Parque de la Reserva y en Surco, la aceleración fue de 192 y 207 cm/s^2 respectivamente durante el sismo. Tavera indica en dicha presentación, que en la mayoría de suelos de Lima, las aceleraciones producidas por el sismo de Pisco de 2007 (epicentro a más de 200 km de distancia), los valores fueron de la mitad. La Figura 51, mostrada en dicha presentación, plantea un gráfico comparativo que relaciona la magnitud de los sismos habidos en el Perú, con la fuerza de las aceleraciones máximas alcanzadas en los mayores sismos del mundo. Se observa allí, que el sismo limeño de 1974 (Parque de la Reserva y Surco) tuvo aceleraciones máximas del orden de 1/3 de las que hubo en el terremoto de Arequipa (Atico) del año 2001, y de 2/3 de las que hubo en el terremoto de Pisco (Ica) el año 2007, y mucho menores aún respecto de las que ha habido en sismos mayores registrados en el mundo.

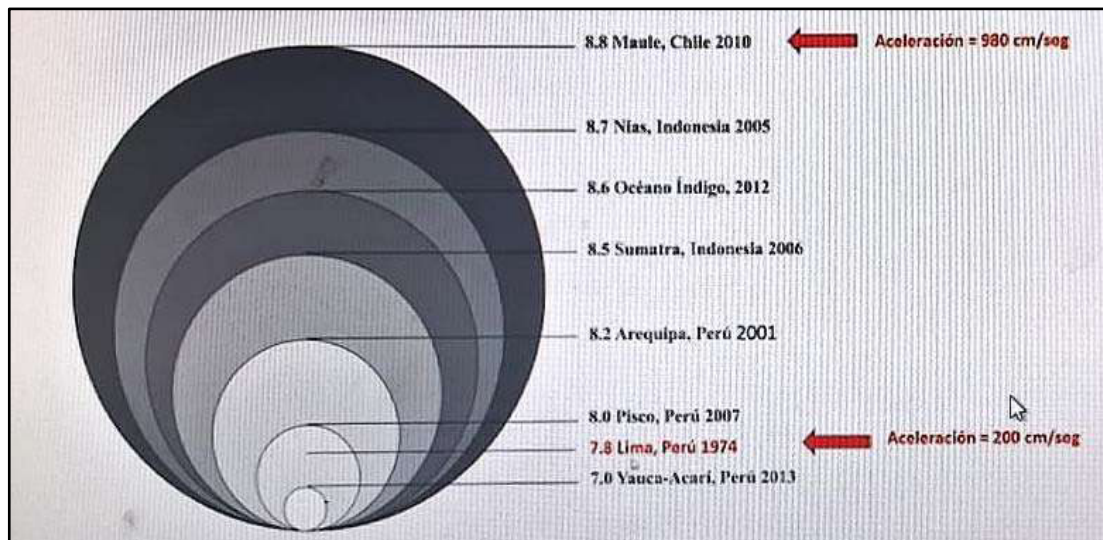


Figura 51. Comparativo de aceleraciones habidas en sismos

La Figura compara la severidad del sacudimiento del suelo en diversos sismos: el de M: 8.8, en Maule, Chile (2010), con aceleraciones que alcanzaron 980 cm/s^2 , comparado, por ejemplo, con los de Arequipa (M: 8.2), Pisco (M: 8.0) y Lima (M: 7.8), de aceleración alcanzada de 200 cm/s^2 . Fuente. (IGP, 2020b) <https://www.youtube.com/watch?v=r7JbEhfoFUU>

La Figura 52 muestra el mapa de isosistas del sismo de 1974, que presenta valores de afectación solo para el área de Lima tradicional, cartografiadas con mucho mayor detalle respecto a las obtenidas para los sismos anteriores. En esta Figura 52 se aprecia que, al igual que en los sismos de 1940 y 1966, los valores máximos fueron del orden de VIII, y mínimos de VI (daños ligeros) y V (efectos irrelevantes) para amplios sectores de suelos de mediana a buena calidad geotécnica. El mapa incluye apenas los bordes de los actuales Conos Norte, Este y Sur colindantes con la Lima antigua, ya que hace 50 años, los actuales Conos muy extensos y súper poblados casi no existían aún, y este es el tiempo en el que no han ocurrido sismos severos sobre la capital. En el mapa se puede ver que las intensidades dominantes producidas por el sismo de 1974 es el valor VI, ocupando el amplio abanico aluvial del río Rímac (Pueblo Libre, Breña, Magdalena, La Victoria, San Isidro. Esto se da también al norte del río Rímac (aeropuerto, San Martín de Porres, Los Olivos). Miraflores también tiene amplios sectores en esta intensidad, incluso con amplias áreas de valor V. Surco y el Callao, que tienen amplios sectores en nivel VI, incluyen también sectores importantes en valor VII. La Molina y

Chorrillos, así como barrios del sur, por entonces aún muy poco poblados), tienen valores de VII a VIII; algunos sectores de Chorrillos llegaron a valor IX.

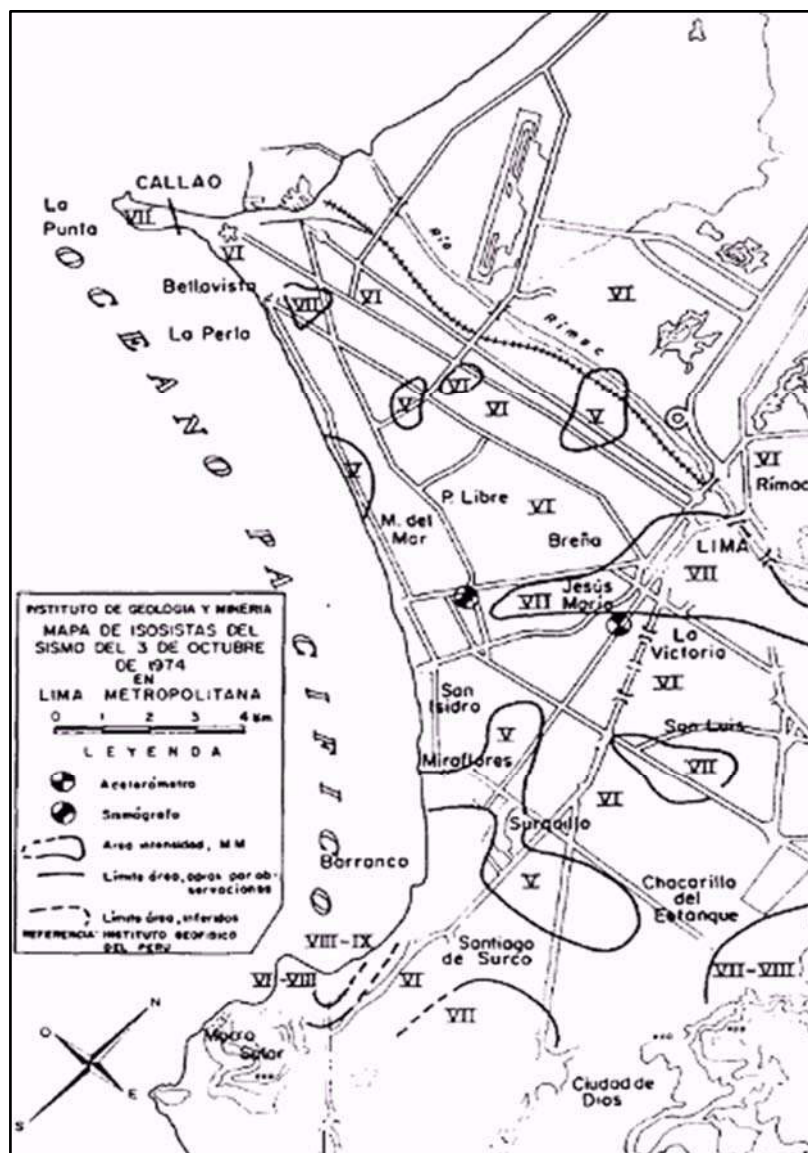


Figura 52. Mapa de isosistas en Lima y Callao por el sismo de 1974
 Fuente. Silgado (1978, pág. 114).

4.1.5.4. Lima actual y otras ciudades ante un sismo severo

A lo largo de los siglos, la población limeña ha enfrentado sismos graves y muy graves, pero hace muchas décadas (y siglos) que no afronta un sismo de esa magnitud, y es muy probable que en algún momento de un futuro que no se sabe si inmediato o mediato, este ocurrirá. La megalópolis actual ya se

acerca a 12 millones de habitantes, pero en el último sismo grave de 1940, hace 85 años, la ciudad tenía solo el 6% de la población que hoy tiene.

Pero, es muy sabido que este enorme crecimiento poblacional no se dio en un contexto de desarrollo sostenible, y si bien, el crecimiento económico, tecnología, infraestructuras, vivienda, servicios, globalización y tantos otros aspectos que la modernidad ha aportado a la sociedad, en cambio, muchos de los problemas sociales y económicos se han agravado sin que se prevea un cambio drástico, que por lo menos mitigue las grandes distorsiones que afectan al país, y a Lima en particular. El próximo sismo grave o muy grave, si ocurre en el corto o mediano plazo se dará tal vez en este contexto, y determinará muchas de las consecuencias durante y post sismo. Políticas erradas, corrupción, centralismo extremo, delincuencia severa, baja calidad educativa y productividad, y masas poblacionales en pobreza, han llevado a Lima y resto del país al caótico y crítico subdesarrollo urbano actual.

Históricamente, desde la Colonia, las ciudades del país se fueron ubicando allí donde había posible explotación de recursos y agua. Al principio, con poblaciones muy pequeñas que se emplazaban en los mejores suelos (los más llanos y menos expuestos a peligros visibles). El crecimiento poblacional surgía en las periferias, y es así, cuando en las ciudades andinas, las nuevas viviendas tenían que emplazarse en los cerros aledaños a los llanos estrechos de los fondos de valle. Lima fue fundada a orillas del Rímac como fuente de agua, y las viviendas sobre el suelo aluvial de calidad geotécnica media a buena. Pero, las edificaciones de adobe y quincha eran casi una trampa mortal en caso de sismos, aún en estos suelos aceptables. Desde el siglo pasado, cuando las ciudades empezaron a tener decenas y hasta centenas de miles de habitantes, la construcción de viviendas de material noble reemplazó a los materiales precarios, pero pronto, los suelos de buena o mediana calidad geotécnica fueron ocupados en su totalidad y, desde hace décadas, el crecimiento de muchas ciudades del país, entre ellas Lima, se ha dirigido a suelos no favorables. La población de los Conos construye en estos medios, no solo por pobreza, sino porque los mejores suelos están ya ocupados por los distritos de población más pudiente, como se ve en la Figura 53.

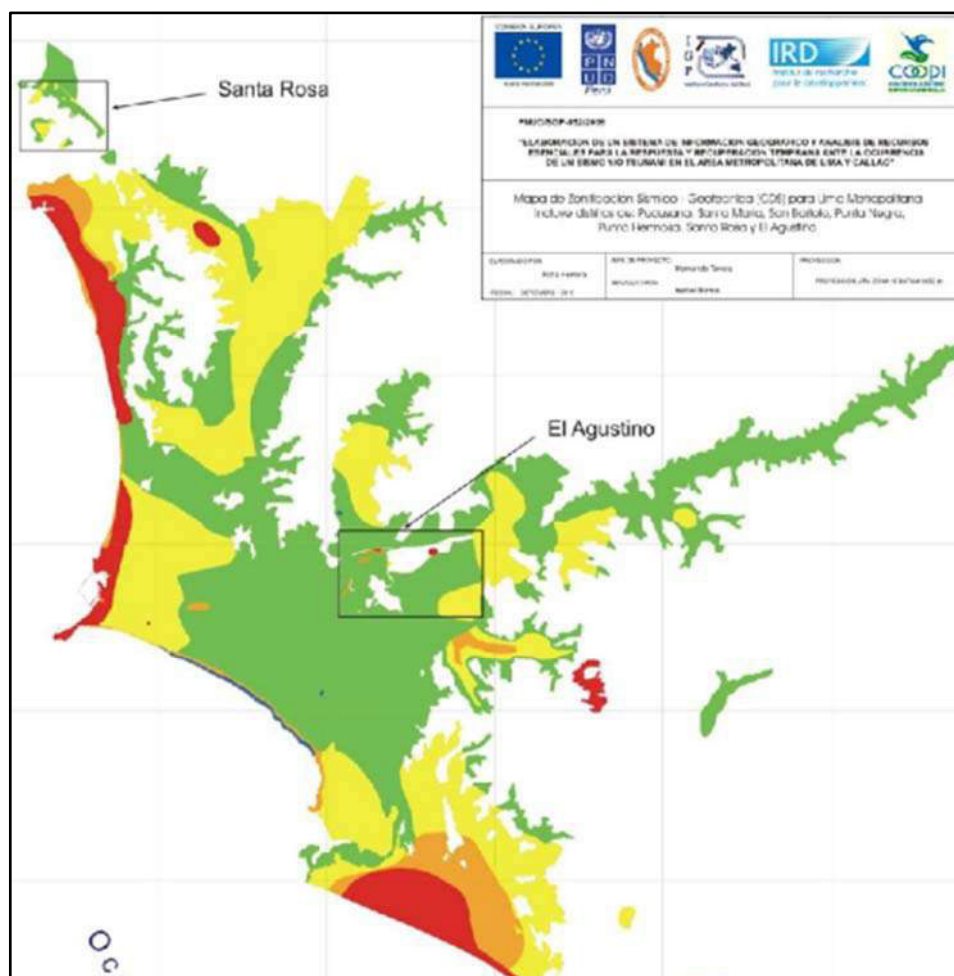


Figura 53. Mapa de Zonificación de suelos para Lima Metropolitana

La urbe se extiende en el piedemonte occidental andino, principalmente en el valle aluvional del río Rímac. En verde se muestran los mejores suelos aluviales, en amarillo aluviales, eólicos y coluviales algo restrictivos, en naranja suelos arenosos con peligro de licuación, las mismas condiciones, pero más graves en los suelos en rojo. *Fuente.* (Tavera, 2014b, pág. 11).

La población de los Conos, ha ocupado indistintamente los suelos arenosos del sur y norte, y de los cerros rocosos y de material coluvial suelto de los cerros que bordean Lima por el Este. El problema mayor es que muchas de estas viviendas, aunque de material noble, se han construido bajo criterios empíricos y no profesionales, y siguen creciendo hacia arriba con nuevos pisos a medida que crecen las familias. Ya hay amplios espacios de los Conos atestados de viviendas en condiciones precarias, y en los cerros, las viviendas cada vez se construyen más arriba, y ante un sismo severo pueden caer sobre las viviendas construidas más abajo. Y no es solo la caída de viviendas y escombros ante el probable sismo, sino enfrentar la situación post sismo. Al respecto cabe analizar las Figura 54 y Figura 55.

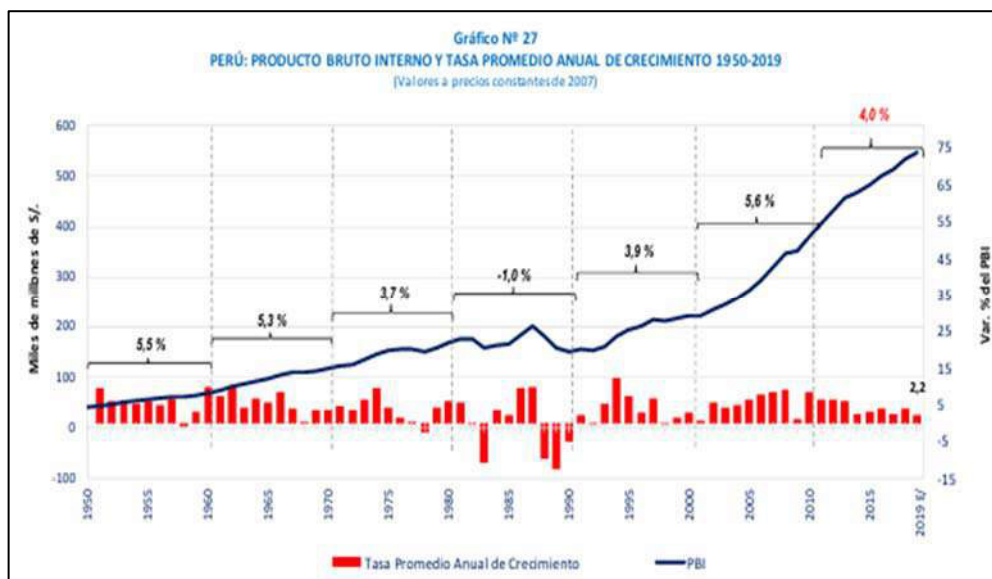


Figura 54. Crecimiento del PBI del Perú de 1950 a 2019

Fuente. (INEI, 2020, pág. 45)



Figura 55. Crecimiento % de población regional entre 1940 y 2017

Fuente: (INEI, 2017b, pág. 18)

https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1539/cap01.pdf

La Figura 54 muestra en curva, para un lapso de casi los 70 últimos años como ha ido creciendo el PBI, uno de los indicadores sociales y económicos más importantes. Entre 1950 y 1992, el PBI crecía leve a moderadamente, aunque con altibajos. El crecimiento se acelera aproximadamente el año 2002, hasta el año 2015, desde el cual el crecimiento se vuelve a moderar. La dinámica del PBI refleja también los períodos de relativa bonanza, y los de crisis, siendo estos últimos los más frecuentes y prolongados, sobre todo en el siglo pasado. Las crisis más agudas, como las habidas en las décadas 70 - 90, generaron condiciones de extrema pobreza cercanas al 40% de la

población nacional; por el contrario, los crecimientos intensivos (como entre 2000 y 2015), disminuyeron estos porcentajes a cifras de un dígito. La reducción fue constante de 2004 a 2019, pero a partir del año 2020 (la pandemia), la pobreza vuelve a incrementarse. La Figura 55 muestra la dinámica poblacional demográfica del país, donde se ve el fuerte crecimiento porcentual de la Costa y, por el contrario, una disminución del porcentaje poblacional viviendo en la Sierra.

La Costa, pasó de tener el 28.3% de la población nacional en 1940, a contener al 68.0%. en 2017. La Sierra era la región más poblada en 1940, cuando contenía al 65.0%; pero al 2017 pasó a tener solo el 28.1%. La Selva, era una región casi despoblada en 1940 en el que solo tenía al 6.7% de la población; pero, para 2017, este porcentaje se duplicó, y estas tendencias se mantienen actualmente. Las ciudades de la Costa y en especial la megalópolis limeña son las que reciben la cuantiosa migración andina, lo que en general aumenta su vulnerabilidad ante sismos severos, ya que la población migrante que llega por lo general se asienta en los Conos, de por sí, ya densamente poblados y en muchos casos hasta tugurizados.

Los cálculos y modelizaciones que se hacen actualmente con frecuencia, arrojan cifras de decenas de miles de víctimas fatales ante un sismo grave como el que se esperaría según los pronósticos basados en la acumulación de energía de la “aspereza” frente a Lima (págs. 86-88), pero es muy aleatorio, si por ejemplo un tsunami severo ocurriese luego de un potente sismo un día no laborable con un millón de personas hacinadas en las playas de la Costa Verde, casi sin escapatoria; o si el sismo ocurriese de noche, o en día de mucha actividad (procesiones, navidad), y el panorama es más desalentador aún ante posibles incendios, realidad hospitalaria, delincuencia, etc.

4.1.6. El Terremoto de Ancash de 1946

El 10 de noviembre de 1946, a las 12.42 pm, ocurrió un fuerte sismo en la Sierra noreste de Ancash, entre las provincias de Sihuas y Pomabamba, con referencias imprecisas; así, en los registros indicados en el Cuadro 8 (pág. 108), Silgado (1951) le asignaba originalmente una magnitud de 7.2 y profundidad de 30 km. Pero, posteriormente, Doser (1987) citado en Bellier et al. (1991, pág. 470), reajustó estas referencias llevándolas a una Mw 6.8 y profundidad de 15 a 17 km. Silgado (1978, pág. 67), indica que “murieron 1,396 personas, a pesar de la escasa densidad de población de esa zona”.

Aunque bastante superficial, este sismo es el que tiene la menor magnitud entre todos los sismos analizados en este capítulo, pero en cambio, el número de víctimas mortales que causó está entre los más altos habidos en el país, habiendo dejado un desastre humanitario de proporciones en la zona afectada. De otro lado, este sismo de 1946, juntamente con el de Moquegua del año 1600, son netamente andinos, habiéndose originado en la actividad de sistemas de fallas activas locales, a diferencia de los demás sismos considerados en este análisis, que tienen origen marino o costero en la subducción de la placa oceánica.

Bellier et al. (1991, pág. 468) señalan que este terremoto produjo fallas superficiales a lo largo de la falla de deslizamiento normal de Quiches, la cual ya era conocida como activa en estudios anteriores a los de Bellier. La Figura 56 presenta el trazo de la activa falla Quiches complementada con una imagen satelital Google Earth, donde se ha transpuesto la falla de forma aproximada.

En el Cuadro 1 (pág. 26) tomado de un estudio de Macharé et al. (2003), citado en Alva y Soto (s.f., pág. 10), se muestran las fallas activas reconocidas por sus investigadores en Perú, en el cual se aprecia la falla Quiches, calificada como de tipo normal y en actual proceso de movimientos, a una tasa menor a 1 mm/año, donde además se indica que el último movimiento registrado fue precisamente en el sismo de 1946.

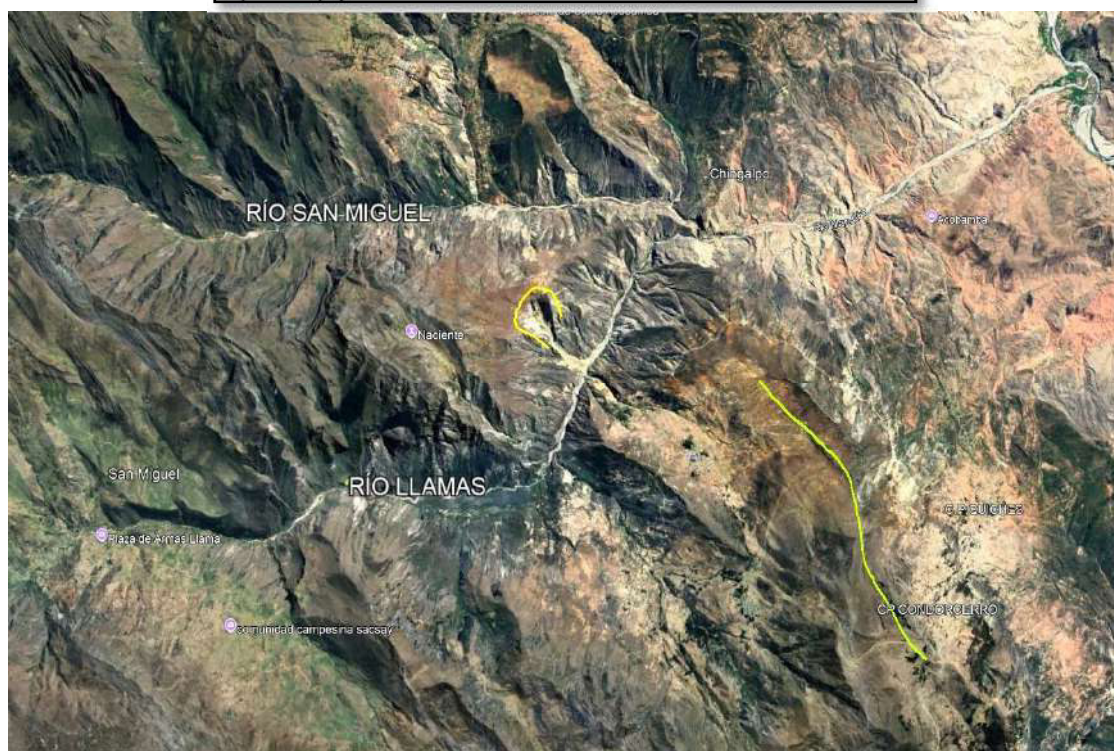
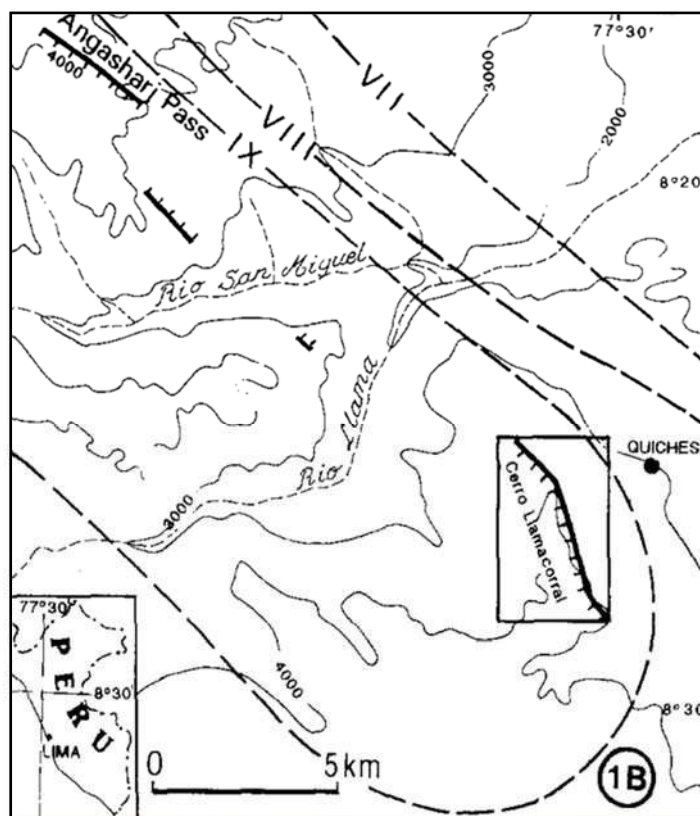


Figura 56. Isosistas del sismo de 1946 y zona de la falla Quiches

En el mapa se muestra el trazo de la falla en línea gruesa dentada, muy cerca del pequeño poblado de Quiches. Presenta también isosistas, de valores VII a IX, esta última cubriendo una amplia zona central, que incluye la falla. *Fuente.* de Bellier et al. (1991, pág. 469), y elaboración propia sobre la imagen.

La complejidad estructural geológica, la fisiografía de grandes laderas montañosas de pendientes muy pronunciadas, y la presencia de fallas activas, como la de Quiches, representan un elevado riesgo sísmico, porque si bien la sismicidad generada por la dinámica de las estructuras locales no tiene ni la magnitud ni la frecuencia de los grandes sismos marino costeros, en cambio, la orografía de Quiches agrava los efectos de la sismicidad. A esto debe agregarse como factor fundamental, que se trata de poblaciones que viven en pequeños poblados, pero que básicamente son socioeconomías rurales de bajos ingresos y nivel de vida, donde en la fecha del sismo de 1946, prácticamente todas las edificaciones eran de adobe y que aun actualmente, este material sigue siendo un componente importante en los poblados.

Los sismos severos en la zona andina son sumamente esporádicos, y aún en el caso de que las viviendas (ahora ya numerosas en material noble, pero autoconstruidas), no colapsen en sismos de baja a regular intensidad, en cambio, estos sismos no muy intensos ocasionan movimientos de masa poco predecibles. Al respecto, Silgado (1978, pág. 73), describe que 217 personas, del caserío Acobamba, murieron sepultadas por un gran deslizamiento producido por este sismo de Quiches de 1946; y que otro muy grande también, cifrado en ~ 25 millones de m^3 de material cayó sobre la quebrada Pelagatos, generando peligrosos represamientos por los derrumbes causados por el sismo. Es decir, los efectos indirectos por movimientos de masa son siempre de temer en la Sierra; pueden sepultar pueblos pequeños o grandes, represar ríos, o provocar desbordes de lagunas, sobre todo en los meses de lluvias o en los meses inmediatamente subsiguientes; pueden también destruir carreteras, que impedirán luego la llegada de ayuda o rescate de heridos. En suma, sismos no muy potentes pueden afectar severamente las condiciones de vida de poblaciones que normalmente ya subsisten en condiciones socioeconómicas precarias. La cartografía geomorfológica que se practica poco en el país, sería de gran ayuda, sobre todo en las zonas montañosas andinas, a condición de que se desarrolle bajo los lineamientos conceptuales correctos, y bajo frecuente actualización.

4.1.7. El Terremoto de Ancash de 1970

El domingo 31 de mayo de 1970, a las 3.23 pm, se produjo un fuerte sismo bajo el mar, cerca de Chimbote y de Casma. En un inicio las referencias básicas del terremoto no eran precisas, con autores indicando magnitudes un tanto distintas: (Mw 7.7, por Tavera, 2014, p. 33; Ms 7.8, por Kuroiwa, 2005, p.101; y 7.9, por Silgado, 1978 y Dorbath et al, 1990 (citados en el Cuadro 8, Álvarez (2015, p. 95) indica una M: 7.8. La profundidad indicada por Silgado y Dorbath et al, de 42 km, es decir, superficial, pero el CISMID (2020) lo pone en su web, a 64 km, y Tavera (IGP, 2020a) indica una profundidad de 70 km (ya no superficial). Las coordenadas del epicentro en el estudio de Silgado y Dorbath son: 9.2°S de latitud y 78.8°W de longitud (citados en el Cuadro 8), ubicándolo bajo el mar, ligeramente al sur de Chimbote, pero Tavera en la misma Conferencia Virtual (IGP, 2020a), lo ubica exactamente en la línea de costa, y hay quienes como Morales-Soto y Zavala (2008, pág. 220), lo referencian a 9.4°S y 79.3°W, a 50 km bajo el mar, entre Casma y Chimbote. Las diferencias en los datos, son sin duda importantes para juzgar la potencia de un sismo sobre el área.

A modo comparativo, Villanueva, citado en AEA (2020, pág. 24) destaca que: “El terremoto de Áncash tuvo 7,9 magnitud momento, y liberó una energía de 5 850 000 de TNT. El de Pisco, el 15 de agosto de 2007 fue superior, con 8,0 magnitud momento y la liberación de energía de 10 120 000 TNT”.

Como se ve, fue un fuerte sismo, pero no de los más potentes habidos en el frente marino de convergencia y, además, fue muy breve (la mayoría de autores lo indican en unos 45 segundos), y diurno, ocurrido en una tarde de domingo no laborable. En cambio, es hasta hoy, y de lejos, muy superior en materia de desastres a todo lo que haya causado cualquier otro sismo u otro evento natural en el país, porque causó la mayor catástrofe habida en el Perú, dejando entre 50,000 a 70,000 habitantes muertos o desaparecidos, y más de 150,000 personas heridas en su gran mayoría de la Sierra y Costa de Ancash, aunque también hubo alrededor de mil víctimas fatales en los departamentos aledaños (sur de La Libertad, norte de Lima y suroeste de Huánuco, en este

orden). Hasta el año de su ocurrencia, este evento fue el mayor desastre natural habido hasta entonces en toda América, aunque luego, en 2010, haya sido ampliamente superada por el terrible sismo de Haití, que dejó más de 300,000 víctimas entre fallecidos y desaparecidos.

Por la severidad de la catástrofe nacional y la época en que ocurrió, este sismo fue el punto de inflexión que modificó drásticamente la percepción que se tenía en el país sobre los desastres naturales. El evento gatilló la creación del Sistema Nacional de Defensa Civil, el mismo que, al margen de numerosas carencias y dificultades de todo orden, así como de cuestionables lineamientos de política, dirección y corrupción (hechos no exclusivos de esta institución sino de muchas que son parte de la historia nacional y de muchos países), es evidente que su creación y trayectoria en los más de 50 años de su existencia, ha impulsado seriamente respuestas orgánicas y colectivas ante la ocurrencia de desastres naturales, proceso que debe incrementarse en todo orden, corrigiendo los lineamientos que puedan resultar defectuosos, procurando eliminar a la vez los diversos vicios subyacentes.

Cabe decir que, sí para el país este sismo resultó un hito impresionante, también lo fue para el mundo de esos años. La dimensión de la catástrofe (entre las mayores del mundo para ese entonces), y el desarrollo de la ciencia, la planificación, la división del mundo entre las dos grandes potencias de esos años, la guerra fría y el surgimiento de países subdesarrollados y no alineados del tercer mundo, produjo un generoso escenario de ayuda y cooperación internacional abocado al Perú. Llegaron misiones científicas financiadas por los países desarrollados capitalistas y socialistas; expertos en ciencias de la Tierra, urbanismo y planificación (además de médicos e ingenieros de todas las áreas) que visitaron la región afectada realizando cuantiosas tareas médicas y reconstrucción; la estudiaron y propusieron una serie de medidas con vistas a la rehabilitación, esta vez, con bases de crecimiento sostenible²³

²³ Algo así como la “reconstrucción con cambios” puesta en marcha por el ex presidente Pedro Pablo Kuczynski Godard (actualmente preso en su domicilio, juzgado por corrupción), con el Fenómeno El Niño de 2017, proceso que generó muchas expectativas, pero que resultó tan decepcionante como muchos otros procesos de reconstrucción y atención a poblaciones damnificadas por desastres.

Desafortunadamente (y una vez más), la gran mayoría de estudios y recomendaciones se perdieron en la maraña burocrática y corrupta de la dictadura militar de entonces, la misma que fue seguida de la gran crisis económica y social que generó ese régimen en nuestro país, seguida luego por los años de subversión, terrorismo y hundimiento económico generalizado del país, contexto que, por cierto, fue totalmente desfavorable al impulso ciudadano de fortalecimiento de la gestión del riesgo de desastres.

Luego del sismo, llegó al país un enorme apoyo humano, material, económico, científico y tecnológico, especialmente en la fase de atención médica y alimentaria de las víctimas del desastre, proveniente tanto de las potencias de entonces, como de Latinoamérica y de otros países del tercer mundo africano y asiático. Fue sin duda, una comunidad de naciones viniendo en ayuda en una tarea inmensa, que costó incluso muchas vidas del personal dispuesto por esos países en sus viajes. El 10 de junio de ese año, un avión de la Fuerza Aérea Argentina, que traía ayuda material y logística, se precipitó a tierra en un accidente en el que murieron sus cuatro tripulantes.

Y, en julio de ese año, una numerosa flota de más de 70 aviones de la ex Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS), cruzó el Atlántico (17,000 km) trayendo toda clase de ayuda humana y material. Pero, uno de esos grandes aviones cayó al océano pereciendo sus nueve tripulantes, siete ingenieros y seis médicos. Ancash, pero todo el Perú, deben agradecimiento a casi todo el mundo por el generoso apoyo recibido, el mismo que, en el caso de soviéticos y argentinos, llegó a enlutar a muchas de sus familias. Este gesto y expresión de solidaridad máximas, debiera ser, como política de estado, siempre enaltecido como corresponde (algo que, desafortunadamente no es parte de la usual conducta nacional).

Mención aparte, por lo execrable que es, fue constatar una vez más la cuantiosa corrupción habida durante la gestión del desastre, que no solo afrontó a los miles de muertos y sus familias, sino que explica en gran parte las causas del atraso y subdesarrollo nacional. Si bien, la corrupción es una característica humana, la que hubo en el país durante la gestión del desastre debe ser destacada, ya que es más repudiable que se descubra que las

inmensas ayudas recibidas, que supuestamente irían a los más necesitados, sirvieron más bien para amasar vergonzosas fortunas. El Informe de la Comisión Investigadora del Congreso 1980 – 1985, sobre las entidades que administraron el post sismo, CRYZA, ORDEZA y ORDENOR – CENTRO demostró, en 147 páginas, la ocurrencia de graves y cuantiosos hurtos, al punto que varias embajadas y entidades de los países que acudieron en ayuda expresaron sus agrias quejas al gobierno militar de entonces. Zubieta, citado en AEA (2020, págs. 48-49) describe lo siguiente:

“Como siempre ocurre, terminó en recomendaciones y no se aplicaron medidas de sanción ni correctivas. Las tareas de construcción no beneficiaron a todos, muchos lugareños fueron discriminados y no recibieron la asignación de nuevas viviendas. Como los ejecutivos de los entes gubernamentales eran foráneos no siempre atendieron a quienes realmente lo requerían, los más humildes como siempre fueron ignorados. Los alrededores se poblaron de precarias construcciones, la migración fue otra alternativa de los más humildes. Solamente de la zona de Yungay se estima que migraron alrededor de 5,000 damnificados”.

La evaluación del riesgo debe considerar siempre los procesos sociales y políticos, puesto que toda evaluación de un tema tan transversal como este, no tiene sentido si se enmarca solo en una concepción social, económica, técnica, natural o ingenieril, sino que debe comprender integralmente los múltiples aspectos que tiene esta problemática, aprendiendo así de la historia.

4.1.7.1. El sismo en la Costa

Aunque los daños ocasionados por el sismo se sintieron incluso en Lima (a casi 400 km del epicentro), el área del desastre se centró en un 95% en el departamento de Ancash. Al respecto, es de destacar que este muy grave sismo tiene la particularidad de que gran porcentaje de las cuantiosas víctimas humanas habidas ocurrió en la Sierra del departamento, situada entre 100 a

200 km del epicentro, cuando podría suponerse que un sismo de $M: 7.9$ o menos, y de epicentro marino, debió causar daños mucho mayores a la adyacente Costa. Pero, hay grandes diferencias geográficas entre la Costa y Sierra, que explican mucho de este resultado. Tricart (1973, pág. 9) señalaba que, “las condiciones geomorfológicas regionales han jugado un rol importante en la materia”. Por ello, es necesario describir y entender el sismo según las características regionales.

Al ser un sismo marino del frente de convergencia, afectó primero y directamente al desierto de la Costa más próxima al epicentro. Este desierto está constituido por llanuras aluviales, eólicas y marinas, con predominancia de suelos arenosos y gravo arenosos, con menores proporciones de suelos finos, y presencia más o menos puntual de napas freáticas superficiales cerca de la desembocadura de los principales ríos del área en el mar (algo bastante similar a lo descrito para los sismos de Lima y Arica).

Las llanuras están bordeadas de colinas y montañas, y en sus planicies cercanas al mar se encuentran las mayores ciudades costeras de Ancash: en primer término, Chimbote, y luego Casma y Huarney; las tres ya eran capitales provinciales en 1970. Chimbote tenía ~ 150,000 habitantes, y era ya una de las ciudades más pobladas del país (actualmente, según CPI (2025, pág. 18), es la octava, con ~ 450,000 habitantes). Casma y Huarney eran ciudades de menos de 20,000 habitantes, que se mantienen actualmente como ciudades costeras pequeñas (< 50,000 habitantes).

Al igual que en la actualidad, en el litoral de Ancash había para 1970 pequeñas caletas de pescadores y poblados, como Coishco, Samanco, Tortugas, La Gramita y Culebras, que al momento del sismo tendrían entre 1,000 a 3,000 habitantes. Hacia el interior de la Costa, ubicados en los valles agrícolas que descienden de la Sierra, habían y hay numerosos poblados pequeños, como Chuquicara, San Jacinto, Moro, Huanchuy, Buenavista, Chasquitambo y Yaután, también de menos de 3,000 a 5,000 pobladores que viven en su mayoría de la agricultura en los valles de los ríos Santa, Casma y Huarney. Algunos de estos poblados han crecido hasta duplicar su población y área

superficial, por condiciones económicas y sociales más favorables que en los años del sismo; pero siguen siendo poblados o ciudades muy pequeñas.

Álvarez (2015, pág. 96), señala que en Chimbote hubo cerca de 3,000 fallecidos, cifra que, frente al enorme número de víctimas habido en la Sierra, puede parecer menor. Pero, la tragedia de Chimbote es cuantiosa, y supera en muertes al total de todas las habidas en los sismos anteriores de la Costa, con excepción de los sismos de Lima de 1746 y Arica en 1868. Bajo una hipotética proporcionalidad, si el mismo sismo de 1970 ocurriese hoy, las muertes en Chimbote serían de unos 10,000 habitantes, solo en esta ciudad.

Silgado (1978, pág. 102), indica que la ciudad de Casma prácticamente quedó destruida, por lo que el porcentaje de víctimas en esta ciudad también debió ser elevado. Este autor centra los máximos niveles de destrucción entre Chimbote y Casma (lo que puede ser acorde al epicentro, próximo a estas dos ciudades). Destrucciones de orden similar se produjeron en el resto de poblados costeros. Considerando el número de víctimas que causó el sismo, se puede estimar en alrededor de 6,000 a 8,000 personas las muertes acaecidas en la Costa (10 a 15% del total de víctimas fatales causadas por el sismo). Algunas características geográficas principales actuales de la urbe chimboteña, pero que también se aplican a la realidad de 1970, se muestran en las Figura 57 y Figura 58.

La Figura 57 muestra, en un mapa de microzonificación sísmica, que la mayor parte de la ciudad, desde que originalmente se constituyó alrededor del puerto y centro de la bahía, se ubica en el nivel de microzonificación sísmica III, que es un suelo mayormente arenoso y de napa freática situada a poca profundidad, es decir, con cierta probabilidad de generar procesos de licuación en caso de sismos severos. El nivel IV es según el estudio realizado el más riesgoso, porque son terrenos prácticamente pantanosos, donde, a pesar de todo, se habían emplazado algunos grupos de viviendas (actualmente aún hay algunos pobladores sobre estos terrenos), donde los autores señalan que los asentamientos del terreno son inevitables en caso de sismos. Los niveles I y II tampoco son de suelos de buena calidad geotécnica; todos muy arenosos o de napa freática superficial o bastante alta. Los

materiales aluviales gruesos que proceden del río Lacramarca, y que podrían mejorar la calidad del suelo, se hallan muy próximos al mar, y por ello, la napa freática se halla cercana a la superficie. Silva y Parra (CISMID, 2000) citados en Alva, (2011, págs. 37-38), demuestran amplias zonas de la ciudad con potencial de licuación, para aceleraciones máximas superficiales de 0.15 g, valores fácilmente alcanzables en la zona (como también en gran parte de la Costa), con cualquier sismo medianamente severo. La Figura 58 muestra en imagen la fisiografía de la bahía de Chimbote (la Figura 58 muestra solo la parte central de esta bahía).

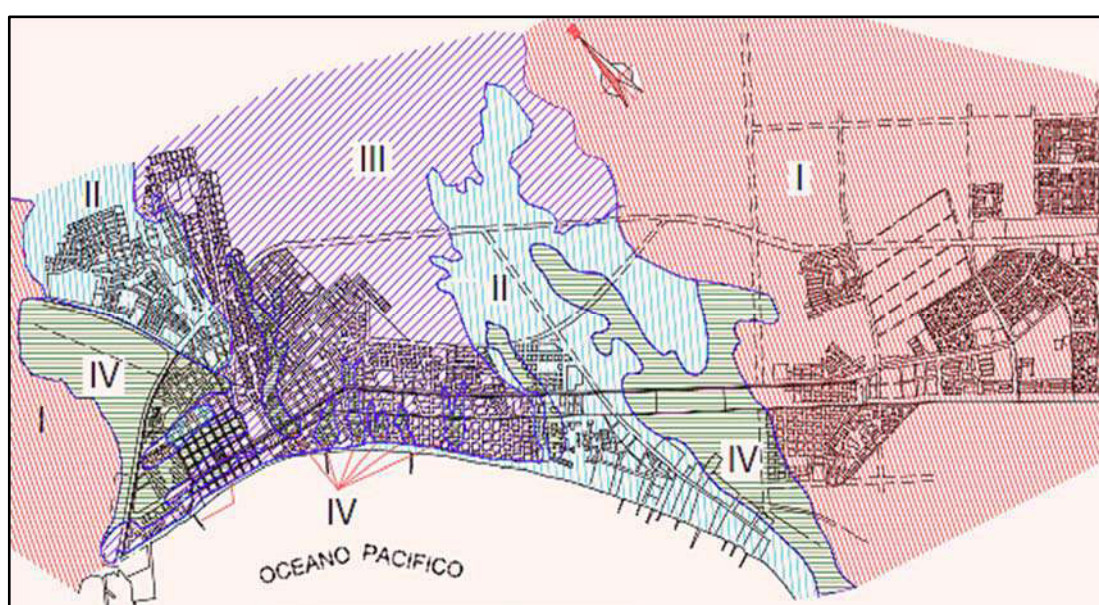


Figura 57. Mapa de Microzonificación sísmica de Chimbote

Según la leyenda del mapa, la ciudad se microzonifica en las siguientes cuatro categorías:

“I” Sectores con subsuelo de grava o roca con agua subterránea a menos de 10 m. Pocas posibilidades de asentamientos. Mayor efecto sísmico debido a interacción suelo – estructura.

“II”. Zona cubierta por arena suelta a semidensa de varios m de espesor. En la mayor parte el agua a 5 m. Se esperan asentamientos en los bordes de las dunas. Debe usarse pilotes para edificios de más de dos pisos.

“III”. Suelo arenoso cubierto por tierra agrícola. Gravitas a 10 m. Nivel freático a poca profundidad. Posibles precauciones especiales

“IV” Zona con nivel freático superficial. Pantanosa. Arenas con limos superficiales. Asentamientos inevitables.

En pequeños cuadrillados oscuros se aprecian los barrios de la ciudad. La dirección del norte se indica en la parte superior de la Figura. Fuente Morimoto et al. citado en (Alva J. , 2020, pág. 24).

El sismo de 1970 produjo un tsunami de muy pequeña magnitud (olas de 1 a 2 m), que produjeron leves inundaciones en el litoral. Pero, la situación ante un posible tsunami es en realidad crítica, ya que las primeras líneas de viviendas emplazadas en el litoral de la bahía se ubican prácticamente en la orilla, separadas por un dique de piedra de 2 a 2.5 m de alto. El barrio céntrico que continúa hacia el Este asciende levemente y llega a una altitud de unos 10 – 12 msnm a una distancia variable de ~ 1 a 1.5 km del litoral. En caso de sismo severo y alerta de tsunami, los pobladores de estos barrios litorales deberán llegar en los minutos siguientes al sismo como mínimo a estas altitudes para tener opciones de salvaguardarse de los eventuales oleajes. (las cuales tampoco son seguras para tsunamis de olas de más de 10 m).

Alcanzar estas alturas luego de un sismo severo, es una tarea que para los pobladores puede ser muy difícil, considerando las posibles viviendas y calles derruidas por el sismo, incluyendo vehículos, postes, etc., además de la probable y numerosa población herida. Esta situación debe ser aún mucho más complicada y aterradora en caso de tsunami nocturno, como sucedió en el Callao en 1746, cuando casi toda su población pereció, quedando solo unos 200 sobrevivientes de los casi 4,000 habitantes que tenía el puerto ese año. La topografía de la ciudad de Chimbote, muy llana y que va ascendiendo muy lentamente hacia el interior de la costa plantea una situación de difícil solución para la población amenazada por estos fenómenos. Felizmente no ha habido tsunamis significativos en Chimbote por lo menos desde el siglo pasado.

La configuración de las bahías (Chimbote y Samanco) se debe al alineamiento de cerros orientados más o menos N -S, formados de rocas duras (Figura 58). Por ello, el mar dentro de las bahías es bastante calmo, porque el oleaje que llega de alta mar se frena al chocar con esta línea de cerros e islas litorales que cierran las bahías. Un potente tsunami que llegue de altamar se verá parcialmente frenado y disminuido por estos cerros e islas, pero en cambio, una vez ingresadas las aguas del tsunami a las bahías, estas, por su forma de envases cerrados harían que las aguas suban de nivel, desbordando a las tierras interiores hasta altitudes diversas según la fuerza acumulada. Si se examina la costa de Ancash, se puede ver en detalle, que prácticamente toda

su costa tiene una configuración muy irregular, donde se suceden bahías y penínsulas, con puntas rocosas e islotes próximos a las rompientes del oleaje. Por tanto, un eventual tsunami tendría efectos similares a los señalados para Chimbote, sobre gran parte de la costa de Ancash, con la salvedad que casi la totalidad de bahías no tiene zonas urbanas salvo algunas viviendas e instalaciones veraniegas de pocos pescadores artesanales y veraneantes.

El número de víctimas mortales que hubo en Chimbote en 1970 (cerca de tres mil) para un sismo de M: 7.9, diurno y en un feriado habitual en la Costa del país, y que probablemente no fue muy superficial (~ 65 km de profundidad) resulta muy elevado, si se compara por ejemplo con las muertes habidas en los sismos de Lima de 1940, 1966 y 1974, o más recientemente con los sismos de 2001, en Camaná y de Pisco en 2007, más potentes. En todos ellos, las víctimas fatales no pasaron de unos cientos y sumadas en varias ciudades.

El suelo claramente deficiente en casi toda la ciudad, es con seguridad una de las principales causas, siendo evidente que suelos arenosos marinos y fluviales recientes, salinos y, en gran parte de napas freáticas superficiales o poca profundas, pueden generar efectos muy severos en las edificaciones (como los inevitables asentamientos de terreno a producirse en los suelos IV, de la microzonificación hecha por Morimoto et al., mostrada en la Figura 57). Las viviendas y edificaciones en la ciudad deberían contar con medidas constructivas específicas para ese tipo de terrenos, algo que ocurre poco en la actualidad, pero que eran inexistentes en 1970. A este marco de suelos poco competentes, debe agregarse que, para el año del sismo, amplias zonas de la ciudad eran de material precario, o de construcción muy poco tecnificada y fuertemente tugurizada²⁴ siendo esta la causa principal del desastre. Las Figura 59 y Figura 60 muestran algunos de los efectos del sismo en Chimbote,

²⁴ A fines de los 50, se inicia en Perú el boom de la pesca de anchoveta y su conversión en harina y aceites de exportación. En poco tiempo el Perú pasó a ser el primer productor de pescado en el mundo y, Chimbote, que era hasta poco antes, una pequeña caleta de pescadores pasó a ser el primer puerto pesquero del mundo. Migrantes de la sierra ancashina bajaban a diario para hacer fortuna. Pronto Chimbote fue una enorme ciudad, pero nada planificada. Barrios pésimamente contruidos, sin saneamiento básico, delincuencia etc, es decir, lo mismo que ahora se ve con el surgimiento de “ciudades” producto de la minería ilegal.



Figura 59. Licuación y desplazamiento lateral en Chimbote

La foto superior muestra asentamientos y fisuramientos de la carretera debido a compactación y desplazamiento lateral de depósitos lagunares y de playa.

Fuente. (Alva J. , 2011, pág. 29)



Figura 60. Severa destrucción en viviendas precarias en Chimbote

Se muestra la destrucción generalizada que hubo en viviendas de adobe, mayoritarias en la época, lo que en cierto modo explica el alto número de víctimas. *Fuente.* (Chimbote en Blanco y Negro - Fotografías Antiguas de Chimbote, 2011) [https://es-](https://es-es.facebook.com/photo/?fbid=489946981919&set=a.275858411919.149157.256465601919)

es-es.facebook.com/photo/?fbid=489946981919&set=a.275858411919.149157.256465601919

Entre los efectos físicos habidos en los terrenos de Chimbote se tiene prácticamente todos los fenómenos ligados a la licuación: asentamientos y desplazamientos laterales, hundimientos y elevaciones del terreno, volcanes de arena, salidas de agua subterránea, entre otros, al punto que Alva (2011, pág. 20) señala que los efectos de este sismo dejaron el caso mejor documentado de fenómenos de licuación en el Perú (mayores referencias sobre este peligroso proceso se mencionan en la sección 2.2.3.6.1. Los suelos gruesos. Licuación y otros procesos pág. 62). La Figura 61 muestra el nivel de destrucción casi total, habido en la ciudad de Casma.



Figura 61. La Ciudad de Casma, luego del sismo de 1970

La ciudad de Casma prácticamente en ruinas; un amasijo de adobe destruido, que explicaría el alto número de víctimas mortales. Se puede apreciar que las edificaciones de material noble quedan en pie, aunque tal vez con daños estructurales. Nótese que son calles relativamente anchas con edificaciones de baja altura. Fuente. (Muñoz, 2020) <https://www.dw.com/es/50-a%C3%B1os-tras-el-terremoto-de-%C3%A1ncash-qu%C3%A9-aprendi%C3%B3-per%C3%BA/a-53601637>

Una Misión Científica del Japón, en colaboración con el CISMID, y presidida por el Dr. Ryohei Morimoto, vino al Perú seis semanas después del sismo. Entre sus conclusiones, citadas en Kuroiwa (2005, pág. 124), se tiene que, las mayores grietas observadas en Chimbote, una paralela al litoral y otra paralela al río Lacramarca, indican la gran importancia sísmica del agua de mar y

filtraciones del río en la pérdida de resistencia de los estratos del suelo. Evidenciaron con claridad los efectos de microzona, citando el caso de una severa afectación, de 90%, en el área de inundación del río Lacramaca en construcciones de albañilería, bloques de concreto, con refuerzo de vigas y columnas de concreto armado o sin ellos, mientras que, en otras zonas de Chimbote los daños en edificaciones similares fueron menores al 30%.

Porcentualmente, hubo numerosos muertos, heridos y daños materiales en los pequeños poblados de la Costa y sus infraestructuras, pero a pesar de los fatídicos números, cabe recordar que fue un sismo diurno, de una tarde de domingo, cuando la mayoría de la población empleaba esas horas en actividades de descanso, distracción, visitas familiares. En esa tarde se iniciaba el campeonato mundial de fútbol México 70, siendo la primera vez que se vería en el país partidos por televisión a color. El sismo ocurre cuando muchas familias estaban reunidas para apreciar este evento, y nada hacía presagiar la tragedia de minutos después.

4.1.7.2. El sismo en la Sierra

A pesar de la penosa tragedia que significó este breve sismo en la Costa de Ancash, en cambio, en la Sierra de este mismo departamento, el evento alcanzó niveles pocas veces visto en el mundo hasta ese entonces: cerca de 60,000 personas muertas o desaparecidas en la Sierra, frente a los ~ 7,000 en la Costa, estando el epicentro del sismo a un máximo de 30 a 50 km de las ciudades costeras más afectadas, y a un mínimo de 100 - 150 km de las ciudades de Sierra que también fueron destruidas y en mayor medida. La Fisiografía y geomorfología locales, al igual que la geología y condición socioeconómica, fueron decisivas para explicar la magnitud de la catástrofe.

♦ Fisiografía

Sobre la extensa zona afectada por el sismo (Costa y Sierra), Tricart (1973, pág. 9) describe que “La región está formada de unidades longitudinales paralelas al litoral”. En efecto, la Sierra del departamento de Ancash, está

configurada por cadenas montañosas y valles alineados claramente con el rumbo andino, de orientación SE-NW, el mismo que tiene el litoral costero. Como se ha visto en el terremoto de 1946, la Sierra del departamento de Ancash es fuertemente montañosa, con laderas de pendiente muy pronunciada, valles en su mayoría estrechos y muy pocas altiplanicies (a diferencia de los departamentos de la Sierra central, y especialmente de la Sierra sur, donde las altiplanicies son extensas).

La Sierra ancashina se inicia por el oeste, en las montañas desérticas que limitan con la Costa, en altitudes de 500 a 1,000 msnm, las mismas que asciende hacia el este, llegando a 5,000 – 5,100 msnm en los picos de la cadena orográfica Cordillera Negra. Estas cumbres son un parte aguas de laderas que descienden por el oeste hacia el desierto costero, y por el este, hacia el valle del río Santa, que va de sureste a noroeste. Desde el río, hacia el este, las montañas ascienden nuevamente hasta la línea de cumbres más alta del país, la Cordillera Blanca, conocida por ser la cordillera nevada tropical más grande del mundo, que incluye 17 picos de más de 6,000 m de altitud.

Según el INAIGEM (2023, pág. 84), los nevados se distribuyen en 511 glaciares (entre libres y cubiertos por detritos), que abarcan a la fecha 424.86 km², una extensión a la que se ha ido reduciendo drásticamente por el cambio climático global. Esta misma publicación señala que solo en los últimos 4 años, la pérdida de glaciares fue de 26.25 km²; indica también que la Cordillera Blanca tiene 850 lagunas (solo 55.47 km²), de las cuales 25 son proglaciares (1.8 km²) y 1 supraglaciario (0.01 km²), señalando que son estas últimas las que representan, sísmicamente, algún peligro. La cifra de pérdida de glaciares en solo cuatro años, da una idea de la pérdida de masa glaciar habida en las últimas décadas en la Cordillera Blanca y resto de glaciares del Perú y el mundo (aunque con velocidades distintas), fenómeno conocido en el país desde los años 70, intensificado desde los años 90.

El valle del río Santa corre entre las Cordilleras Negra (sin glaciares) y Blanca (con glaciares). Nace al sur del departamento, en la laguna Conococha, a 4,100 msnm y va hacia el nor noroeste descendiendo hasta 1,500 msnm. A esta altitud, el río Santa dobla hacia el oeste cortando a la Cordillera Negra en

el llamado Cañón del Pato, para dirigirse a la Costa, hacia su desembocadura en el mar en las inmediaciones de Chimbote. El recorrido del Santa, desde Conococha hasta su doblaje al Pacífico, conforma un valle entre las cordilleras Negra y Blanca conocido como “Callejón de Huaylas”. Luego, al este de las cumbres de la Cordillera Blanca, las montañas descienden hasta el profundo valle del río Marañón, que limita la Sierra de los departamentos de Ancash y Huánuco, formando otro valle de rumbo sureste noroeste (aunque menos delineado que el Santa), conocido como “Callejón de Conchucos”.

El variado conjunto orográfico de Ancash, determina varios pisos climáticos altitudinales, empezando por las cálidas y desérticas montañas que colindan con la costa, al que siguen hacia arriba montañas semiáridas de la Cordillera Negra, y más arriba, montañas templado húmedas de esta misma Cordillera y de los “Callejones” de Huaylas y Conchucos (aproximadamente entre 2,500 y 3,800 msnm, que es el piso andino más poblado), donde se encuentran las principales pequeñas ciudades de la Sierra ancashina. Sobre estas altitudes, y hasta casi 5,000 msnm se tiene zonas de pastizales en pequeñas altiplanicies y montañas frías, de poblaciones dispersas en pequeños caseríos dedicados a la ganadería y eventualmente, a la mediana y gran minería. Sobre 5,100 - 5,200 msnm se tiene a los glaciares y picos de la Cordillera Blanca.

En el Callejón de Huaylas está la capital del departamento, Huaraz, a 3,100 msnm, que en el año del sismo tenía ~ 40,000 habitantes (actualmente, poco menos de 150,000), y también en este “Callejón” y a orillas del río Santa se ubican las pequeñas capitales provinciales, Recuay, Carhuaz, Yungay y Caraz, respectivamente, siendo Carhuaz y Caraz, después de Huaraz, las más pobladas. Otras pequeñas ciudades capitales provinciales y distritales, así como pequeños caseríos se hallan en los valles y flancos montañosos de las Cordilleras Blanca y Negra, en los Callejones de Huaylas y Conchucos, y en la vertiente occidental de la Cordillera Negra, que desciende al Pacífico.

♦ **Geología**

Geológicamente, la Sierra de Ancash puede dividirse en tres grandes conjuntos o bloques, todos formantes de la Cordillera Occidental (como señalan Carlotto et al. (2010, pág. 50), que afirman que las “Cordilleras” Negra

y Blanca son parte del mismo dominio geotectónico, que es la Cordillera Occidental.²⁵ La Figura 62, se pueden reconocer los tres bloques geológicos del área.

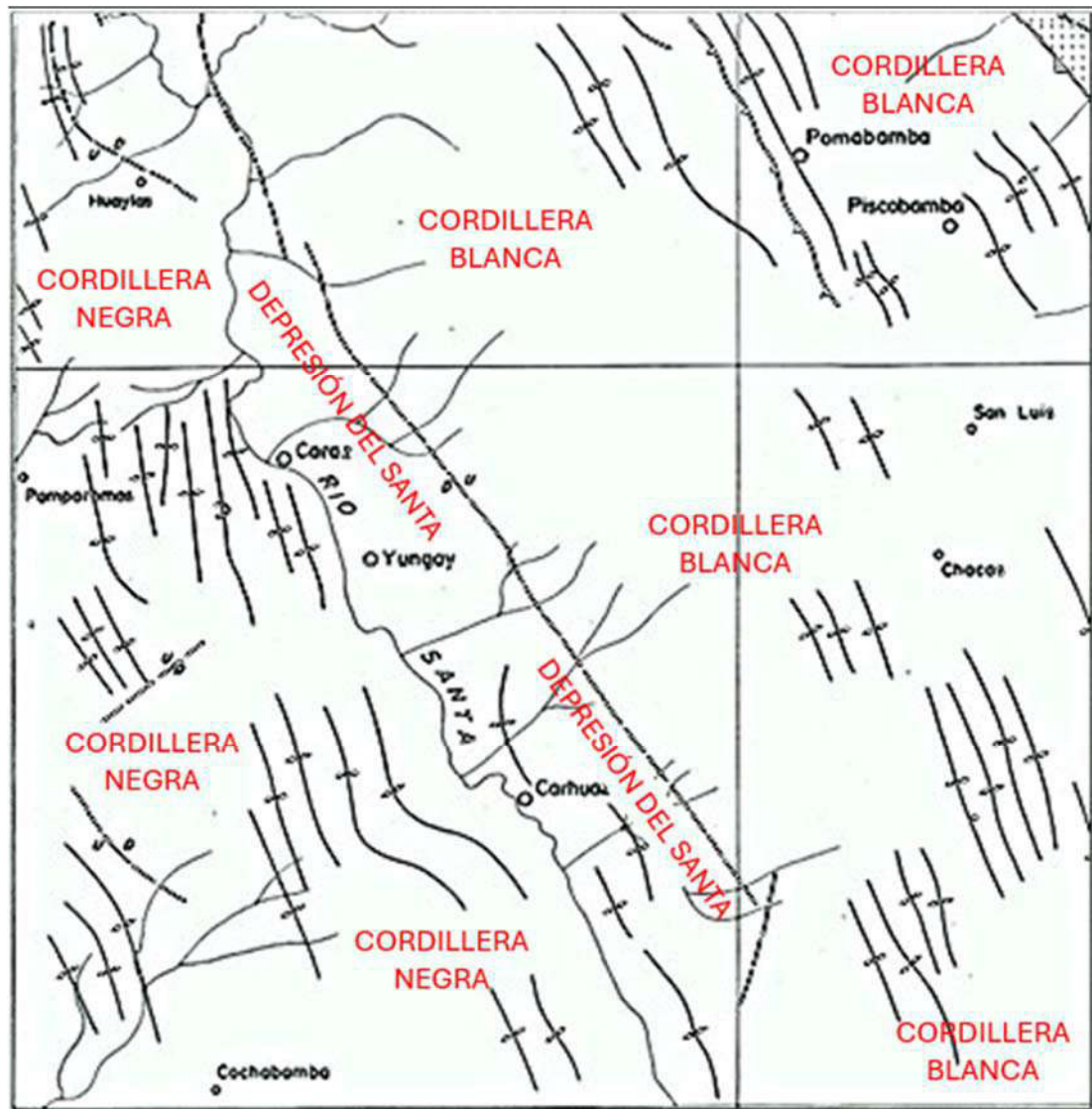


Figura 62. Bloques geológicos de la Sierra de Ancash

Fuente. (Wilson et al., 1995, pág. 28).

La llamada Cordillera Negra, está constituida por formaciones sedimentarias, volcánicas y del batolito costero, todas de edades del Mesozoico al Terciario. Al este de la Cordillera Negra, y separado por el río Santa, se tiene el bloque de la Cordillera Blanca, el cual consta también de un batolito terciario, y de

²⁵ Es que, geológicamente, las cordilleras se definen por criterios orogénicos y no por topográficos. En Perú es común llamar "cordilleras" para alineamientos orográficos como las cadenas montañosas Negra, Blanca, Huayhuas, que son parte de la Cordillera Occidental. Las cadenas Huaytapallana, Vilcabamba y otras, son parte de la Cordillera Oriental.

formaciones rocosas volcánicas y sedimentarias del Mesozoico. Entre las dos cordilleras, Negra y Blanca, un tercer bloque es el que conforma la depresión del Santa y su valle, que en su piso tiene formaciones de areniscas y cuarcitas cretácicas, así como modernas acumulaciones volcánicas de piroclastos de fines del Terciario, que han rellenado la depresión, a estos se suman, en el tope de la depresión, las potentes acumulaciones aluviales, coluviales y fluvio-glaciales cuaternarias.

En la parte central de la Figura 62, en línea negra discontinua, resalta la linealidad estructural de la Falla Regional del Callejón de Huaylas y a su izquierda el río Santa, que corre de sureste a noroeste. A la derecha de la Falla se encuentra el bloque rocoso de la Cordillera Blanca, que se extiende hacia toda la porción derecha de la Figura, donde se encuentran poblados como Pomabamba, Piscobamba, Chacas y otros. A la izquierda del río Santa, se extiende el bloque rocoso de la Cordillera Negra, con una sucesión de anticlinales y sinclinales de rumbo mayormente SSE-NNW (representadas en líneas negras, delgadas y continuas). Entre el río Santa y la Falla, se extiende un tercer bloque rocoso constituido por la depresión del Santa, el mismo que está rellenado por sedimentos neógenos. El río y las ciudades del valle, como Caraz, Yungay, Carhuaz (que aparecen en el mapa) al igual que Huaraz, Recuay y otras que quedan al sur, fuera del mapa, se hallan a menos de 10 km de la falla activa, lo que acrecienta su peligro sísmico.

Wilson et al. (1995), coinciden en señalar que la activa Falla Regional fue un elemento geológico determinante en la gravedad de la catástrofe para el Callejón de Huaylas. También, Cobbing et al. (1996), señalan que la Falla de la Cordillera Blanca es probablemente la más importante del área y discutible del Perú, indicando que no es una falla sino un sistema de fallas, que tanto proporcionó canales para el emplazamiento del batolito de la Cordillera Blanca, como permitir el desarrollo del graben estructural, que conformó luego la depresión del Santa, donde se depositaron los volúmenes de relleno terciario-cuaternarios que ahora presenta el valle. Como muchos otros investigadores, Cobbing et al. (1996), ponen en realce la importancia que tuvo esta falla en la formación del valle como depresión de tipo graben.

como decía Tricart, (1973), en los numerosos pequeños pueblos que se hallan en el valle y en las Cordilleras Negra y Blanca, la naturaleza geológica y caracteres geomorfológicos específicos de cada sitio, han jugado roles importantes, y hasta determinantes en los efectos del sismo. Por un lado, con el efecto de las vibraciones del suelo destruyendo parcial o totalmente las edificaciones, y por otro, con los procesos indirectos, que incluyen aluviones, derrumbes y deslizamientos ocasionados por el movimiento.

♦ **Situación socioeconómica**

Para 1970, la Sierra de Ancash era similar a la de las más pobres zonas de Sierra de la época. Justamente, en 1969, la dictadura militar había decretado la Reforma Agraria, para intentar revertir la situación de casi feudalidad en que vivía la masa campesina y pequeñas ciudades del interior. Para entonces, la única carretera pavimentada que había en toda la Sierra era la ruta Lima – Huancayo. El campesinado ancashino andino migraba casi en masa a Chimbote atraído por el boom pesquero, y si bien el Perú siempre fue un país minero, la minería, no tenía los cuantiosos alcances que ha logrado en este siglo (además que esta actividad no demanda mucha mano de obra). De este modo, la agricultura y ganadería tradicionales de la Sierra eran, como casi lo fueron siempre, las fuentes de sostenimiento de las familias y pequeñas urbes andinas en todo el país. El agro andino, de minifundio y bajo rendimiento agrícola y ganadero, con precios de venta ínfimos a los escasos mercados provinciales y nacionales, costos y tiempos casi inviables para el transporte de productos, sobre todo en los meses de lluvias, eran, en los años del sismo, la fuente de sostenimiento principal en la casi totalidad de ciudades andinas.

Si bien el nivel de vida en la población costera también era deficiente, seguía siendo muy superior al de las regiones de Sierra y Selva (esta última, mucho más aislada y casi despoblada). El agro tradicional andino, aunque muy pobre, era prácticamente la única opción de la población de la Sierra; casi no existían otras actividades, como las forestales, piscícolas, minería artesanal (o ilegal), construcción y servicios en las ciudades; el turismo era aún una actividad muy incipiente y casual. En este entorno, las posibilidades de mejora de calidad de vida de las provincias andinas eran muy escasas.

De manera que, al ocurrir el sismo, que no fue muy severo y que tuvo un origen marino un tanto alejado, cayó sobre una población nada preparada, que vivía en construcciones en gran parte de adobe, a veces muy altas, acorde a las costumbres propias de la época de tener viviendas de techos elevados y paredes de barro gruesas y pesados tejados, que generan en su interior microclimas que evitan los excesivos frío nocturno y calor de mediodía. La antigüedad de las viviendas y su precaria condición constructiva, y la pobreza socioeconómica de la población, así como los aspectos geológicos y geomorfológicos fueron en conjunto los que explican la gran magnitud de esta catástrofe, en la cual, los efectos indirectos tuvieron tanta importancia y peso relativo, como los efectos directos del sismo.

4.1.7.2.1. *Los efectos directos del sismo en la Sierra*

La zona más poblada de la Sierra ancashina es el valle del Santa, es decir, el Callejón de Huaylas, que tiene muy cerca a la activa Falla Regional (ver Figura 62). Tricart (1973, pág. 11), señalaba que “es en esta región donde el sismo causó la mayor parte de sus víctimas”. Según Alva (2011, pág. 16), en la ciudad más poblada e importante (Huaraz), el sismo dejó 10,000 muertes; Álvarez (2015, pág. 96) señala 15,000. Como fuere, cualquiera de estas dos cifras, para una ciudad que rondaba los 40,000 habitantes afectada por un sismo no muy extremo, regularmente distante al epicentro y no muy superficial, diurno y en día feriado, es de una proporcionalidad muy alta (~ 25 a 30%), en comparación al 2% de víctimas fatales habidas en Chimbote, muy cercana al epicentro y con alta proporción de suelos de baja calidad geotécnica, donde la mortandad dejó ~ 3,000 fallecidos en una ciudad de casi 150,000 habitantes. Es decir, en Huaraz, mucho más distante al epicentro, la mortandad fue casi 15 veces mayor. Familias enteras o casi completas dejaron de existir ese día sepultados en las ruinas de la ciudad.

Con este nivel de catástrofe en la ciudad de Huaraz, se podría pensar en una urbe casi totalmente arrasada. Pero, la destrucción fue completa solo en

ciertas; es decir, la mortandad se concentró en sectores de la relativamente pequeña ciudad, demostrando que las condiciones específicas del sitio, concretamente de los suelos del área urbana, aunadas a la problemática constructiva del adobe como causa principal, fueron determinantes en la magnitud de la catástrofe. A propósito, Kuroiwa (2005, pág. 116), destaca que:

“En Huaraz, en 1970, ubicada a 200 km del epicentro, mientras que, en el Centro, sobre el suelo fino y con agua subterránea muy cerca de la superficie, las construcciones de adobe fallaron en un 100%, en Centenario, 2 a 3 km al norte, viviendas muy vulnerables de adobe de dos pisos no sufrieron daños debido al suelo aluvial compacto y seco, formado por piedras redondeadas, matriz de arena gruesa. En Centenario, la aceleración debe haber sido muy pequeña, pero en el Centro la amplificación fue tan grande, que causó el colapso de todas las construcciones de adobe y que las edificaciones de concreto reforzado sufrieron serios daños”.

La Figura 63 muestra la ciudad de Huaraz antes del sismo



Figura 63. Vista de la ciudad de Huaraz, antes del terremoto

Fuente: (Casaverde, 1969 - 1970) <http://jcsfhuaraz.blogspot.com/2020/04/50-anos-del-terremoto-de-mayo-1970.html>

En la foto se puede observar edificaciones en su mayoría de adobe, viviendas de dos pisos altos y tejados, de calles estrechas. Se puede percibir la tradicionalidad de ritmo de vida apacible y poco dinámico económicamente, de la ciudad, muy distinto al de hoy en día. Las Figura 64 y Figura 65, muestran los niveles de destrucción severa en la ciudad, a causa del sismo.



Figura 64. Vista de la ciudad de Huaraz, después del terremoto

Fuente. (García, 2022). <https://elcomercio.pe/archivo-elcomercio/imagenes-digitales-del-terremoto-de-1970-en-la-tienda-de-el-comercio-sismo-huaraz-tienda-el-comercio-nnsp-noticia/>



Figura 65. Una calle de Huaraz, después del terremoto

Fuente.. (Luyo, 2022) <https://oggrac.unmsm.edu.pe/52-anos-tras-el-terremoto-de-ancash/>

En cuanto al suelo de Huaraz, el Proyecto INDECI-PNUD (s.f., pág. 33), y por interpretación geomorfológica dice que, “se deduce que es complejo, formado por horizontes limo arenosos, limo-arcillosos, arenosos, aluvionales, fluvio-glaciares y aluviales relacionados con su origen”. Algunos caracteres de un suelo frecuente en la ciudad de Huaraz, se muestran en una calicata de la Figura 66.



Figura 66. Características de un suelo céntrico (Barrio de Belén)

La calicata de la foto presenta las siguientes características:

- ◆ 0 – 20 cm: Capa Tierra Cultivo - Vegetal Húmeda Semicompacta
- ◆ 20 – 160 cm: Arena Arcillosa con % de limo - Semicompacta - Ligera Humedad – a Alta Plasticidad – Suelo SC (SUCS) Se ubicó el nivel de agua a 125 cm.
- ◆ 160 a más: Potente estrato de Arcilla Arenosa - Media a Alta Plasticidad. Saturado. Suelo SH (SUCS)

La calicata y muestreo del suelo ha sido realizada el año 2003. Se puede notar las edificaciones modernas post sismo. *Fuente.* (INDECI - PNUD, s.f., pág. 96;144).

Según sus autores, el suelo tiene componentes granulares y finos cohesivos de definida plasticidad, y se anota, además, posible licuación ante sismos, por la presencia de napa freática superficial en un suelo saturado a menos de 160 cm. Es claramente un suelo de baja calidad geotécnica, frecuente en el abanico aluvional en el que se asienta la ciudad. Con suelos de este tipo, se entiende el severo nivel destructivo habido en el terremoto diurno de 1970, a

lo que debe sumarse la relativa cercanía de la ciudad a la activa Falla Regional del Callejón de Huaylas. El tipo de suelo, fino y saturado es capaz de amplificar mucho las ondas sísmicas y aceleraciones; la Falla también juega en este sentido, por lo que el efecto de su cercanía no es desdeñable. Tricart (1973, pág. 13) indica que: “toda la parte antigua de la ciudad ha sido destruida, y que esta, había sido reconstruida luego de una destrucción anterior debida a un sismo del Siglo XVIII, según un plano en damero y calles estrechas”. En realidad, y de modo tajante sobre Huaraz, Tricart sostuvo en ese entonces que, la ciudad debía ser reconstruida, pero en otro lugar distinto, porque la ciudad fue construida en el “encuentro de un accidente longitudinal, siguiendo el Santa, y de uno o dos accidentes transversales oblicuos, uno con relación al otro”, y continúa diciendo...

“Ello explicaría que la villa haya sido ya destruida dos veces (Siglo XVIII y 1970). Es imposible protegerse contra un tal peligro, incluso adoptando un tipo de construcción antisísmica cual sea su costo. La única solución es reubicar la ciudad. Esto choca con fuertes oposiciones psicológicas y ciertas maniobras demagógicas” (Tricart, 1973, pág. 14)²⁶.

Como se ha visto en la sección 2.2.3.6.2. Suelos finos o cohesivos. Plasticidad y liquidez (página 68), los suelos finos tienen mucha relación con el clima, además de provenir de la existencia de formaciones rocosas propiamente arcillosas, principalmente lutitas, pizarras o esquistos en un área. En el valle del Santa, las rocas generadoras de arcillas son poco frecuentes, por lo que su elevada presencia está más ligada al clima y evolución paleográfica del Pleistoceno y Holoceno, sabiéndose, por ejemplo, que el período interglacial

²⁶ Como resultó, la contundente opinión de Tricart, como geógrafo geomorfológico que dirigió al grupo de la cooperación técnica francesa que vistió la zona afectada por el sismo, no fue finalmente tomada en cuenta. Mucha discusión de fundamento entre los profesionales y científicos nacionales y extranjeros, pero también la psicología arraigada en la tierra por los habitantes, así como infaltables intereses de todo orden de autoridades y foráneos recién instalados, determinaron que la ciudad llegue a su condición actual, en el mismo lugar, pero mucho más grande. Han pasado 55 años del desastre, y no se sabe si la reconstruida ciudad, pasará en buenas condiciones un próximo sismo, o alud - aluvión de similar severidad. Se perdió la gran oportunidad de tener una pequeña, pero moderna ciudad planificada y reconstruida desde nuevas bases (como se dice comúnmente, reconstruida desde cero)

entre las dos últimas glaciaciones fue, sobre todo, cálido y lluvioso (Dollfus O. , 1965), proclive a la generación de arcillas. Por consiguiente, los sectores del valle, por encima de ~ 2,700- 2,800 msnm son aquellos donde predominan paulatinamente hacia arriba estos suelos finos. La presencia de agua subterránea superficial, se relaciona también a este clima, y a la cercanía de la fusión de los glaciares e infiltración – exfiltración en los depósitos cuaternarios del valle. Las pequeñas ciudades como Carhuaz, Marcará, Tingo, Recuay, Cátac, Ticapampa, Olleros y Conococha, como las principales del fondo del valle, tienen en mayor o menor medida este tipo de suelos.

La configuración topográfica en detalle, y los caracteres del subsuelo específico de cada sitio, son determinantes en la circulación, profundidad o superficialidad locales de las aguas freáticas, teniendo en cuenta la heterogeneidad de los depósitos cuaternarios del valle, que por lugares muy puntuales son de granulometría gruesa y muy cerca de ellos, de granulometría fina o a veces muy entremezclados, con casos frecuentes donde ciertos bloques rocosos caídos de los grandes aluviones, cambian completamente la circulación hídrica local del suelo, a veces profundizándola, a veces haciéndola superficial. Los efectos de compactación diferencial, hundimientos locales y otros, evidenciados por colapsos de viviendas, muros partidos o girados a causa del sismo etc, hacen notar todas estas condiciones de peligro, que son incluso mayores a los de los suelos arenosos, pero secos, de muchos lugares de la Costa. Sobre esta realidad, Tricart (1973, pág. 15) recomendó: “Es necesario establecer cartas (mapas) de formaciones superficiales para identificar las áreas sobre las cuales, los efectos de los sismos sean particularmente nocivas”.

Por debajo de 2,700 msnm, el clima se va haciendo paulatinamente más seco, llegando a ser ya casi semidesértico en altitudes de 1,500 msnm, como en Huallanca por ejemplo. La sequedad creciente, anula de manera paulatina la presencia de elementos finos en el suelo, que así, va resultando cada vez más grueso, mejorando su calidad geotécnica. Por contraste, en las zonas secas, de suelos más estables, la propia sequedad limita el poblamiento, y por ello, hay menos ciudades o estas son mucho más pequeñas.

Pequeñas ciudades ubicadas a altitudes menores de ~ 2,700 – 2,600 msnm, como Huaylas, Yungay y Caraz, tienen en general mejores suelos que los de Huaraz, Recuay, etc, y estos van siendo paulatinamente mejores al hacerse el clima cada vez más seco, en pueblos más bajos, como Sucre, Huallanca, La Pampa, Yuracmarca, entre muchos otros. En la parte baja de la vertiente occidental de la Cordillera Negra, pueblos como Yaután, Pariacoto o Chasquitambo, tienen en general suelos bastante compactos, pero en cambio, se hallan más cercanos a la Costa, siendo por ello, más sensibles a la subducción del frente de convergencia de placas. Algunos poblados de clima seco, como Caraz, tienen además una cierta cercanía a la activa Falla Regional, que es un peligro adicional nada menor. Sin embargo, las ventajas de mejores suelos en estos poblados de clima seco, casi se eliminan por la masiva construcción de viviendas de adobe. Por ello, la destrucción también ha sido importante en estos poblados. Hacia el Callejón de Conchucos, de clima templado, y húmedo a semihúmedo, la destrucción también está muy ligada al adobe y a los suelos localmente finos.

4.1.7.2.2. Efectos indirectos del sismo en la Sierra

Las numerosas muertes y destrucción causadas por el sismo en la Sierra, se debieron tanto a causas directas (vibraciones y aceleraciones) como a indirectas, por los numerosos movimientos de masa que se desencadenaron en las pendientes cordilleranas. La Figura 67 muestra dos grandes movimientos de masa habidos sobre el valle del Santa, en el mismo lugar, es decir, por masas de hielo y roca desprendidas del pico Huascarán Norte.

La Figura 67 (izquierda) muestra un alud-aluvión que se ha desprendido de un glaciar situado aguas arriba fuera de la foto (pico Huascarán Norte). Ese alud ocurrió en enero de 1962, ya empezada la estación de lluvias y cielos nublados; se desprendió sin mediar sismo alguno. La masa descendió violentamente por la quebrada y barrió al pueblo de Ranrahirca, el cual, fue reconstruido unos años después y volvió a ser barrido por otro alud-aluvión, causado esta vez por un sismo, el de 1970. Aunque ambos, fueron enormes,

el aluvión de 1970 fue mayor al de 1962, y tuvo la particularidad de que, unos 4 km antes de que la masa aluvional desemboque en el Santa, para barrer nuevamente a Ranrahirca, una parte superior del aluvión que descendía a gran velocidad chocando entre las paredes del profundo valle, encontró un pequeño cuello topográfico del borde derecho de ese valle y se desbordó. La masa en desborde se separó en otro brazo, encontrando en su camino final a la pequeña ciudad de Yungay (capital provincial), sepultándola. Se puede ver, en la Figura 67 (derecha), el lugar donde se produce el desborde y la dirección que tomó ese flujo, que no es ni el 10% de la masa aluvional caída hacia su colector natural, que es el abanico torrencial de Ranrahirca.

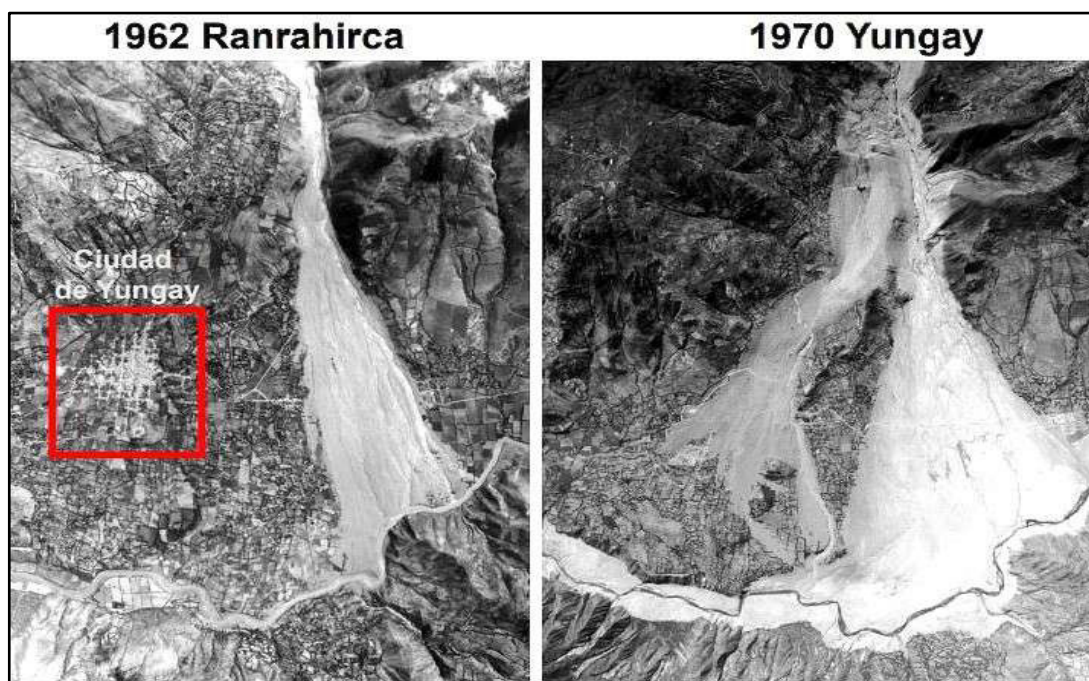


Figura 67. Alud – aluviones de 1962 y 1970 sobre Ranrahirca

Fuente. (CISMID, 2020)

<https://www.cismid.uni.edu.pe/efemeridessismica-el-gran-terremoto-de-ancash-31-05-1970/>

La Figura 68 muestra, 3 meses después del sismo de mayo de 1970, al alud – aluvión que sepultó a la pequeña ciudad de Yungay y nuevamente al poblado de Ranrahirca. El sismo causó la caída de una pared glaciar (roca y hielo a unos 6,500 - 6600 m de altitud) del pico norte del Huascarán, que se desprendió en caída libre unos ~ 700 m y luego arrastró pendiente abajo, una enorme masa de roca, morrenas y depósitos superficiales a gran velocidad (diversos autores citan más de 200 km/h). Al caer hasta una altitud de unos

4,000 m, la masa tomó el pequeño y profundo valle que drena hacia el río Santa, en cuya desembocadura está el pueblo de Ranrahirca. El recorrido total del aluvión para unos 15 km del valle fue de 2 - 3 minutos.



Figura 68. Alud a causa del sismo de 1970 sobre Ranrahirca

Fuente. (Welsch, 1970) En <http://jcsfhuaraz.blogspot.com/2020/04/50-anos-del-terremoto-de-mayo-1970.html>

En la foto se ve la gigantesca masa aluvional precipitada sobre la reconstruida pequeña población de Ranrahirca, y la pequeña masa lateral izquierda que sepultó a Yungay, separadas ambas por colinas que bordean la quebrada que desciende a Ranrahirca. De los más de 50,000 habitantes que murieron o desaparecieron con el sismo en la Sierra ancashina de 1970, Ames y Francou (1995, pág. 59), indican que al menos 18,000 murieron sepultados en Yungay; 170 murieron en Ranrahirca, 300 en Huashau y otros más, río abajo. Es decir que, casi la tercera parte de los pobladores ancashinos que desaparecieron ese día, fue por este enorme efecto indirecto del sismo en la zona. Hubo muchos más deslizamientos y derrumbes en gran parte de las Cordilleras Negra y Blanca, tanto hacia la vertiente que desciende a la Costa, como en las que descienden al valle del Santa y al Callejón de Conchucos, pero fueron movimientos entre pequeños a grandes, medibles en decenas y centenas de m^3 de material desprendido, hasta varios miles y decenas de miles de m^3 . Pero aluviones como este, son de magnitudes excepcionales (decenas de millones de m^3). Plafker & Ericksen (1978), y Hofmann et al. (1983), citados

en Ames y Francou (1995, pág. 59) señalando los siguientes caracteres del aluvión:

- ♦ Volumen de material del aluvión, de 50 millones de m³ como mínimo, de los cuales 10% (5 millones de m³) fue hielo.
- ♦ Descenso de la masa aluvional que alcanzó velocidades de 280 km/h; esta masa cruzó y represó al río Santa con una ola que alcanzó 80 m de alto en la parte baja de los cerros de la Cordillera Negra
- ♦ El río Santa represado formó un lago de 1 km de largo, la represa fue luego sobrepasada y sobrevino un aluvión que por 150 km de largo barrió el valle hasta muy cerca al mar.
- ♦ La masa aluvional que desbordó el cauce antes de Ranrahirca y se dirigió a la planicie de Yungay, fue una corriente fluida de 5 a 10m de espesor y cubrió toda la ciudad, excepto la colina del cementerio y unas palmeras en la Plaza de Armas.
- ♦ Hubo bloques rocosos de decenas de toneladas, que, por efectos de rebote fueron lanzados a velocidades de 800 km/h. (Sobre esta anotación, cabe observar la Figura 69).

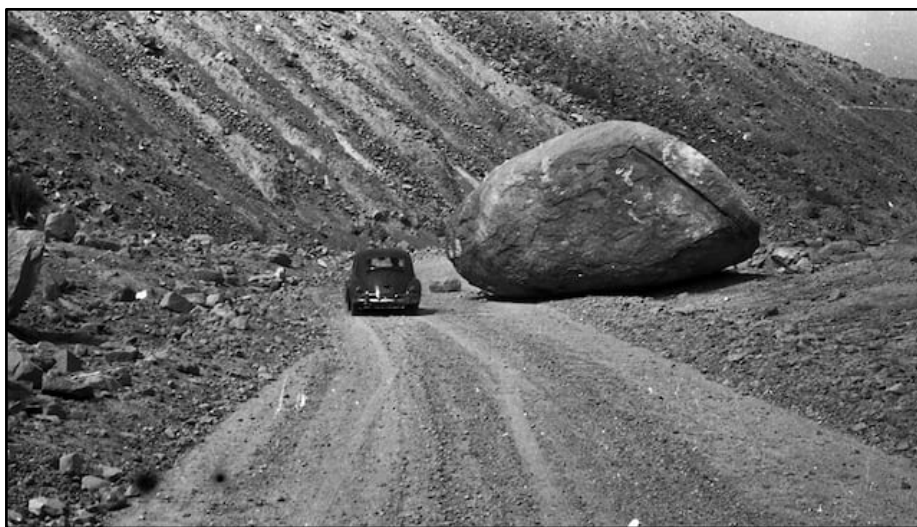
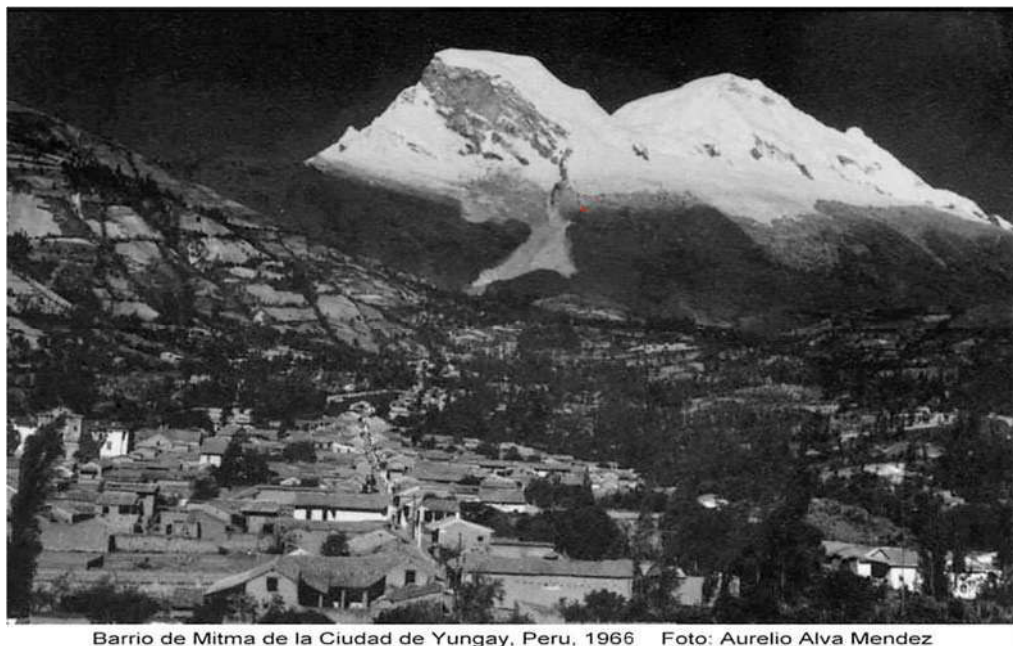


Figura 69. Bloque rocoso de aproximadamente 200 ton)

Bloque lanzado del batolito de la Cordillera Blanca durante el alud, visto dos días después del sismo, en la carretera a Yungay. Fuente. (Batalla, 2025).

La Figura 70 muestra la ciudad de Yungay pocos años antes de ser sepultada por el aluvión de 1970. Pero se observa que una masa se ha desprendido del Huascarán y generó un gigantesco aluvión (1962), que pasa a un lado de

Yungay, por su canal natural hacia el Santa, para destruir, ese año, al pequeño pueblo de Ranrahirca, sepultando a sus pocos miles de habitantes.



Barrio de Mitma de la Ciudad de Yungay, Peru, 1966 Foto: Aurelio Alva Mendez

Figura 70. Yungay vista después del aluvión de Ranrahirca (1966)

Fuente: (Casaverde, 1969 - 1970) <http://jcsfhuaraz.blogspot.com/2020/04/50-anos-del-terremoto-de-mayo-1970.html>

Sobre el aluvión anterior al sismo de 1970, Dollfus y Peñaherrera (1962, págs. 4-18), en un informe a la Sociedad Geográfica de Lima, describen lo siguiente:

“El 10 de enero de 1962, poco después de las 6 de la tarde, una parte de la cornisa suroeste del pico norte del Huascarán. Minutos más tarde una ola de lodo y arenas transportando enorme cantidad de rocas y bloques de hielo con dimensiones variadas llegaba al río Santa luego de descender casi 4,000 m en un recorrido de solo 16 km, destruyendo y cubriendo de lavas torrenciales una serie de aldeas y el pueblo de Ranrahirca, en los cuales causó miles de víctimas...Las acciones glaciares, periglaciares y torrenciales están presentes en el paisaje por todas partes. Altos casquetes de hielo, así como glaciares suspendidos a más de 5,000 m de altitud, reposan sobre superficies rocosas pulidas. Pequeñas lenguas glaciares, entre morrenas muy anchas pro todavía frescas, atestiguan el retroceso actual de las nieves...En la desembocadura de los principales valles afluentes del Santa por la

margen derecha, grandes conos de deyección, recubiertos con bloques de muchos metros de altura, señalan el rol de las catástrofes, ligadas ya sea a la ruptura de diques de los lagos y lagunas, como fue el caso de Huaraz, en 1941, o a la caída de sectores de glaciares en retroceso, como el que causó la catástrofe de Ranrahirca”

Sobre la condición de los glaciares tropicales del área y en retroceso, ya conocido por entonces, estos dos investigadores destacan lo siguiente:

“Las precipitaciones se reparten entre los meses de noviembre a abril, pero la Cordillera está prácticamente por las mañanas durante los meses de mayo a agosto. A partir de este último mes y a veces antes, los altos picos se cubren por las tardes y se originan tempestades a menudo acompañadas de nieve. La estación más cálida – verano – en este período el deshielo durante el día puede producirse hasta 5,600 - 5,800 msnm. Las partes inferiores del glaciar, sobre todo cuando no están cubiertas por nieve, cuyo albedo o índice de refracción es superior al del hielo, pueden fundir abundantemente, por efecto de la fuerte insolación de estas latitudes...Infelizmente los datos climáticos indispensables no existen. Faltan igualmente los estudios sobre la física de los glaciares en regiones tropicales. Sin embargo, un hecho es cierto: a principios de enero de 1962, la parte baja del glaciar oeste del Huascarán, muy agrietado y con numerosas fisuras menores, estaban llenas de agua proveniente de la fusión y las precipitaciones, lo que aumentó la densidad. Además, una abundante circulación de aguas sub glaciares, que llegaba incluso hasta el contacto entre la roca subyacente bien pulida y el hielo, donde normalmente existe una película líquida producida por el frotamiento del glaciar que está desplazándose, limitaba todavía la adherencia del hielo sobre la roca, al originar una superficie mayor de deslizamiento”.

Estos últimos señalamientos de Dollfus y Peñaherrera, destacan el papel de la temperatura estacional, de la fusión y circulación de aguas sub glaciares, como elementos esenciales de la caída de glaciares y posteriores desastres por grandes aluviones sin sismos de por medio. Pero en estas zonas de

grandes montañas que tienen desniveles y caída libre de picos glaciares de 1 a más de 2 km, se debe sumar la ocurrencia de sismos, como el de 1970, que provocó un aluvión mayor al de 1962. Naturalmente, estos no han sido los únicos, Ames y Francou (1995, págs. 56-58), hacen un recuento en la zona desde el siglo XVIII, enumerando 23 eventos entre mayores y menores, algunos de graves consecuencias. Entre ellos destacan los siguientes:

- | | | | |
|--------------|---|---|---|
| • 06/01/1725 | Huandoy
Pueblo de Ancash | Avalanchas
(sismo)
Aluviones | 1500 muertos |
| • 06/01/1725 | Huaraz | Avalanchas
(sismo)
Aluviones | 1500 muertos |
| • 13/12/1941 | Lag. Acoshacoscha
(Palcacocha) y
Jircacocha
(Quebrada Cojup) | Ruptura del
dique
de las lagunas y
aluviones | 4000 muertos en
Huaraz
Mitad de la ciudad
destruida |
| • 17/01/1945 | Lag. Ayhuinyaraju
y Carhuacocha
Nevado Huantsán | Ruptura del
dique
de las lagunas y
aluviones | 300 muertos en
Chavín. Ruinas
preincaicas
sepultadas en
parte |
| • 10/01/1962 | Huascarán norte | Avalancha de
hielo y aluvión | 4000 muertos en
Ranrahirca
Daños muy
importantes hasta
el río Santa |
| • 31/05/1970 | Huascarán norte | Avalancha de
hielo,
desprendimiento
de rocas y
aluvión
(sismo) | 20,000 muertos en
Yungay y
Ranrahirca |

O sea, hay toda una historia de muerte por desastres aluvionales de los glaciares de la Cordillera Blanca, algunos de ellos, catastróficos, con miles de muertes como efectos indirectos de sismos, y otros por la dinámica natural de los glaciares tropicales. La gran mayoría de aluviones se ha dirigido a la depresión del Santa, y unos pocos al callejón de Conchucos, uno de los cuales, por poco destruye al monumental conjunto arqueológico de Chavín.

El caso es que las ciudades se hallan en el valle, y muchas veces en sitios comprobadamente peligrosos, como Huaraz, a la que Tricart señalaba en los años 70 como inviable en su ubicación y que esta debería ser reubicada (ver pág.198). Es que varias ciudades se han emplazado en los abanicos torrenciales por donde descienden los flujos normales y excepcionales de las cumbres glaciales, Huaraz, Ranrahirca y Caraz son ejemplos notables, pero no los únicos. Ver Figura 71.



Figura 71. Mapa geomorfológico de Huaraz

Fuente. (Tricart, 1973)

El mapa, tiene en la parte baja las laderas montañosas de la Cordillera Negra, con una serie de escarpes de antiguos derrumbes ya casi estabilizados. Al frente, el abanico torrencial del río Quilcayhuanca, que cruza Huaraz y desemboca en el Santa. El abanico está indicado con una serie de flujos recientes y actuales, encerrado en una coloración oscura calificada como zona de desequilibrio permanente y grave. Algunos conos laterales desembocan en este abanico torrencial, y hacia la izquierda se muestran sectores estables (puntos negros separados en fondo blanco y otras zonas que pueden generar flujos de barro, peligrosas para la construcción. Es uno de los mapas preparados por el Centro de Geografía Aplicada de Estrasburgo,

en 1970, a pedido del Gobierno Peruano como colaboración francesa con fines de reconstrucción de las poblaciones del Callejón de Huaylas.

La magnitud de los grandes movimientos de masa como los de Raranhirca (1962) y Ranrahirca - Yungay (1970) son excepcionales, y están entre los mayores registrados en el mundo. Sin embargo, en la Sierra del Perú, incluso en zonas sin glaciares, ha habido movimientos de masa incluso mayores a los habidos en Ancash. En Huancavelica, por ejemplo, sobre el estrecho valle del río Mantaro, en abril de 1974, ya concluida la estación lluviosa, pero con los suelos muy humedecidos, hubo un deslizamiento inmenso, estimado en más de mil cien millones de m³ (Vílchez, 2013, pág. 173); es decir diez veces mayor al aluvión de 1970 en Ancash, y que ocurrió sin influencia de sismo alguno. La inmensa masa que descendió en Huancavelica desde las cumbres de la margen derecha del río Mantaro, a unos 4,200 m hasta 2,600 m de altitud en el fondo del valle, mató a unas 450 personas de comunidades muy pobres que vivían en las laderas deslizadas. La masa caída al río, generó un muro de más de 1 km de largo por 170 m de alto, que represó al río Mantaro por varios meses (este río tiene al menos el doble de caudal que el río Santa en los tramos que fueron represados por ambos movimientos de masa).

El desembalse natural que siguió tres meses después del represamiento, provocó un aluvión que barrió el valle 250 km aguas abajo, pero las escasas poblaciones habían sido ya evacuadas previamente porque se esperaba un desastre aluvional, el cual destruyó totalmente los pequeños poblados del valle ya evacuados. Otras regiones interandinas, también tienen ocurrencias pasadas de grandes magnitudes, por lo que, este peligro, al que se suma el riesgo sísmico, debe ser constantemente evaluado en las ciudades andinas. Para el caso de Ancash, Ames y Francou (1995, pág. 59), indican que el aluvión que sepultó Yungay y al reconstruido pequeño pueblo de Ranrahirca, “se le puede considerar como la mayor catástrofe conocida en la historia directamente provocada por un glaciar”. Señalan, además que:

“Lo más inquietante es el carácter recurrente de este tipo de acontecimiento: un glaciar de cúpula que desciende poco a poco hacia el vacío, la fragilidad estructural de una pared rocosa que la predispone

a los derrumbamientos, una desnivelación de más de 4,000 m en 14 km, una región donde los sismos son frecuentes e intensos, que reúne todas las condiciones” (Ames & Francou, 1995, pág. 59).

Para 1995, en que Ames y Francou, presentan su artículo sobre la Cordillera Blanca, la población y autoridades todavía estaban muy sensibilizadas por los desastres naturales un tanto seguidos que ocurrieron. Desde los años 80, Huaraz y las ciudades del valle, ya reconstruidas, habían experimentado un fuerte crecimiento del turismo nacional e internacional, el cual, hasta los años del sismo, era una actividad apenas incipiente. Las construcciones en Huaraz empezaron a ocupar tímidamente los espacios que se consideraron intangibles en el abanico torrencial. A inicios de los 90, cuando la subversión armada fue derrotada y la crisis económica nacional amenguó, el turismo y la economía crecieron notablemente.

La población urbana de Huaraz había cambiado a una población en gran parte foránea y sin la identidad que tenía un pueblo conservador y tradicional como el de Huaraz anterior al sismo (muchos sobrevivientes del sismo migraron principalmente a Lima y secundariamente a Trujillo y otras ciudades), y empezaron a ocupar de forma intensiva las zonas peligrosas de Huaraz y otras ciudades del valle, muchas de las cuales fueron declaradas como intangibles, parques de recuerdo etc. Hoy, 30 años después de lo señalado por Ames y Francou (pero también por muchos investigadores extranjeros y nacionales), la sensibilidad parece haberse olvidado un tanto; la ciudad tiene ahora más del triple de población que tenía en 1970. La pandemia y los años últimos de cierta recesión, detuvieron un poco el fuerte crecimiento poblacional, el cual seguramente volverá a ser intenso si el país retoma el crecimiento económico y reducción de pobreza que tuvo entre 2000 y 2015. Han pasado 55 años del sismo de 1970, sin que hayan ocurrido nuevos aludes y aluviones de proporciones, pero la amenaza sigue vigente, sobre todo para los conos torrenciales más peligrosos donde se hallan las principales ciudades del valle del Santa, (como los que se aprecian en los mapas geomorfológicos del Instituto de Geografía Aplicada de Estrasburgo, elaborados casi inmediatamente después del sismo).

4.1.8. Los sismos de Arequipa e Ica del presente siglo

En el presente siglo, el 23 de junio de (2001) en la Costa norte de Arequipa, y el 15 de agosto, en la Costa norte de Ica (2007), ocurrieron dos potentes sismos que afectaron severamente en esos años la región sur del país. A decir de Tavera (2002, p.1), “el terremoto del 23 de junio se constituye como el más grande de los ocurridos en el borde oeste de Sudamérica en los últimos 133 años” (cita expresada para el año 2002; en los años subsiguientes sobrevendrían tres sismos más violentos en las costas de Chile: en 2010 (M:8.8), 2014 (M:8.2), y 2015 (M:8.4))

Los sismos de Arequipa e Ica son considerados según Keller y Blodgett, (2007, pág. 36), en la escala de “muy graves” Si bien, la ubicación geográfica de ambos epicentros tiene una distancia de ~ 300 - 350 km, tienen en cambio muchas similitudes, tanto desde sus aspectos de fenomenología natural, como del de las condiciones sociales y económicas, es decir, de las vulnerabilidades del área en que incidieron esos años.

4.1.8.1. 4.1.8.1 El sismo de Arequipa (2001)

El sábado 23 de junio, a las 3.33 pm, un potente sismo de M:8.2 y 30 km de profundidad, con epicentro en el mar, cerca de Atico y de la pequeña ciudad de Chala (Kosaka, 2001 y Tavera, 2002, citados en el Cuadro 8). Chala tenía ese año alrededor de 10,000 habitantes. La Figura 72 presenta el mapa de isosistas general para el territorio afectado, pudiéndose ver que la ciudad de Chala, que está más próxima al epicentro, se ubica entre las isosistas VII y VIII, mientras que Camaná y Mollendo, más alejadas, se encuentran dentro de la isosista que va de VIII a IX. Es decir, a una distancia mayor hacia el sur los daños fueron más intensos. Las distancias son considerables: Chala está a solo unos 40 km del epicentro; Camaná, a 150 km; Mollendo, a 230 km; Ilo, a 325 km; Tacna a 450 km. Entre las ciudades de la Sierra, Caravelí, (capital provincial del territorio en que fue el epicentro), está a 70 km del epicentro; la

ciudad de Arequipa, a 270 km y Moquegua a 350 km. Por el norte, también en la Sierra (Ayacucho), Coracora, está a 120 km y Puquio, a 160 km.



Figura 72. Sismo de Arequipa, epicentro e isosistas generales

El mapa muestra que el hipocentro (símbolo en estrella) estuvo ubicado muy cerca de la localidad de Chala. Los valores de las isosistas se extienden en intensidad principalmente hacia el sur, lo que sugiere una clara propagación de la ruptura en esa dirección principal. *Fuente.* (Tavera, 2002, pág. 42).

Tavera (2002, pág. 1), señala que el número de muertos en toda la región afectada fue de 74, y 64 desaparecidos; 2689 heridos. Es, un número de víctimas bastante bajo considerando lo potente que fue este sismo. Las víctimas y daños económicos y materiales se produjeron sobre todo hacia el sureste del epicentro, habiendo sido la intensidad bastante alta (entre VII y VIII) hasta Tacna y Arica, esta última, a 500 km del epicentro, mientras que, por el norte, Puquio, situada a la tercera parte de la distancia que hay entre el epicentro y Tacna, registró una intensidad de solo V a VI, ya irrelevantes. La violencia del sismo en la zona sur se evidencia, por ejemplo, en la Figura 73, que muestra una vivienda, ya inhabitable, en Tacna, muy lejos del epicentro., en la que se aprecia que el segundo piso de la vivienda ha colapsado, inhabitable. El terreno ha sufrido asentamientos diferenciales que causaron los severos daños a la edificación que es de material noble.

El severo daño producido en la vivienda no es un efecto singular; sino un reflejo común del severo daño que este sismo produjo en todo Tacna. Si bien el número de víctimas mortales y desaparecidos fue afortunadamente pequeño, no fue así en cuanto al número de damnificados, que pueden estimarse en unas 300,000 personas, que perdieron sus viviendas o que quedaron severamente afectadas, siendo este un efecto más acorde a la potencia que tuvo el sismo. La Figura 74, muestra el número de viviendas afectadas, por departamento en toda el área.



Figura 73. Efectos del sismo en una vivienda en Tacna

Fuente. (Liendo, 2021). <https://peru21.pe/peru/terremoto-de-84-en-peru-recordemos-el-sismo-del-2001-que-afecto-arequipa-tacna-y-moquegua-nnsp-noticia/>

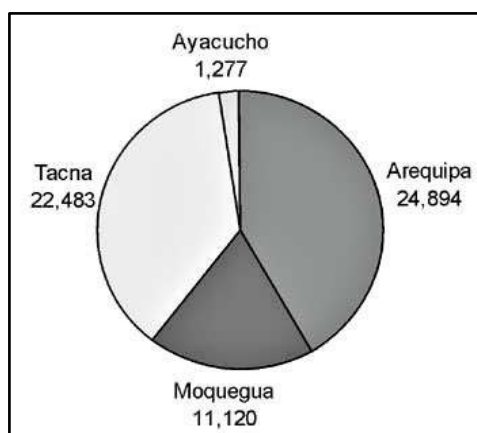


Figura 74. Número de viviendas afectadas por departamento.

Fuente: (Vallenas, 2001)

https://www.eird.org/esp/revista/No4_2001/pagina7.htm

Notar en la Figura que el sur de Ayacucho, mucho más cercano al sismo, solo tiene el 2% de viviendas afectadas, en tanto que Tacna, situada 3 veces más lejana que el sur de Ayacucho, comprendió el 38%; Arequipa, el 42%, y Moquegua, el 18%. Si bien las mayores poblaciones están en los departamentos de Arequipa, Tacna y Moquegua y, por ello resultaron con el mayor número de viviendas afectadas, la cercanía de Ayacucho y su elevado número de viviendas de adobe, pudo representar también allí una mayor afectación, teniendo en cuenta la severa la potencia del sismo. La directividad del movimiento hacia el sur, se muestra entonces, de un modo muy claro.

La Figura 75 muestra una calle de la ciudad de Moquegua, situada en la parte baja de la Sierra occidental, a 350 km del epicentro, unos días después del sismo.



Figura 75. Calle céntrica de Moquegua, a días de ocurrido el sismo

Nótese el severo nivel destructivo. *Fuente.* (Apaza, 2015)

<https://diariocorreo.pe/edicion/moquegua/moquegua-con-marcha-recuerdan-hoy-fatidico-terremoto-del-2001-596803/?ref=dcr>

Para ese año la ciudad de Moquegua debía tener unos 35,000 habitantes, y en la vista se aprecia que los postes y paredes que bordean la calle, en el centro de la ciudad, reflejan un elevado nivel de destrucción, aunque este se produjo mayormente en viviendas de adobe, con afectaciones menores a medianas en edificaciones de material noble (se las observa no colapsadas). Las viviendas son mayormente bajas, de uno y dos pisos, y los escombros

caídos por el sismo no cubrieron masivamente el ancho de la calle. En esta condición, ante un sismo potente y diurno, en una tarde de día no laborable, la población en sus viviendas al sentir el sismo ha podido salir en su mayoría a tiempo a la calle, evitando así ser víctima de la caída parcial o total de sus viviendas en calles no muy angostas.

Según mediciones de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile (Boroschek et al., 2001, pág. 10), la máxima aceleración registrada en la estación Arica, Costanera, fue de $0.33 g$ en un suelo que es representativo del común de áreas desérticas costeras del sur del país y norte de Chile. Pero, este valor fue medido en Arica, a 500 km del epicentro. En Moquegua, también lejos (350 km del epicentro), la aceleración máxima fue de 295.3 cm/s^2 , lo que equivale a $0.30 g$, es decir, aceleraciones máximas similares para estos dos lugares alejados del sismo. Considerando solo las distancias, las aceleraciones máximas deberían ser sensiblemente menores en Arica, pero no es así, lo que refleja sin duda las influencias locales. Así, por ejemplo, los suelos de Arica son más arenosos, menos gruesos que los que generalmente hay en Moquegua, ya en la Sierra, donde la montaña desértica proporciona masas coluviales más rígidas. Asimismo, seguramente aceleraciones mayores deben haber ocurrido en lugares más cercanos al epicentro a la vez que en suelos más localizados de humedales y predominio de elementos finos.

El hecho de que el sismo del 2001 haya sido diurno y en día no laborable (sábado a media tarde), parece una causa principal de que el número de víctimas haya sido bastante bajo, a pesar de la elevada potencia del sismo. Pero otras condiciones favorables relacionadas con los caracteres geográficos del medio, explican también la muy baja tasa de mortandad del sismo. Al respecto se indican las siguientes.

1. Una condición bastante general de las ciudades costeras, es que estas en su mayoría se hallan en zonas poco montañosas, y tienen espacios urbanizables llanos más amplios; las calles tienden a ser anchas, a diferencia de los pueblos andinos que ocupan fondos de valle muy estrechos o terrenos llanos de poca amplitud, donde las viviendas y

edificaciones se aprietan entre calles estrechas. No obstante, es también cierto que muchas ciudades costeras están bordeadas de cerros a veces de pendiente y altura considerables, que cada vez vienen siendo sujetas de ocupación por viviendas y edificaciones, asemejándose a la condición estrecha y apretada de numerosas ciudades andinas ubicadas en las regiones más montañosas. Pero, para el año 2001, la ocupación de estos espacios costeros montañosos aún era reducida o incipiente.

2. Aunque con algunas excepciones, la región en su conjunto es un medio territorial poco poblado, con ciudades que eran en el año 2001 (y aún siguen siendo) en su mayoría pequeñas o muy pequeñas, salvo el caso de la ciudad de Arequipa (por entonces casi 800,000 habitantes, y Tacna, casi 150,000). El resto de ciudades eran pequeñas y dispersas en una extensa área de baja densidad poblacional, especialmente en la Costa. Condiciones históricas, pero principalmente la sequedad climática que caracteriza a la región suroccidental determinaron una baja ocupación del territorio. Por contraste, debe decirse que la Costa poco poblada del Sur, se halla más cerca del frente de subducción, que genera los sismos más frecuentes y potentes.
3. La alta sequedad climática sur occidental, ha conducido a que los suelos de la extensa región sean mayormente granulares, con poca presencia de finos, y menos aún, de suelos plásticos. Esta caracterización general es en la región aplicable sobre todo a la Costa, y a los flancos montañosos accidentados de la Cordillera Occidental y grandes volcanes, excluyendo las reducidas zonas de humedales costeros, sectores puntuales en los valles agrícolas aledañas a ríos cercanos al mar, pequeñas depresiones en las altiplanicies, y ciertos lugares de los valles interandinos que sostienen en parte a pequeñas ciudades de la Sierra. Los suelos granulares son por lo general de mejor consistencia ante sismos; menos compresibles, y por lo mismo, menos deformables que los suelos finos, aunque pueden presentar problemas severos de licuación y otros (mencionados en la sección 2.2.3.6.1. pág. 62-68), esto ocurre principalmente cuando son suelos mal graduados y, sobre todo, cuando

tienen napas freáticas altas o superficiales, algo que, en el clima seco a muy seco de esta parte del país es poco frecuente, excepto en los valles agrícolas de baja altitud y en los humedales costeros y altoandinos.

Desde el punto de vista del riesgo sísmico, el marco físico geográfico del sur presenta condiciones variadas más o menos complejas. Por un lado, la fuerte sequedad climática que no ha contribuido a la presencia de grandes masas poblacionales urbanas, más bien a poblaciones dispersas, salvo el caso de la ciudad de Arequipa. También, que la propia sequedad climática ha propiciado la formación de suelos mayormente gruesos que, en su mayoría tienen condiciones geotécnicas medianas a buenas. La geología es heterogénea, pero de rocas en su mayor parte muy compactas, tanto en la Cordillera de la Costa, como en la Cordillera Occidental y grandes volcanes.

En cambio, la cercanía al frente de subducción y la tectónica, que es muy activa en esta región, son elementos de elevado peligro sísmico. Al respecto, Macharé y Ortlieb, (1991, pág. 38), han evidenciado en sus estudios que las velocidades de levantamiento en el Pleistoceno superior en la Costa sur, son notablemente elevadas entre Lomitas y Atico (pequeñas urbes cercanas al foco sísmico del 2001), y que en San Juan de Marcona, (un poco más al norte), comprobaron 0.7m de levantamiento por 1,000 años, que es, según estos autores, “la más alta velocidad de levantamiento reportada en América del Sur”. A esta alta movilidad tectónica de la corteza en esta región, hay que sumarle la también notable presencia de fallas activas con movimientos registrados en el Pleistoceno, inclusive en los últimos 15,000 años. Se puede ver la numerosa presencia de estas fallas en el Cuadro 1 (pág.26), en las zonas del Cerro Cordilleras, Toquepala, Pampa del Purgatorio y Villacoto, afectando a las pampas costeras, a la Cordillera de la Costa y a la Cordillera Occidental en sus secciones cercanas a la Costa.

La Figura 76, presenta la zonificación geotécnica en el ámbito de la ciudad de Camaná, que comprende suelos más o menos representativos de la Costa sur; mapa elaborado considerando las características mecánicas y dinámicas de los suelos como terrenos de cimentación, según la Norma E-030 Diseño Sismorresistente.

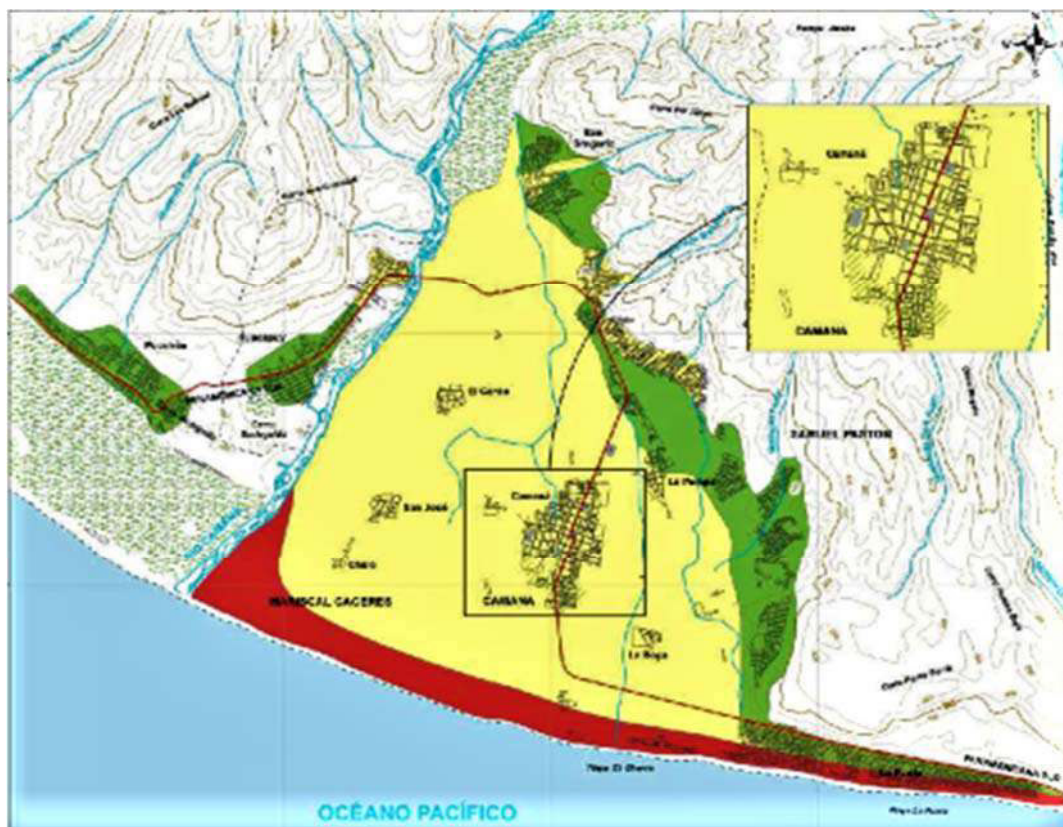


Figura 76. Mapa de Zonificación Sísmica – Geotécnica de Camaná
Fuente. (Tavera, 2014b, pág. 133)

El mapa presenta las siguientes 3 unidades de calidad geotécnica de suelos: la zona 1, representada en color verde; la zona 2, en amarillo y la zona 4, en rojo. Los autores (Tavera y el equipo técnico no encontraron en el área, suelos de la zona 3). A continuación, se indican aquí, ciertos caracteres fisiográficos y geomorfológicos complementarios a los establecidos en la zonificación, desde el punto de vista físico geográfico aplicable al riesgo sísmico.

La fisiografía del área es la de una zona de montañas que descienden prácticamente hasta el mar (zonas en color blanco con curvas de nivel). Las montañas están cortadas por el río Camaná, que forma un importante valle agrícola, desde muy cerca de su desembocadura en el mar. Es un abanico aluvial que incluye en su parte central a la pequeña ciudad de Camaná (capital de la provincia, que tiene actualmente casi 50,000 habitantes, que en el año del sismo debió tener unos 35,000). El abanico está intensivamente cultivado y tiene forma de delta, pudiéndose notar que crece ganando tierras al mar.

La mayor parte del abanico se constituye en tierras de la zona 2, materiales aluviales depositados por el río en su desembocadura, suelos granulares con algo de presencia de finos y napa freática entre superficial a intermedia. El abanico está bordeado por suelos de la zona 1, mejores geotécnicamente, porque tienen mayor presencia de material grueso, que es más rígido, a la vez que es mucho menor la presencia de finos; la napa freática es profunda. Pegada al mar están los suelos de la zona 4, que son los más riesgosos, básicamente porque son areno gravosos mal graduados, con fuerte componente de origen marino, sales y sobre todo, napa freática superficial. Todos estos suelos están bordeados por las montañas, que no están consideradas en la clasificación, pero que son muy rígidas cuando afloran directamente las rocas del substrato, pero que pierden rápidamente calidad geotécnica cuando están cubiertos por depósitos de arena eólica suelta, o por acumulaciones coluviales en fuertes pendientes (mayores a 25°) que pueden ceder a la gravedad en caso de fuertes sismos.

Este marco geográfico de suelos en Camaná es común para la amplia mayoría de ciudades de la Costa, las cuales en su mayoría se componen de materiales aluviales, eólicos y coluviales en este orden de preponderancia. Asimismo, comprenden cada vez más suelos rocosos que responden directamente a la naturaleza petrográfica de los substratos geológicos respectivos, que hasta hace pocos años no eran sitios urbanizados pero que ahora, por el fuerte crecimiento poblacional costero, vienen siendo ocupados con viviendas en gran parte precarias o autoconstruidas sin planificación ni precaución alguna. Los suelos descritos para Camaná se encuentran en Lima, Chimbote, Ica, Moquegua, Tacna, etc. Para el caso de Tumbes y Piura, la situación es un tanto distinta, porque los recurrentes fenómenos El Niño, han conducido a la presencia significativa de elementos finos en sus suelos, incluso de componentes plásticos, como se ha visto en la sección 2.2.3.6.2. Suelos finos o cohesivos. Plasticidad y liquidez (pág. 68), que resultan excepcionales en la Costa central y sur.

Si bien es una región altamente sísmica, desde el punto de vista geotécnico, los suelos de las ciudades de la Costa son bastante seguros en buena parte

de sus terrenos, especialmente los suelos aluviales, llanuras desérticas y bordes de quebradas. Habría que evitar los suelos de origen marino, al igual que los suelos arenosos muy sueltos, y los depósitos coluviales de las zonas montañosas de mayor pendiente, suelos que en conjunto son altamente restrictivos para las edificaciones.

4.1.8.1.1. Efectos indirectos del sismo, el Tsunami de Camaná

Kuroiwa (2005, pág. 213), indica que 21 minutos después del sismo, un tsunami llegó a la costa de Camaná; luego llegó la segunda ola con mayor fuerza, seguida por 4 o 5 olas más. Señala que se inundaron varios kilómetros cuadrados, que las olas penetraron en el valle entre 400 y 500 m, y que la fuerza hidrodinámica de las olas colapsó muros de concreto; que una casa de material noble fue derrumbada por la erosión de la fase recesiva de la corriente de agua, que se perdieron las cosechas de la parte inundada y que se salinizaron casi 2,000 ha de terrenos agrícolas.

Sin embargo, el efecto trágico y mayor del tsunami, que fue de carácter netamente local (Tavera, 2002, pág. 19), fueron las víctimas fatales que el tsunami causó, las cuales fueron 23 personas fallecidas y 64 declaradas desaparecidas (Tavera, 2002, pág. 40). Por circunstancias fortuitas, esta vez, el azar generó la penosa tragedia del tsunami para numerosas familias de Camaná, ya que el terremoto se produjo en una tarde de sábado en pleno invierno de junio, cuando solo muy pocas personas (básicamente guardianes de casas de veraneo) habitaban las viviendas construidas en la playa de Camaná. Por desgracia, esa tarde se habían reunido un grupo de pobladores para una jornada de trabajo comunal; fueron sorprendidos por el sismo, y en los minutos siguientes no atinaron a guarecerse en los cerros que se hallan cerca, a un máximo de 500 m de la playa (Ver Figura 77)

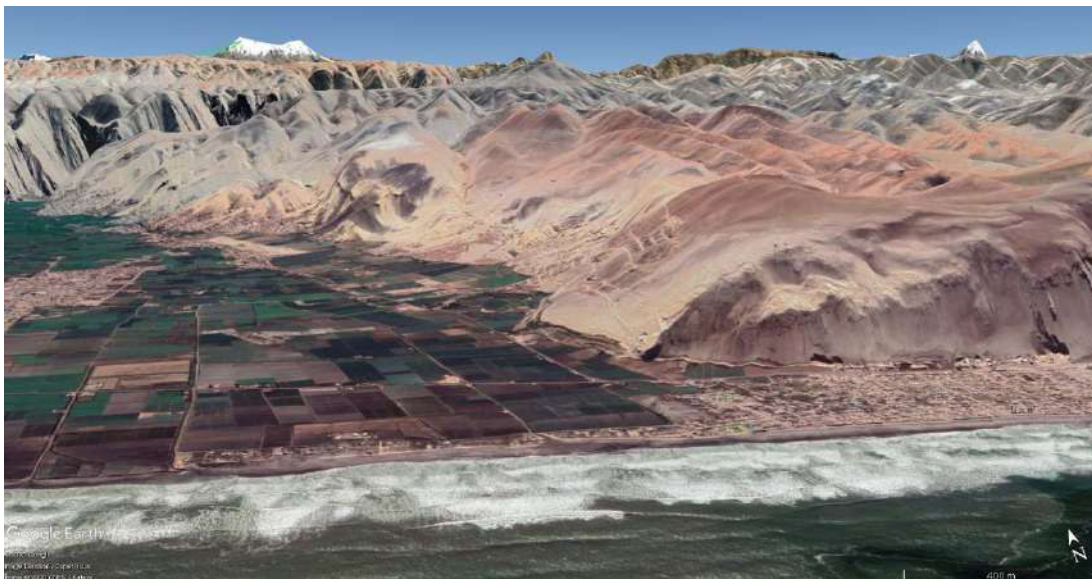


Figura 77. Abanico aluvial del río Camaná y zona del tsunami

La imagen muestra el abanico aluvial del río Camaná. Forma un valle intensamente cultivado, que incluye a la pequeña ciudad de Camaná. El valle corta las montañas de la Cordillera de la Costa y, muy lejos, al fondo se aprecian los glaciares de la Cordillera Volcánica (Coropuna y Ampato) a 110 km del litoral. A la derecha del valle, y al pie de las montañas desérticas se halla el balneario veraniego La Punta, que fue barrido por el tsunami.

Fuente. Google Earth

Camaná es una urbe un tanto alargada, cuya longitud es de casi 2.5 km. En su borde más cercano al mar (a 1,6 km), donde las viviendas están a 10 - 11 msnm. La mayor parte de la ciudad se halla entre 14 – 16 msnm (datos altitudinales observados en Google Earth). Los barrios recientes (La Pampa, San Gregorio y otros), se hallan por encima de 50 msnm. De modo que el oleaje máximo de 6 – 7 m solo afectó las tierras más bajas y cultivadas, y como área habitada, solo al balneario veraniego La Punta. El tsunami de 2001 llegó hasta la base de los cerros por donde pasa la Carretera Panamericana rumbo a Arequipa, la cual se halla entre 500 a 600 m de la línea litoral (medición en campo). La Figura 78 muestra el nivel de daños que causó el tsunami en su sector más destruido (en otros sectores muchas viviendas bien construidas tuvieron daños menores), y la Figura 79, muestra el área que llegó a ser inundada por el tsunami.



Figura 78. Daños causados por el tsunami en el balneario La Punta
Fuente. (Hanco, 2018) <https://diariocorreo.pe/edicion/arequipa/el-tsunami-que-destruyo-la-punta-en-camana-798641/?ref=dcr>

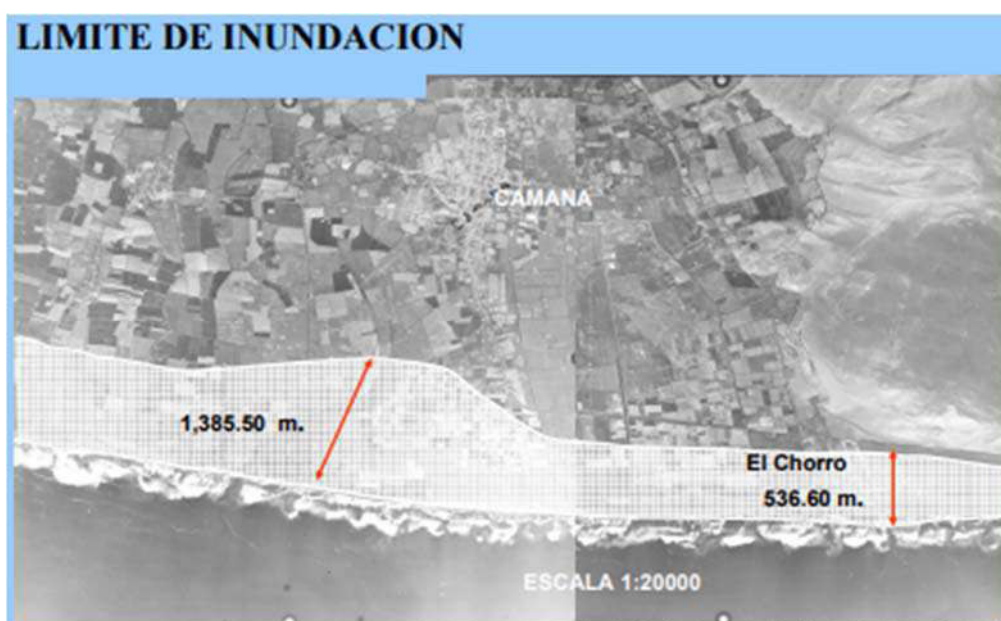


Figura 79. Imagen del área inundada por el tsunami, Camaná
Fuente. (Sistema Nacional de Alerta de Tsunamis - Departamento de Oceanografía - División de Geofísica, s.f.)
https://www.dhn.mil.pe/files/cnat/pdf/otros/Panel_tsunami_Camana_.pdf

Datos importantes sobre el tsunami local de Camaná son aportados por el Sistema Nacional de Alerta de Tsunamis, Departamento de Oceanografía de la Marina de Guerra, que indica que en el valle de Camaná el tsunami penetró más de un kilómetro (acercándose al borde más externo de la ciudad de

Camaná), como se ve en la Figura 79; indica también que el tsunami afectó ligeramente las localidades cercanas de Ocoña, Quilca y Matarani; que ocurrió en bajamar; y que al norte y sur de estas localidades costeras el tsunami no sobrepasó el nivel de pleamar. En el mareograma del Callao, el oleaje llegó 90 minutos después, alcanzando solo una altura de 40 cm.

Respecto a las mareas y su incidencia en el efecto de los tsunamis, hay que decir que, en gran parte de nuestra costa, la amplitud diaria entre bajamar y pleamar es bastante débil (se reconocen diariamente dos pleamares y dos bajamares). Los valores usuales de diferencia en toda la Costa central y sur, bordean como máximo 1 m, y en el norte pueden alcanzar hasta 2 m. De modo que, si bien no son despreciables, en su mayoría, los efectos de las diferencias de marea en los tsunamis del país son poco significativas.

Entre las consideraciones más importantes sobre el tsunami de Camaná, está la época del año en que sucedió. Fue en invierno, y mató a decenas de personas; pero si hubiera sido en verano, la tragedia habría sido mayor, porque normalmente a la hora en que ocurrió el sismo las playas están muy concurridas y, sobre todo en días no laborables, como fue el caso del año 2001 (aunque en invierno, con las playas deshabitadas).

De otro lado, la población flotante veraniega que había en el balneario la Punta no era tan alta como si lo es en los últimos años, en que el crecimiento del turismo nacional y receptivo ha sido casi explosivo (exceptuando los años de la pandemia). Como sucede normalmente en el país, el balneario La Punta fue destruido en gran parte por el tsunami del 2001; luego en los años siguientes, el recuerdo de la tragedia se fue borrando, y ahora el balneario rebosa de viviendas veraniegas y hospedajes; aún más densas que en el año del tsunami, y estas instalaciones han crecido ya varios km hacia el sur. Un nuevo tsunami local, similar al poco potente que hubo en 2001, ocasionaría esta vez un desastre de proporciones y, seguramente, con el paso del tiempo, la vulnerabilidad y consiguiente riesgo seguirían creciendo.

Aun considerando el inusual bajo número de víctimas mortales que dejó este sismo, los daños sociales y económicos si fueron muy grandes, no solo en el

patrimonio perdido de viviendas, sino en la ralentización de la vida económica, pérdida de calidad de vida y desarrollo de la población. Cabe recordar que muchas poblaciones urbanas, como la de Camaná y otras ciudades parecidas (por ejemplo, Cocachacra y otras del valle del río Tambo), pierden demasiado si sus tierras agrícolas (que están entre las más costosas y productivas del país), se salinizan o erosionan a consecuencia de un sismo y tsunami. Todos estos daños afectan mucho la calidad de vida de las poblaciones y regiones afectadas, pero al final redundan en todo el país, puesto que el gobierno central y gobiernos regionales y locales, deben dirigir recursos destinados a necesidades corrientes, para atender las urgencias debidas a los desastres.

En este sentido, es importante difundir los hechos y percepciones habidas a consecuencia del tsunami de Camaná, tanto por ser acontecimientos recientes que dejan vitales enseñanzas, pero sobre todo por ser hechos ocurridos en nuestro país. Entre las muchas noticias difundidas, se recuerda aquí la nota periodística del Diario El Correo de Arequipa.

“El 23 de junio del 2001, un sismo afectó a Camaná y ocasionó una ola gigante que se tragó a por lo menos 70 personas. Ese día, aunque no era verano, numerosas personas se habían reunido en un terreno del terminal terrestre de La Punta, porque organizaron una parrillada de confraternidad para ayudar a una familia en problemas. Solo niños y ancianos se quedaron en casa, especialmente en la zona de La Deheza. La tarde transcurrió sin novedad, hasta que se sintió el violento sismo. Minutos después, el mar se recogió y fue cuando los más longevos supieron que llegó el momento de correr hacia la carretera Panamericana, porque se venía el maremoto. Olas de siete metros de altura golpearon con violencia las precarias viviendas cercanas a las playas. Las lujosas casas y negocios por entonces cerrados, todos de material noble sucumbieron a la fuerza del mar. Cuando el agua recuperó su margen, arrastró no solo objetos, también se llevó a muchas personas. Los restos de construcciones, fueron tumba de 23 adultos y niños, cuerpos que fueron recuperados por quienes, para ese momento, regresaban de la parrillada y tuvieron que hacer de rescatistas de sus propios familiares.

Como periodista me tocó vivir en carne propia los momentos dramáticos, ver que la gente salía despavorida de la ciudad para ubicarse en las zonas más altas, la recuperación de los cuerpos de cuatro hermanitos que, al no poder salir, se abrazaron y así murieron bajo arena y maleza. Los sobrevivientes contaron que Víctor Fernández había conseguido ponerse a salvo junto a varios niños, pero regresó a su casa para rescatar a sus gallos y otros animales, fue cuando la ola lo cubrió y ya no pudo salir. Son también recordados los policías Miguel Alfaro y Luis Bustamante; ambos estaban de franco y participaban en la parrillada, no dudaron en acudir al rescate de los afectados por el tsunami, en esa labor estaban cuando el mar los envolvió para arrebatárles la vida. Que el empresario Aurelio Granda se subió con su hija menor al techo de la casa, pero una ola gigante se la arrebató de las manos, esa escena aterradora quedó grabada en la memoria de quienes vieron las consecuencias de este maremoto. Ocho integrantes de la familia Centeno, fueron salvados aquel día, gracias a que la ayuda llegó y las puertas de su vivienda, fueron utilizadas como balsas para trasladar a todos sobre el agua, hacia una zona segura. 23 víctimas quedaron debidamente identificadas al término de la búsqueda. 70 personas se “tragó” el mar, en las playas de La Punta de Camaná, aquel trágico día” (Hancoco, 2018).

Como es usual, los testimonios de sobrevivientes suelen ser dramáticos, pero son fuente de conocimiento y valiosas enseñanzas, necesarias para enfrentar próximos desastres. Se puede señalar las siguientes conclusiones:

- a. Los balnearios litorales de playa no deberían tener edificaciones de vivienda permanente y, permanecer en lo posible, como áreas recreacionales no habitables.
- b. El tsunami ocasionó víctimas mortales en el balneario La Punta, por causas un tanto fortuitas, puesto que los testimonios indican que hubo pobladores reunidos en las instalaciones de playa, en pleno invierno, solo porque se convocó a una actividad social para obtener fondos en apoyo económico a una familia. Si el sismo ocurría en día de semana, probablemente el tsunami no habría causado estas víctimas.

- c. Si bien se aprecia una actitud proactiva y valiosa de muchos pobladores, policías y autoridades locales durante el desastre, se evidencia una casi total falta de líneas de acción que orienten la conducta. Sorprende que se confirme que un poblador regresó a la playa a rescatar sus pocos animales, y morir por ello al ser arrastrado por el oleaje.
- d. Al inicio de su artículo, la periodista indica que antes del tsunami, el mar se recogió, es decir hubo el característico refluo del mar, que avisa de un inminente tsunami. Sobre este hecho, Kuroiwa (2005), indica que “las 16 víctimas cuyos cuerpos se recuperaron y otros más señalados como desaparecidos, perdieron la vida porque se internaron en el mar cuando la primera ola, que fue de retroceso, dejó a la vista el fondo marino y peces que ellos trataron de atrapar”. Esto refleja sin duda un desconocimiento inaceptable por parte de la población litoral acerca de los tsunamis, y una falla total de los sistemas de alerta.
- e. El artículo periodístico indica la actitud de la población afectada en Camaná, respecto de su desesperada huida hacia los cerros en busca de refugio. Es decir, se refleja una total desorganización, que pudo ser una tragedia mucho mayor, si por ejemplo, el sismo y tsunami hubieran ocurrido de noche o en temporada de mayor ocupación poblacional (verano).
- f. El hecho de que la población de Camaná intentara de forma totalmente desorganizada huir esa tarde hacia los cerros laterales, demuestra que sí eran conscientes de la baja altitud del poblado, percibiéndolo como posible sujeto de tsunamis. En tal sentido, solo cabe preparar, adecuar y mantener operables la mayor cantidad posible de rutas de escape.

Estas enseñanzas y/o conclusiones son aplicables a toda población litoral, aunque con las consideraciones propias de las características locales. El riesgo de tsunamis va creciendo a medida que los balnearios litorales van consolidando la creciente densificación poblacional de las últimas décadas. El caso de Lima metropolitana, con millones de veraneantes es un caso de riesgo mayúsculo, pero las ciudades y balnearios costeros de provincias (Máncora, Paita, Trujillo, Huanchaco, Chimbote, Paracas, y muchas otras) tienen este problema en ciernes y, parece poco lo que se hace al respecto.

Además de que ya el balneario La Punta ha sido nuevamente copado de edificaciones, nuevas ocupaciones de terrenos de playa, como Cerillos, que queda colindante, al sur de la Punta, que ya tiene edificaciones de material noble a pesar de ser considerado delito grave. Debiera por lo menos causar sorpresa ya que no son terrenos aislados y poco visibles, sino al lado de la carretera panamericana y a minutos de la capital provincial. El artículo escrito por Nelly Hanco indica que uno de los consejeros del gobierno regional, pedía la intervención de la Fiscalía, porque se trata de aproximadamente 10 kilómetros de ocupación²⁷

Si la Ley, fue promulgada en 1997, cabe preguntarse entonces, ¿qué hacían allí las viviendas de La Punta (salvo las construidas antes de su promulgación) y, peor aún, ¿qué hacen allí las nuevas viviendas y edificaciones construidas en el mismo lugar arrasado por el mediano tsunami de 2001; más todavía, las nuevas invasiones que siguen “ganando” terrenos en el balneario colindante a La Punta (playa Los Cerrillos) Cualquier respuesta solo puede señalar la grave responsabilidad de los sucesivos gobiernos, autoridades locales y pobladores de toda condición. Claro, no son hechos aislados, sino que en el subdesarrollo nacional son la norma, y muchas veces ya ni siquiera son noticias que merezcan ser publicadas, y menos atendidas por las autoridades y sociedad en general.

²⁷ La Ley 26856, del 5 de setiembre de 1997, a la letra dice:

Artículo 1°: Las playas del litoral de la República son bienes de uso público, inalienables e imprescriptibles. Se entiende como playa el área donde la costa se presenta como plana descubierta con declive suave hacia el mar y formada de arena o piedra, canto rodado o arena entremezclada con fango más una franja no menor de 50 metros de ancho paralela a la línea de alta marea.

Artículo 2°: Se considera zona de dominio restringido la franja de 200 metros ubicada a continuación de la franja de 50 metros descrita en el Artículo anterior, siempre que exista continuidad geográfica en toda esa área.

Artículo 3°: Las zonas de dominio restringido serán dedicadas a playas públicas para el uso de la población. La adjudicación y/o construcción de inmuebles dentro de la zona de dominio restringido queda prohibida a partir de la entrada en vigencia de la presente Ley.

viviendas que no sufrieron daños. Sobre daños materiales en toda el área afectada, el INDECI (2016) indica que en el departamento de Ica hubo un total de 363,841 damnificados; en Lima, el número fue 59,483; en Huancavelica, 10,810; en Ayacucho, 460, y en Junín, solo 20 damnificados.

En el mapa de la Figura 80, se aprecia que la isosista de VIII a más se concentró en el borde litoral de Chíncha - Pisco – Paracas (que incluye a Tambo de Mora). La intensidad entre VIII y VII abarcó una amplia extensión que incluye muchos pueblos y a la ciudad de Ica, llegando hasta Cañete por el norte. Entre VII y VI, el nivel de afectación llegó a la Sierra, al oeste de la provincia huancavelicana de Huaytará. Entre los parámetros propiamente sísmicos, Bernal y Tavera (2008, pág. 5) resaltan la muy larga duración del sismo, indicando que se percibió durante 3 y 1/2 minutos. Señalan también que el sismo tuvo una directividad orientada hacia el sureste (es decir, similar al del sismo de Arequipa de 2001), Algunos registros de aceleraciones se presentan en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Registros de aceleración del sismo de 2007 en Ica

Organization (a)	Code	Location	City	PGA UD (cm/s ²)	PGA NS (cm/s ²)	PGA EW (cm/s ²)	PGA (g)	Closest Distance (km) (b)	Site Type (c)
IGP	PCN	Parcona	Ica	301.0	455.0	488.0	0.498	39.4	Soil
IGP	MAY	Mayorazgo	Lima	31.2	59.7	55.0	0.061	103.0	Soil
IGP	ANC	Ancón	Ancón	27.8	54.7	58.4	0.060	137.5	Soil
IGP	LMO	La Molina	Lima	14.2	21.2	25.3	0.026	100.3	Rock
IGP	NNA	Ñaña	Lima	21.6	18.7	22.1	0.023	105.4	Rock
CISMID	ICA2	Universidad	Ica	192.2	334.1	272.3	0.341	36.7	Soil
CISMID	CISMID	Rmac	Lima	32.9	45.1	73.9	0.075	111.1	Firm Ground
CISMID	CDL-CIP	San Isidro	Lima	33.1	58.8	54.1	0.060	103.7	Firm Ground
CISMID	La Molina	La Molina	Lima	56.8	69.1	78.7	0.080	96.8	Soil
CISMID	DHN	Callao	Callao	31.6	101.0	95.8	0.103	111.1	Soil
PUCP	PUCP	U. Católica	Lima	39.7	59.6	67.0	0.068	106.7	Firm Ground
CERESIS	RIN	Rinconada	Lima	57.7	115.0	111.0	0.117	99.3	Soil
CERESIS	ANR	A. Nac. Rectores	Lima	73.5	65.2	85.3	0.087	100.1	Firm Ground
CERESIS	CER	Ceresis	Lima	37.3	58.0	58.7	0.060	102.4	Firm Ground
Sedapal	E1 ^(d)	Atarjea	Lima	30.4 ^(d)	50.0 ^(d)	54.9 ^(d)	0.056	106.2	Soil
Sedapal	E2	Atarjea	Lima	11.8	12.7	20.6	0.021	105.9	Rock

En el Cuadro están resaltados los registros de dos estaciones acelerográficas situadas en la ciudad de Ica, a ~ 100 km del epicentro; las demás son estaciones situadas en la metrópoli limeña. *Fuente.* (Alva J. , s.f., pág. 44) <https://www.jorgealvahurtado.com/files/AspectosSismologicosyGeotecnicosterramotoPisco-Ica.pdf>

Los máximos valores de aceleración se dieron en la estación Parcona (Ica), donde la vertical alcanzó 301.0 gals, y las horizontales fueron de 455.0 gals en dirección Norte – Sur, y de 488 gals en la dirección Este – Oeste. Esto equivale a casi 0.5 g. En la estación Universidad de Ica, se llegó a valores de 0.34 g. En Lima, (a 200 – 250 km del epicentro), la aceleración máxima alcanzó valores de 0.1 a 0.12 g. en las estaciones Callao y Rinconada, respectivamente. La aceleración fue bastante alta en Parcona, pero es muy posible que haya sido mayor cerca del epicentro (Pisco, Tambo de Mora, Chinchipe Baja), sobre todo en los suelos blandos y saturados en aguas freáticas superficiales que hay en esa zona. Los valores en Lima también reflejan el efecto suelo y caracteres locales, siendo conocidas las limitaciones geotécnicas de los suelos de La Molina y Callao, notándose en el Cuadro que las aceleraciones en diversos distritos fueron mucho menores, especialmente en suelos duros y superficies rocosas (columna de la derecha).

El número de víctimas fallecidas, desaparecidas y heridas puede parecer un tanto elevado, pero en realidad pudo ser mucho mayor para un sismo de esta magnitud, teniendo en cuenta que afectó a numerosos pueblos situados en suelos de importantes limitaciones geotécnicas, y donde, las viviendas tenían (y aún tienen) un porcentaje alto de construcción en adobe y otros materiales precarios, aparte de la antigüedad de las mismas. También en este caso, el hecho de que el sismo no haya sido nocturno con la población descansando, fue un elemento determinante a favor, al igual que muchos sismos anteriores. El patrón urbano de las ciudades del área, de viviendas bajas en calles ligeramente amplias es otro elemento a favor, porque las personas al salir rápidamente de sus viviendas, oficinas o negocios, pudo alcanzar calles en donde la caída de escombros, paredes etc., no necesariamente las podría cubrir totalmente.

Este patrón urbano todavía sigue siendo dominante en la mayoría de ciudades pequeñas de toda la Costa, excepto en sus ciudades más grandes y pobladas, (como Ica y otras capitales de departamento y algunas provinciales, como Chimbote), ciudades donde el crecimiento poblacional y económico ha dado a las mismas calles pero ahora con viviendas en edificios multifamiliares,

oficinas, hoteles un tanto densos. Lima - Callao, ya escapan casi totalmente a este patrón, donde algunos distritos modernos tienen avenidas llenas de edificios de más de 20 pisos, y muchos distritos populosos con calles poco amplias pero dominadas por edificios de 4 a 8 pisos. La Figura 81, muestra la severidad con que este sismo afectó las ciudades del área, mostrando una serie de movimientos del suelo relacionados con licuación.



F-4.13.1 En Tambo de Mora hubo licuación generalizada de suelos. Numerosas casas se hundieron unos 80 cm. En Calle Nueva se hundió una fila de viviendas.



F-4.13.3 Desplazamiento horizontal del suelo (*lateral spread*). Los muros estaban unidos y se abrió una "puerta".



F-4.13.5 Los muros, por su propio peso y el de los techos, se hundieron más que los pisos que se "levantaron", quedando las viviendas totalmente inhabitables.



F-4.13.6 "Volcán de arena" producto de licuación masiva de la arena saturada de agua.

Figura 81. Efectos del sismo en edificaciones de Tambo de Mora

Hundimientos y levantamientos generalizados del suelo, así como corrimientos y desplazamientos laterales que provocaron daños estructurales severos y hasta colapsos totales al 70% de edificaciones en este distrito, que tiene una marcada predominancia de suelos granulares mal graduados y, sobre todo, saturados o de napas freáticas superficiales que favorecen la licuación y todos sus procesos colaterales. Los textos inferiores en las fotos son originales del autor. *Fuente.* (Kuroiwa J. , 2010, pág. 12)

En 2007, Tambo de Mora era una pequeña urbe, casi rural, de viviendas bajas, muchas de adobe en calles bien amplias (y aún sigue siéndolo). En cambio, Pisco, capital de la provincia, ya tenía edificaciones mayores de material noble. Esta ciudad tiene también amplias áreas de suelo licuable, y los daños también fueron severos, como se ve en la Figura 82.



Figura 82. Efectos del sismo en edificaciones de Pisco e Ica

La primera fila muestra daños severos en la ciudad de Pisco, en edificaciones de material noble. El hotel Embassy era un edificio de cinco pisos, donde, a decir de Kuroiwa (2010, pág. 10), “las columnas de los primeros pisos fallaron completamente”. Es así que un número indeterminado de personas quedaron sepultadas bajo los pisos superiores que, felizmente no colapsaron del todo. La segunda fila muestra daños severos en edificaciones de material noble en plena Plaza Mayor y colapsos torales en viviendas de adobe, lo cual fue el caso frecuente en las ciudades y pequeños pueblos de las provincias del norte y centro de Ica. *Fuente.* (Giuliani, 2008, págs. 6-8).

La Figura 83 muestra la ciudad de Pisco para el año 2010, y la imagen subsiguiente, la ciudad para el año 2023.

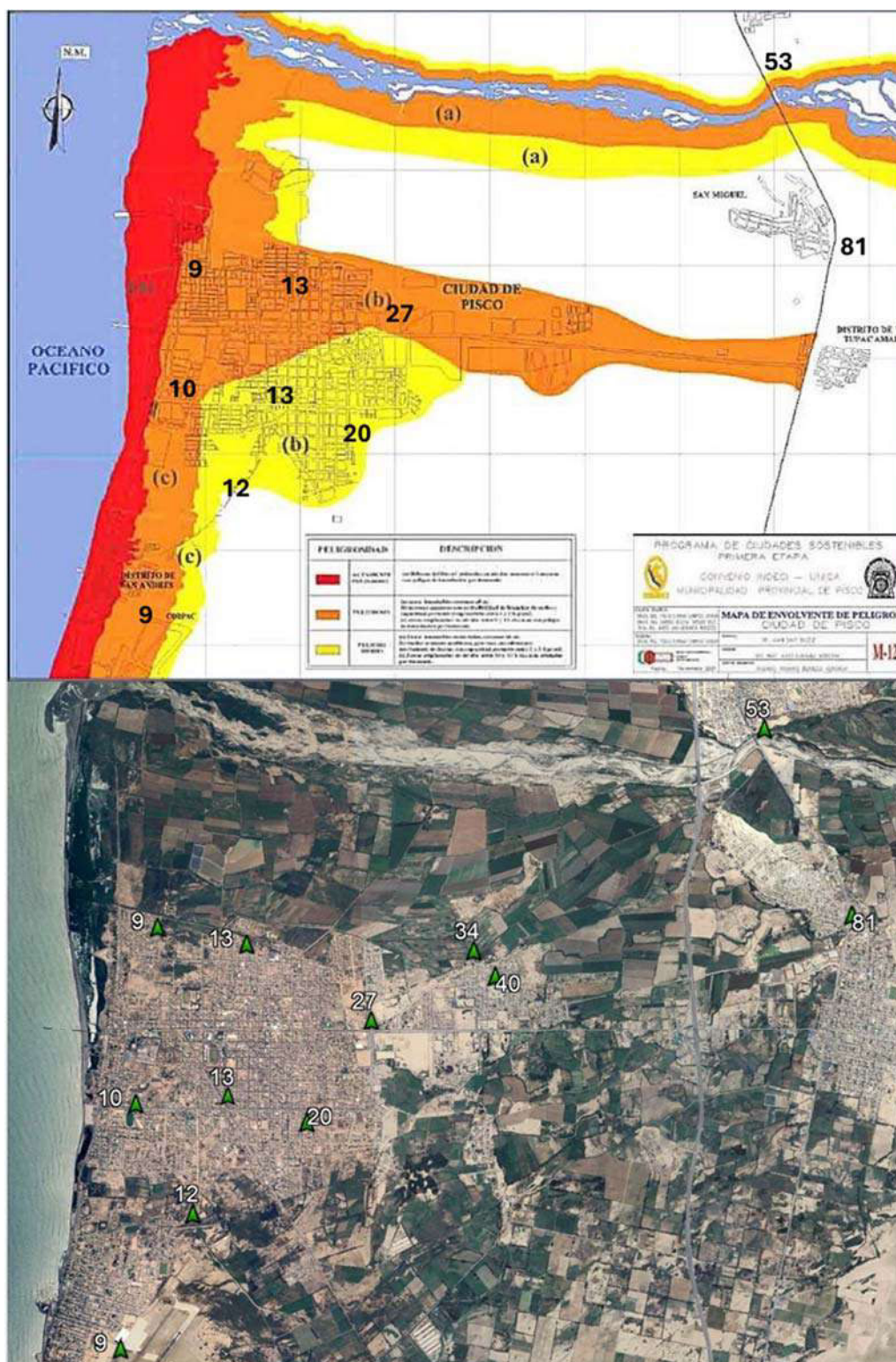


Figura 83. Mapa de Peligros de Pisco.

Fuente. El mapa está tomado de (Kuroiwa, 2010, pág. 9). La imagen satelital es Google Earth. Tanto en el mapa como en la imagen se han añadido valores de altitudes tomados de la propia información del sistema satelital Google.

En el mapa, los suelos del área son granulares, y corresponden a depósitos aluviales dejados por el río Pisco; masas de arena eólica provenientes de la playa y rompientes de los oleajes y, depósitos propiamente marinos, de plataformas arenosas que eran fondos marinos de poca profundidad y que ascendieron sea tectónicamente o por regresiones marinas recientes. De todos estos, el mapa muestra que los suelos de mayor peligro geotécnico son los que aparecen en color rojo, situados en el borde litoral, bajo 8 – 9 msnm, que presentan una alta saturación de agua freática superficial, que los hace muy proclives a la licuación y sus procesos asociados. En naranja, se tiene suelos con limitantes del mismo tipo (licuación y otros), pero en menor nivel de recurrencia; en amarillo, los suelos más estables, que no tienen napas freáticas superficiales. En blanco, las zonas no pobladas y no evaluadas que, sin embargo, el año 2023, ya están ocupadas en parte por asentamientos que están generando un marcado proceso de conurbación urbana (Por ello, los mapas deben ser actualizados o realizados previendo zonas de expansión).

El crecimiento de la ciudad es intenso, impulsado por varias condiciones, como el inédito crecimiento agroexportador de las provincias de Ica, Pisco y Chincha, el puerto San Martín y nuevo aeropuerto de Pisco, que se considera alternativo al aeropuerto de Lima, la autopista a Lima; la planta de líquidos de gas, la fábrica de aceros Arequipa, el turismo en Paracas, el proyecto de tren de alta velocidad. etc, que se constituyen en centros de atracción y empleo. Pero, el crecimiento urbano no toma en su debida consideración la sismicidad de los suelos del área, que es elevada; incluso el mal riego de áreas agrícolas aumenta la saturación superficial del suelo y la salinidad del mismo (que afecta las cimentaciones por corrosión) pero, más aún, cabe notar la alta peligrosidad por la exposición a tsunamis de buena parte del área (véase las cotas de 9, 10, 12 y 13 m) cada vez más densamente pobladas; incluso barrios como el de San Andrés, están a cotas del orden de 5 m. Muchas ciudades de la Costa, experimentan similar crecimiento poblacional, y tienen también similares problemas sísmicos, como la licuación, desplazamientos laterales, inundación hundimientos, volcanes de arena, etc., como se ha visto en los sismos de Camaná (2001), Chimbote (1970), Arica (1868), Callao (1746). La geografía costera, cercana a la subducción le plantea al país, estos desafíos.

4.2. Riesgo Sísmico en las Ciudades más pobladas del País

Como una síntesis del riesgo sísmico urbano del país, el Cuadro 11 (elaborado por el autor de la tesis), califica en cinco rangos cualitativos el riesgo sísmico de las 55 ciudades más pobladas del país, desde la condición menor al más riesgoso: *Bajo*, *Bajo a Medio*, *Medio*, *Medio a Alto*, *Alto* y *Muy Alto*. La clasificación considera los parámetros físico geográficos y geológicos de cada ciudad, su número de habitantes, y una caracterización implícita de su condición socioeconómica y ubicación en las regiones naturales del país: Costa, Sierra, Selva Alta y Selva Baja. Los parámetros planteados son: altitud (msnm en que se halla la ciudad), fisiografía (en porcentajes aproximados), geoestructuras mayores y clima de cada ciudad (principalmente, lluvias).

Las 55 ciudades comprenden el 76% de la población urbana del país (81.2% de la población urbana total del Perú según el estudio de CPI (2025), por lo que la data es actual. Se indica la condición política de cada ciudad (capital distrital, provincial o departamental). Cabe señalar que CPI (2025), presenta 60 ciudades como las más pobladas, pero en este trabajo se optó por aglutinar algunas de ellas: Huanchaco, que se suma a la ciudad de Trujillo por el estado de conurbación ya definido entre ambas ciudades. Lo mismo para el caso de Catacaos, que se suma al de la ciudad de Piura, y las ciudades de Lambayeque y Pimentel, conurbadas ya en la ciudad de Chiclayo.

De las 55 ciudades del Cuadro 11, 30 están en la Costa, y 18 en la Sierra; en la Selva hay 7 ciudades, 3 de ellas en la Selva Alta y 4 en la Selva Baja. Según CPI (2025), Lima – Callao Metropolitana, tiene el 50.8% del total de la población de las 55 ciudades más pobladas, y el 41.3% de la población urbana nacional, lo que expresa no solo el exacerbado centralismo peruano, sino también el excesivo peso que tiene esta megalópolis en el país en todos los aspectos de la vida nacional, incluyendo el del riesgo sísmico y de desastres en general. Solo hay dos ciudades grandes de provincias con más de un millón de habitantes, Arequipa y Trujillo (con apenas poco más del 10% de la que tiene Lima Metropolitana). Además, el país tiene 15 ciudades medianas (de 200,000 a 750,000 habitantes), de las cuales, 7 están en la Costa, 6 en la

Sierra y solo 2 en la extensa Selva. A continuación, se indican los criterios generales tomados en cuenta para calificar el nivel de riesgo sísmico global de las 55 ciudades más pobladas del país, haciendo la salvedad que estas incluyen siempre, sectores localizados diversos de distinto nivel de riesgo al asignado.

1. **RIESGO BAJO:** Zonas alejadas del frente de convergencia y de la subducción; sismicidad escasa y mayormente profunda. Relieves llanos y ausencia de montañas; ciudades no densamente pobladas.
2. **RIESGO BAJO A MEDIO:** Zonas alejadas del frente de convergencia y de la subducción; sismicidad escasa, relacionada a sistemas de fallas y tectónica local. Relieves con alguna presencia de montañas. Ciudades no densamente pobladas.
3. **RIESGO MEDIO:** Zonas alejadas del frente de convergencia y de la subducción; sismicidad escasa, relacionada a sistemas de fallas y tectónica local. Relieves montañosos. Ciudades un tanto densas en población, de importante proporción de edificaciones precarias.
4. **RIESGO MEDIO A ALTO:** Zonas algo cercanas al frente de convergencia y subducción; sismicidad un tanto frecuente, relacionada tanto a sistemas de fallas y tectónica local como a la subducción. Relieves montañosos. Ciudades pequeñas y medianas un tanto densas en población, de importante proporción de edificaciones precarias.
5. **RIESGO ALTO:** Zonas costeras cercanas al frente de convergencia y subducción en la zona norte del país (de menor sismicidad). Relieves llanos a ligeramente colinosos y montañosos. Ciudades pequeñas y medianas un tanto densas en población, con importante proporción de edificaciones precarias. Zonas de cordillera un tanto alejadas del frente de convergencia, con riesgo importante de fuertes movimientos de masa.
6. **RIESGO MUY ALTO:** Zonas costeras y andinas cercanas al frente de convergencia en la zona central y sur del país. Relieves llanos en la Costa con importante proporción de edificaciones en suelos de baja calidad y edificaciones precarias. Riesgo severo de tsunamis en ciudades costeras y grandes movimientos de masa en ciudades de la Sierra. Ciudades medianas y grandes, densas de fuerte crecimiento poblacional.

Cuadro 11. Ciudades más pobladas, Caracteres y Riesgo Sísmico

N	CIUDAD	Departamento y condición capital	Región Natural	Altitud msnm	Fisiografía y Geoestructuras	Clima	POBLACIÓN (N° Habs.)	RIESGO SÍSMICO
1	Lima Metropol.	Lima y Callao Nacional	Costa	<5 a 1050	Valles fluviales y llanura costera (90%), Cordillera Occidental (5%) y valles aluviales interandinos (5%)	Desierto cálido a templado y frío en la llanura costera y subdesierto, y desierto cálido a templado en los valles y cordillera. Lluvia anual 5 a 50 mm	11'335,100	MUY ALTO
2	Arequipa	Arequipa Departamental	Sierra	2200 a 3100	Llanura de piedemonte volcánico (85%), Cordillera volcánica (10%) y valle fluvial interandino (5%)	Semiárido templado en la llanura y valle, y subhúmedo templado en la cordillera (lluvia anual 100 a 300 mm)	1'033,800	MUY ALTO
3	Trujillo	La Libertad Departamental	Costa	<5 a 310	Valle fluvial y llanura costera (95%) y Cordillera Occidental (5%)	Desierto cálido a templado (lluvia anual < 15 mm)	1'022,200	MUY ALTO
4	Chiclayo	Lambayeque Departamental	Costa	<5 a 50	Valle fluvial y llanura costera	Desierto cálido (lluvia anual 20 a 50 mm)	724,100	ALTO
5	Piura	Piura Departamental	Costa	40 a 100	Valle fluvial y llanura costera	Sub desierto cálido a muy cálido (lluvia anual 30 a 100 mm)	647,000	ALTO

N	CIUDAD	Departamento y condición capital	Región Natural	Altitud msnm	Fisiografía y Geoestructuras	Clima	POBLACIÓN (N° Habs.)	RIESGO SÍSMICO
6	Cusco	Cusco Departamental	Sierra	3200 a 3780	Valle fluvial interandino (85%) y Cordilleras Oriental (10%) y Occidental (5%)	Lluvioso en verano y seco a muy seco el resto de año; templado a frío todo el año (lluvia anual 600 a 750 mm)	503,000	MEDIO A ALTO
7	Iquitos	Loreto Departamental	Selva Baja	110 a 125	Llanura aluvial de la Depresión Amazónica	Muy lluvioso y muy cálido todo el año. No hay estación seca (lluvia anual 2500 a 3500 mm)	449,700	BAJO
8	Chimbote	Ancash Provincial	Costa	<5 a 250	Valle fluvial y llanura costera	Desierto cálido a templado y frío (lluvia anual < 15 mm)	441,500	MUY ALTO
9	Huancayo	Junín Departamental	Sierra	3170 a 3430	Valle fluvial y llanura de depresión Interandina (95%) y Cordillera Oriental (5%)	Lluvioso en verano y seco a muy seco el resto de año; templado a frío todo el año (lluvia anual 600 a 750 mm)	434,500	MEDIO A ALTO
10	Pucallpa	Ucayali Departamental	Selva Baja	145 a 160	Llanura aluvial de la Depresión Amazónica	Muy lluvioso y muy cálido en verano y muy cálido y poco lluvioso el resto del año (lluvia anual 2500 a 3500 mm)	382,200	BAJO A MEDIO
11	Ica	Ica Departamental	Costa	390 a 540	Valle fluvial y llanura costera (95%) y Cordillera Occidental (5%)	Desierto cálido a templado y ocasionalmente frío (lluvia anual <10 mm)	358,400	MUY ALTO

N	CIUDAD	Departamento y condición capital	Región Natural	Altitud msnm	Fisiografía y Geoestructuras	Clima	POBLACIÓN (N° Habs.)	RIESGO SÍSMICO
12	Tacna	Tacna Departamental	Costa	350 a 800	Valle fluvial y llanura costera	Desierto cálido a templado y frío; muy seco (lluvia anual < 10 mm)	336,800	MUY ALTO
13	Juliaca	Puno Provincial	Sierra	3830 a 3880	Valle fluvial y llanura de depresión interandina	Lluvioso en verano y seco a muy seco el resto de año; frío a muy frío todo el año (lluvia anual 600 a 750 mm)	252,900	BAJO A MEDIO
14	Cajamarca	Cajamarca Departamental	Sierra	2660 a 3000	Valle fluvial interandino (90%) y Cordillera Occidental (10%)	Lluvioso en verano y seco a muy seco el resto de año; templado a frío todo el año (lluvia anual 600 a 750 mm)	237,100	BAJO A MEDIO
15	Huánuco	Huánuco Departamental	Sierra	1870 a 2250	Valle fluvial interandino (90%) y Cordillera Oriental (10%)	Semiárido templado a cálido. Lluvioso en verano y seco a muy seco el resto de año (lluvia anual 350 a 450 mm)	235,800	MEDIO
16	Sullana	Piura Provincial	Costa	50 a 100	Valle fluvial y llanura costera	Sub desierto cálido a muy cálido (lluvia anual 50 a 150 mm)	234,400	ALTO
17	Chincha	Ica Provincial	Costa	50 a 190	Valle fluvial y llanura costera	Desierto cálido a templado y frío (lluvia anual < 20 mm)	223,500	MUY ALTO

N	CIUDAD	Departamento y condición capital	Región Natural	Altitud msnm	Fisiografía y Geoestructuras	Clima	POBLACIÓN (N° Habs.)	RIESGO SÍSMICO
18	Ayacucho	Ayacucho Departamental	Sierra	2610 a 3080	Llanura de depresión Interandina (90%) y Cordillera Occidental (10%)	Lluvioso en verano y muy seco el resto de año; templado y ocasionalmente frío todo el año (lluvia anual 400 a 500 mm)	221,700	MEDIO A ALTO
19	Tarapoto	San Martín Provincial	Selva Alta	240 a 510	Llanura de depresión interandina (90%) y Cordillera Subandina (10%)	Muy lluvioso y muy cálido en verano y muy cálido y poco lluvioso el resto del año (lluvia anual 2500 a 3500 mm)	171,000	MEDIO
20	Puno	Puno Departamental	Sierra	3815 a 4050	Llanura de depresión interandina (50% y Cordillera Occidental (50%)	Lluvioso en verano y muy seco el resto del año; frío y ocasionalmente muy frío todo el año (lluvia anual 600 a 750 mm)	152,600	BAJO A MEDIO
21	Pisco	Ica Provincial	Costa	<5 a 45	Valle fluvial y llanura costera	Desierto cálido a templado y frío (lluvia anual < 20 mm)	142,200	MUY ALTO
22	Huaraz	Ancash Departamental	Sierra	2950 a 3280	Valle fluvial interandino (85%) y Cordillera Occidental (15%)	Lluvioso en verano y seco el resto de año; templado a frío todo el año (lluvia anual 700 a 800 mm)	141,500	MUY ALTO
23	Cañete	Lima Provincial	Costa	15 a 320	Valle fluvial y llanura costera	Desierto cálido a templado y frío (lluvia anual < 20 mm)	130,000	MUY ALTO

N	CIUDAD	Departamento y condición capital	Región Natural	Altitud msnm	Fisiografía y Geoestructuras	Clima	POBLACIÓN (N° Habs.)	RIESGO SÍSMICO
24	Talara	Piura Provincial	Costa	<5 a 90	Llanura costera (90%) y colinas de la Cordillera de la Costa (10%)	Sub desierto cálido a muy cálido (lluvia anual 50 a 100 mm)	129,900	ALTO
25	Tumbes	Tumbes Departamental	Costa	<5 a 60	Valle fluvial y llanura costera	Semiárido y cálido a muy cálido (lluvia anual 200 a 300 mm)	118,400	ALTO
26	Huacho	Lima Provincial	Costa	20 a 80	Valle fluvial y llanura costera	Desierto cálido a templado y frío (lluvia anual < 20 mm)	118,300	MUY ALTO
27	Huaral	Lima Provincial	Costa	130 a 230	Valle fluvial y llanura costera	Desierto cálido a templado y frío (lluvia anual z a 20 mm)	109,800	MUY ALTO
28	Paita	Piura Provincial	Costa	<5 a 80	Llanura costera	Desierto cálido a muy cálido (lluvia anual 30 a 60 mm)	101,900	ALTO
29	Jaén	Cajamarca Provincial	Selva Alta	650 a 950	Depresión interandina (95%) y Cordillera Oriental (5%).	Sub húmedo y muy cálido todo el año. Lluvioso en verano y seco el resto del año, lluvia anual 700 a 800 mm	95,200	BAJO A MEDIO
30	Puerto Maldonado	Madre de Dios Departamental	Selva Baja	185 a 220	Llanura de la Depresión Amazónica	Muy lluvioso y muy cálido en verano y muy cálido y poco lluvioso el resto del año (lluvia anual 2000 a 2500 mm)	91,600	BAJO

N	CIUDAD	Departamento y condición capital	Región Natural	Altitud msnm	Fisiografía y Geoestructuras	Clima	POBLACIÓN (N° Habs.)	RIESGO SÍSMICO
31	Moquegua	Moquegua Departamental	Sierra	1270 a 1730	Llanura costera (90%) y Cordillera Occidental (10%)	Desierto templado a cálido y frío, lluvias esporádicas en verano y muy seco el resto del año. Lluvia anual < 40 mm	84,800	MUY ALTO
32	Abancay	Apurímac Departamental	Sierra	2180 a 2770	Valle interandino (80%) y Cordillera Occidental (20%)	Lluvioso en verano y seco el resto del año; templado a frío todo el año (lluvia anual 700 a 800 mm)	83,700	MEDIO
33	Yurimaguas	Loreto Provincial	Selva Baja	130 a 160	Llanura de la Depresión Amazónica	Muy lluvioso y muy cálido todo el año. Leve estación seca (lluvia anual 2500 a 3500 mm)	81,000	BAJO
34	Ilo	Moquegua Provincial	Costa	10 a 270	Llanura costera (90%) y colinas de la Cordillera de la Costa (10%)	Desierto cálido, templado y frío (lluvia anual < 20 mm)	78,400	MUY ALTO
35	Huaura	Lima Provincial	Costa	50 a 80	Valle y llanura costera	Desierto cálido a templado y frío (lluvia anual < 20 mm)	77,600	MUY ALTO
36	Cerro de Pasco	Pasco Departamental	Sierra	4220 a 4450	Colinas de la Cordillera Occidental	Muy lluvioso en verano y ligeramente lluvioso el resto de año; muy frío todo el año (lluvia anual 1000 a 1200 mm)	75,300	BAJO A MEDIO

N	CIUDAD	Departamento y condición capital	Región Natural	Altitud msnm	Fisiografía y Geoestructuras	Clima	POBLACIÓN (N° Habs.)	RIESGO SÍSMICO
37	Barranca	Lima Provincial	Costa	5 a 150	Llanura costera	Desierto cálido a templado y frío (lluvia anual < 20 mm)	75,100	MUY ALTO
38	Chulucanas	Piura Provincial	Costa	85 a 120	Llanura costera	Sub desierto cálido a muy cálido (lluvia anual 50 a 150 mm)	75,000	ALTO
39	Andahuaylas	Apurímac Provincial	Sierra	2810 a 3110	Valle interandino (90%) y Cordillera Occidental (10%)	Lluvioso en verano y seco a muy seco el resto de año; templado a frío todo el año (lluvia anual 700 a 800 mm)	68,400	BAJO A MEDIO
40	Moyobamba	San Martín Departamental	Selva Alta	860 a 950	Llanura de Depresión Interandina (85%) y colinas de la Cordillera Subandina 15%)	Muy lluvioso en verano y cálido a templado y poco lluvioso el resto del año (lluvia anual 1500 a 2000 mm)	67,500	MEDIO
41	Chancay	Lima Provincial	Costa	<5 a 70	Llanura costera	Desierto cálido a templado y frío (lluvia anual 5 a 20 mm)	62,600	MUY ALTO
42	Tingo María	Huánuco Provincial	Selva Alta	630 a 720	Valle interandino (90%) y Cordillera Oriental (10%)	Muy lluvioso en verano y medianamente el resto del año. Cálido a muy cálido todo el año (lluvia anual 3,500 a 4500 mm)	59,700	BAJO A MEDIO

N	CIUDAD	Departamento y condición capital	Región Natural	Altitud msnm	Fisiografía y Geoestructuras	Clima	POBLACIÓN (N° Habs.)	RIESGO SÍSMICO
43	Huancavelica	Huancavelica Departamental	Sierra	3680 a 3820	Valle interandino (80%) y Cordillera Occidental (20%)	Lluvioso en verano y seco a muy seco el resto de año; frío a muy frío todo el año (lluvia anual 700 a 800 mm)	59,500	BAJO A MEDIO
44	Majes	Arequipa Provincial	Costa	1280 a 1630	Llanura costera	Desierto cálido a templado y frío (lluvia anual <10 mm)	58,400	MUY ALTO
45	Ferreñafe	Lambayeque Provincial	Costa	30 a 45	Llanura costera	Desierto cálido (lluvia anual 20 a 50 mm)	55,800	ALTO
46	Sicuani	Cusco Provincial	Sierra	3530 a 3630	Valle interandino (95%) y Cordillera Oriental (5%)	Lluvioso en verano y seco a muy seco el resto de año; templado a frío todo el año (lluvia anual 700 a 800 mm)	55,100	MEDIO
47	Nazca	Ica Provincial	Costa	540 a 720	Llanura costera	Desierto cálido a templado y frío (lluvia anual <10 mm)	52,300	MUY ALTO
48	Tambo Grande	Piura Distrital	Costa	60 a 75	Llanura costera	Semiárido cálido a muy cálido (lluvia anual 150 a 250 mm)	51,200	MEDIO
49	Tarma	Junín Provincial	Sierra	3000 a 3190	Valle interandino (90%) y Cordillera Occidental (10%)	Lluvioso en verano y seco a muy seco el resto de año; templado todo el año (lluvia anual 550 a 700 mm)	50,900	MEDIO

N	CIUDAD	Departamento y condición capital	Región Natural	Altitud msnm	Fisiografía y Geoestructuras	Clima	POBLACIÓN (N° Habs.)	RIESGO SÍSMICO
50	Huamachuco	La Libertad Provincial	Sierra	3140 a 3300	Llanura de depresión Interandina (90%) y Cordillera Occidental (10%)	Muy lluvioso en verano y ligeramente el resto de año; templado a frío todo el año (lluvia anual 1000 a 1200 mm)	50,700	MEDIO
51	Sechura	Piura Provincial	Costa	<5 a 20	Llanura costera	Desierto cálido a muy cálido (lluvia anual 30 a 60 mm)	49,900	ALTO
52	Chepén	La Libertad Provincial	Costa	110 a 215	Llanura costera (90%) y montañas de la Cordillera Occidental (10%)	Desierto cálido a templado (lluvia anual < 20 mm)	50,900	ALTO
53	Virú	La Libertad Provincial	Costa	50 a 70	Llanura costera	Desierto cálido a templado (lluvia anual 5 a 10 mm)	48,000	ALTO
54	La Unión	Piura Distrital	Costa	15 a 30	Llanura costera	Desierto cálido a muy cálido (lluvia anual 30 a 60 mm)	47,600	ALTO
55	Camaná	Arequipa Provincial	Costa	<5 a 150	Llanura costera	Desierto cálido a templado y frío (lluvia anual 5 a 20 mm)	46,700	MUY ALTO

Fuente. Osejo, J. 2025

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES

A. Sobre el peligro sísmico de las ciudades de Costa y Sierra

1. Las ciudades de Costa tienen cuatro causales propias de alto peligro sísmico: La primera es su cercanía geográfica al frente de subducción de la placa Nazca, donde se generan los sismos más frecuentes, violentos, superficiales, de más duración y aceleración en el país. La segunda, que parte de sus ciudades tienen suelos de arena eólica y depósitos marinos mal graduados con agua freática superficial, que causan licuación y fenómenos conexos graves. La tercera, que parte de sus distritos y barrios recientes, se emplazan cada vez más en cubiertas coluviales y eólicas de fuerte pendiente, sensibles a movimientos de masa. La cuarta, es la baja altitud (<15 msnm) y ubicación litoral de muchos distritos y barrios pegados al mar, que cada vez más ocupan espacios con riesgo de tsunamis, muy probables en sismos de magnitud ~M: 8.0 o mayores.
2. Aunque siempre peligrosos, los sismos en las ciudades de Sierra son menos frecuentes y severos que los de Costa. El peligro proviene tanto de los alejados sismos marino costeros, como de los debidos a tectónicas locales de fallas activas dispersas. Afectan ciudades situadas en suelos finos y saturados de agua, pero también por peligrosos movimientos de masa, como el que hubo en Yungay (1970) que causó veinte mil muertes. Como particularidad regional, se tiene los muy esporádicos sismos que generan los volcanes activos de la Sierra sur, como en 1600, en que una enorme erupción del Huaynaputina, causó más de 1,600 muertes, aunque luego, ninguno de estos volcanes tuvo una actividad de magnitud cercana.

B. Sobre la vulnerabilidad sísmica de las ciudades de Costa y Sierra

1. La vulnerabilidad sísmica ha sido siempre alta o muy alta en las ciudades de Costa y Sierra, aunque con diferencias notables entre los sismos anteriores al Siglo XX y los recientes. Con excepción de Lima (bastante

grande y poblada en siglos pasados), los sismos antiguos golpeaban ciudades muy pequeñas, de poca población y de edificaciones bajas, pero que eran hechas de adobe, quincha y pesadas tejas, materiales muy sensibles a los sismos. A estas condiciones, se suman los graves riesgos de tsunamis en las ciudades portuarias de la Costa, y las calles muy estrechas en la Sierra, que causaron numerosas víctimas en sismos.

2. Desde mediados del siglo pasado, el concreto fue reemplazando al adobe reduciendo drásticamente la vulnerabilidad sísmica en la Costa y Sierra. Pero el intenso crecimiento demográfico en la Costa, donde ahora se hallan 30 de las 55 mayores ciudades del país, anuló este positivo efecto, porque gran parte de los nuevos asentamientos y distritos pobres se ubican en suelos eólicos y coluviales de baja calidad geotécnica, sobre todo en Lima-Callao, donde gran parte de sus casi doce millones de habitantes viven ahora en los vulnerables Conos (antes inexistentes).
3. Aunque la Sierra no produce los sismos más violentos, en cambio, ha tenido la peor tragedia humanitaria del país con el sismo marino de Ancash, que causó setenta mil muertes. La pobreza y muy alta proporción de viviendas de adobe que tenía la región, fue la causa de esta catástrofe. Actualmente, aunque la vulnerabilidad de las viviendas disminuyó mucho con el material noble, los caracteres físico geográficos y socioeconómicos de la Sierra, les siguen planteando escenarios de alto riesgo sísmico para muchas de sus ciudades.
4. El extremo centralismo del país plantea un riesgo sísmico muy alto en el caso de Lima-Callao, por el peso que tiene esta ciudad en la vida nacional. Un sismo muy grave sobre esta ciudad que actualmente concentra el 36% de la población del país y la mitad de su PBI, causaría no solo decenas de miles de víctimas, sino graves y duraderos efectos socioeconómicos a toda la nación. Gran parte de su población enfrenta duras condiciones socioeconómicas, defectos en infraestructuras de todo tipo (agua y alcantarillado, tránsito urbano, hospitales) y gruesos problemas organizativos e institucionales, condiciones todas que plantean escenarios sísmicos de muy alta vulnerabilidad,

C. *Sobre el riesgo sísmico de las ciudades de Costa y Sierra*

1. La peligrosidad y vulnerabilidad sísmicas multiplicadas entre sí definen el riesgo sísmico. Este peligro es muy alto en las ciudades de Costa (cercanía a las mayores fuentes sísmicas, suelos inapropiados y probables tsunamis). Su vulnerabilidad es también alta, por la densa población que ocupa recientemente muchos de sus suelos inapropiados. En la Sierra, la actividad sísmica es menor, pero su orografía propicia peligrosos movimientos de masa, aún con sismos poco potentes y lejanos. Su vulnerabilidad es alta, generalmente por condiciones socioeconómicas y baja calidad constructiva de sus viviendas y diseños urbanos.
2. El análisis de la geografía del riesgo sísmico urbano (de sus peligros y vulnerabilidades sísmica), de las 55 ciudades más pobladas del país, concluye que 20 de estas ciudades se encuentran en la condición de riesgo sísmico alto a muy alto, de las cuales 17 se hallan en la Costa (incluyendo Lima Metropolitana), y 3 en la Sierra (incluyendo Arequipa). En riesgo alto se encuentran 12 ciudades, todas ellas en la Costa. En riesgo medio a alto, se tienen 3 ciudades, todas en la Sierra. En riesgo medio se tienen 8 ciudades, 5 de ellas en la Sierra, 1 en la Costa, y 2 en la Selva. En riesgo bajo a medio se tienen también 9 ciudades, 6 de ellas en la Sierra y 3 en la Selva. Finalmente, en riesgo bajo se tiene 3 ciudades, todas ellas en la Selva.
3. Se demuestra que los patrones físico geográficos son esenciales en el conocimiento del peligro sísmico, y que las vulnerabilidades sísmicas de las ciudades son reflejo de su exposición y sus patrones históricos, demográficos, socioeconómicos y coyunturales ante un sismo, condiciones todas que responden también a sus caracteres regionales. Por consiguiente, las formas apropiadas de evaluar los riesgos sísmicos y su gestión, deben considerar necesariamente un enfoque conceptual y metodológico holístico, integral, aspecto en el que la ciencia geográfica debe considerarse en mayor dimensión de la que se tiene actualmente.

CAPÍTULO VI. RECOMENDACIONES

1. El extremo centralismo del país, hace que el riesgo sísmico de Lima Metropolitana genere un gran riesgo para todo el país, dado su peso relativo en todos los aspectos de la nación. Urgen medidas de descentralización, no solo para superar las condiciones socioeconómicas y subdesarrollo, sino también para aminorar el grave riesgo sísmico que amenaza a la metrópoli.
2. Habiéndose demostrado el carácter amplio, transversal y cambiante de la problemática sísmica en las ciudades del país, es indispensable que las evaluaciones del riesgo sísmico urbano y su gestión incorporen en mayor medida conceptos y metodologías holísticas, que puedan complementar en mejor modo, los lineamientos mayoritariamente especializados que dominan actualmente en el país. En este sentido, es conveniente que se incentive e impulse la presencia de la ciencia geográfica y sus profesionales en esta vital problemática.
3. El conocimiento de la geografía del país es fundamental para enfrentar su problemática sísmica urbana, ya que sus riesgos tienen caracteres de patrones geográficos regionales más o menos propios. Por lo tanto, el empleo de la geografía regional y la geografía del riesgo, deben estar implícitos en las evaluaciones y gestión de los riesgos sísmicos urbanos, siendo esta una línea que debiera tomarse plenamente en cuenta por parte de las instituciones y entidades involucradas en este interés.
4. Se sabe que, desde los años 90, México y otros países sísmicos operan sistemas de alerta de ocurrencia de sismos potentes a sus poblaciones, a las que la señal les llega con antelación de 20 a 120 segundos según su distancia. Este sistema se prometió también en Perú por sus autoridades, para que funcione hace ya 5 a 7 años. A pesar de su importancia vital, la población sigue esperando y no se tiene fecha prevista. Se debe impulsar y exigir a las autoridades, su pleno funcionamiento a la brevedad.

BIBLIOGRAFÍA

- AEA. (31 de Mayo de 2020). 1970 La Hecatombe de Áncash. *1a Edición*. Lima - Perú: Asociación de Escritores Ancashinos - AEA.
- Alva, J. (2011). *El Terremoto del 31 de Mayo de 1970: Licuación y Estudio de Suelos*. Chimbote: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Alva, J. (2020). *El Sismo del 31 de Mayo de 1970 y las Estaciones Acelerográficas de Chimbote y Huaraz Actuales*. Chimbote: Colegio de Ingenieros del Perú, Consejo Departamental.
- Alva, J. (s.f.). *Aspectos Sismológicos y Geotectónicos del Sismo de Pisco - Ica 15 de agosto 2007*. Recuperado el 2025, de <https://www.jorgealvahurtado.com/>.
<https://www.jorgealvahurtado.com/files/AspectosSismologicosyGeotecnicosterremotoPisco-Ica.pdf>
- Alva, J., & Rojas, J. ((s.f.)). *Arcillas y Lutitas Expansivas en el Norte y Nororiente Peruano*. [jorgealvahurtado.com. https://www.jorgealvahurtado.com/files/labgeo07.pdf](https://www.jorgealvahurtado.com/files/labgeo07.pdf)
- Alva, J., & Soto, J. (s.f.). *Evaluación del Peligro Sísmico en el Perú*. Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Unidad de Pos Grado.
<https://www.jorgealvahurtado.com/files/EVALUACION%20DEL%20PELIGRO%20SISMICO%20EN%20EL%20PERU.pdf>
- Álvarez, V. (2015). *El terremoto del 31 de mayo de 1970 y el estado peruano: mitigación de riesgos y el plan de reconstrucción urbana para las zonas afectadas por la catástrofe*. Segobia, España: Instituto Juan de Herrera.
- Ames, A., & Francou, B. (1995). Cordillera Blanca Glaciares en la Historia. *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines*, 24(1), 37-64.

- Aparcana, P., Carcelén, C., Morán, D., & Acuña, M. (2022). El terremoto de 1940 y su impacto en las condiciones de salud en Lima y Callao. *Desde el Sur*, 14(1), e0002.
- Apaza. (23 de Junio de 2015). Moquegua: Con marcha recuerdan hoy fatídico terremoto del 2001. *Diario Correo*.
<https://diariocorreo.pe/edicion/moquegua/moquegua-con-marcha-recuerdan-hoy-fatidico-terremoto-del-2001-596803/?ref=dcr>
- Araujo, W. (13 de Junio de 2025). *Historia sísmica y de licuación en Piura*. Recuperado el 2025, de Universidad de Piura udep.edu.pe.
<https://www.udep.edu.pe/hoy/2025/06/historia-sismica-y-de-licuacion-en-piura/>
- Arias-Odón, F. (2023). *Investigación documental, investigación bibliométrica y revisiones sistemáticas*. Caracas, Venezuela: Editorial Episteme.
- Astroza, I. (2008). Estudio de la Zona Afectada por el Terremoto del 15 de Agosto 2007 - Intensidades y Daños del Terremoto. *Terremoto de Pisco, Perú 15 de Agosto, 2007 - Informe de la Misión CERESIS/UNESCO*, 10-22. Recuperado el 2025, de <https://ceresis.org/ceresis/imagen/files/Terremoto-de-Pisco-Per%C3%BA.pdf>
- Ayala, M. (s.f.). *Ciudades Y Gestión De Riesgos De Desastre*. Lima, Perú: Programa Nuestras Ciudades (Ex Programa de Gestión Territorial) - Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.
- Barrenechea, F. (2020). *Atlas de amenazas naturales en Chile*. Arica, Chile: Universidad Bernardo O'Higgins, Observatorio en Gestión de Riesgo de Desastres, Facultad de Ingeniería, Ciencia y Tecnología.
- Bastida, F. (2005). *Geología*. Gijón, Asturias, España: Universidad de Oviedo.
- Batalla, C. (01 de 06 de 2025). El recuerdo de Yungay: la historia del sismo y aluvión que hirió a todo el Perú hace 55 años| FOTOS EXCLUSIVAS. *El Comercio*.

- Bellier, O., Dumont, J., Sébrier, M., & Mercier, J. (1991). Geological constraints on the kinematics and fault-plane solution of the quiches fault zone reactivated during the 10 November 1946 Ancash earthquake, northern Peru. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 81(2), 468-490.
- Bernal, I., & Tavera, H. (Abril de 2008). Microzonificación Sísmica del Distrito de Tambo de Mora - Chíncha (Comportamiento Dinámico del Suelo). IGP - Instituto Geofísico del Perú. Recuperado el 2025, de <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/P-1108.pdf>
- Boroschek, Soto, & Leon. (Septiembre de 2001). Registros en el Norte de Chile Terremoto del Sur de Perú - Ocoña 23 de Junio de 2001 Mw=8.4. *Informe RENADIC 01/04*. Universidad de Chile - Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. https://www.renadic.cl/red_archivos/SMA01072.pdf
- Borselli, L. (2025). Geotecnia 1. *Clasificación ingenieril de los suelos y de los macizos rocosos, II*. México: Universidad Autónoma de San Luis Potosí - Instituto de Geología - Facultad de Ingeniería. https://www.lorenzo-borselli.eu/geotecnia1/Geotecnia_1_parte_II.pdf
- Bosh, D. (s.f.). Unidad IV Identificación y Clasificación de Suelos. En *Geotecnia*.
- Calvo, F. (1984). La Geografía De Los Riesgos. *Geo Crítica: cuadernos críticos de geografía humana*(54), 7 - 39.
- Campoverde, J. (2017). Escenarios de Riesgo Sísmico en el Distrito de San Isidro. *Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Geógrafo*. Lima, Perú: Universidad Nacional Federico Villarreal.
- Capel, H. (2010). Los Riesgos de la Geografía y la Geografía de los Riesgos. *Papeles de Geografía*(51-52), 11-22.
- Capel, H., & Urteaga, L. (1991). *Las Nuevas Geografías*. Barcelona, España: Salvat Ediciones Generales, S. A.

- Carenas, M., Giner, J., Gonzáles, J., & Pozo, M. (2014). *Geología*. Madrid, España: Ediciones Parainfo, S.A.
- Carlotto, V., Acosta, H., Mamani, M., Cerpa, L., Rodríguez, R., Jaimes, F., Navarro, P., Cueva, E., & Chacaltana, C. (2010). Los Dominios Geotectónicos Del Territorio Peruano. *XV Congreso Peruano de Geología. Resúmenes Extendidos*. 15, págs. 47-50 Pub. Esp. No. 9. Cusco: Sociedad Geológica del Perú.
- Casaverde, M. (1969 - 1970). El Terremoto y la Avalancha en Yungay-Perú el 31 de Mayo de 1670. *Revista Peruana de Andinismo y Glaciología*, XIX(9). Recuperado el 2025, de <https://jcsfhuaraz.blogspot.com/2020/04/50-anos-del-terremoto-de-mayo-1970.html>
- Castillo, J., & Alva, J. (1993). Peligro Sísmico en el Perú. *VII Congreso Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones*. Lima.
- Castillo, J., & Alva, J. (1993). Peligro Sísmico en el Perú. *VII Congreso Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones*. Lima.
- CENEPRED. (2014). *Manual Para la Evaluación de Riesgos originados por Fenómenos Naturales*. Lima, Perú: NEVA STUDIO SAC.
- CENEPRED. (2017). *Manual Para la Evaluación del Riesgo Por Sismos*. Lima, Perú: CENEPRED - Dirección de Gestión de Procesos - Subdirección de Normas y Lineamientos.
- CENEPRED. (s.f.). *Glosario de Términos*. <https://dimse.cenepred.gob.pe/simse/cenepred/docs/glosario-terminos-grd-cenepred.pdf>
- CENEPRED, & GORE PIURA. (2023). *Informe De Evaluación De Riesgo Por Sismo En El Centro Poblado Macacará Del Distrito De La Huaca, Provincia De Paita, Departamento De Piura*. Lima, Perú: NEVA STUDIO SAC.

Chimbote en Blanco y Negro - Fotografías Antiguas de Chimbote. (29 de Enero de 2011). [Fotografía]. Recuperado el 2025, de facebook.com. <https://www.facebook.com/photo/?fbid=489946981919&set=a.275858411919.149157.256465601919>

Chira, J., Atencio, E., & Quispe, L. (1998). Geología de los cuadrángulos de Quebrada Mashansha, Raya, La Repartición, Río Inuya, Amasisa y Varadero. *BOLETIN No 100 Serie A : Carta Geológica Nacional*. Perú: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico - INGEMMET.

CISMID. (2020). *El Gran terremoto de áncash 31/05/1970*. Recuperado el 2025, de [cismid.uni.edu.pe](https://www.cismid.uni.edu.pe/efemeridessismica-el-gran-terremoto-de-ancash-31-05-1970/). <https://www.cismid.uni.edu.pe/efemeridessismica-el-gran-terremoto-de-ancash-31-05-1970/>

Civil Engg Seminar. (2015). Recuperado el 2025, de SOIL LIQUEFACTION. <https://civilenggseminar.blogspot.com/2015/04/soil-liquefaction.html>

Cluff, L. (s.f.). San Andreas Fault. *Corbis Documentary*. GettyImages. <https://www.gettyimages.es/detail/foto/san-andreas-fault-imagen-libre-de-derechos/530722734?adppopup=true>

Cobbing, E., Sánchez, A., Martínez, W., & Zárate, H. (1996). Geología de los cuadrángulos de Huaraz, Recuay, La Unión, Chiquián y Yanahuanca. *Boletín No. 76, Serie A: Carta Geológica Nacional*. Perú: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico - INGEMMET.

Coque, R. (1998). *Géomorphologie*. París: Armand Colin.

CPI. (Marzo de 2025). Perú Población 2025. *Market Report Marzo 2025, 2*. Perú. [https://cpi.pe/images/upload/paginaweb/archivo/23/CPI%20-%20Market%20Report%20-%20Proyecciones%20Poblacionales%202025%20\(2\).pdf](https://cpi.pe/images/upload/paginaweb/archivo/23/CPI%20-%20Market%20Report%20-%20Proyecciones%20Poblacionales%202025%20(2).pdf)

Craven, H. (s.f.). *ChristChurch Earthquakes*. Recuperado el 2025, de Liquefaction. <https://christchurchearthquakes-hcraven.weebly.com/liquefaction.html>

- Delavaud, C. C. (1968). *Les régions côtières du Pérou septentrional*. Instituto Francés de Estudios Andinos IFEA.
- Derbyshire, E. (1976). *Geomorphology and Climate*. Gran Bretaña: John Wiley & Sons.
- Dercourt, J., & Paquet, J. (2014). *Geología*. Barcelona: Reverté S.A.
- Derruau, M. (1970). *Geomorfología*. Barcelona: ariel.
- Dollfus, O. (1965). *Les Andes centrales du Pérou et leurs piémonts*. Lima, Perú: Instituto Francés de Estudios Andinos, IFEA.
- Dollfus, O. (1991). *Territorios andinos: reto y memoria*. Lima, Perú: Instituto Francés de Estudios Andinos, IFEA - Instituto de Estudios Peruanos, IEP.
- Dollfus, O., & Peñaherrera, C. (1962). Informe de la Comisión Peruana de Geomorfología Sobre La Catastrofe Ocurrida en el Callejón de Huaylas. El 10 de Enero de 1962. *Boletín de la Sociedad Geográfica de Lima*, LXXIX(1, Meses: Enero a Abril de 1962), 3-18.
- Duque, G. (2022). Capítulo 15: Sismos. En G. Duque, *Manual de Geología para Ingenieros* (págs. 316 - 337). Manizales, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- EcoExploratorio. (s.f.). *Museo de Ciencias de Puerto Rico*. Recuperado el 2025, de <https://ecoexploratorio.org/amenazas-naturales/terremotos/magnitud-intensidad-y-aceleracion/>
- Esteban, N. (2018). *Tipos de Investigación*. Lima, Perú: Universidad Santo Domingo de Guzmán.
- Estrada, L. (2012). *Apuntes de Sismología*. Universidad Nacional de Tucumán - Departamento de Geodesia y Topografía.
- Fasabi, M. (2021). Análisis de vulnerabilidad física para la prevención del riesgo sísmico en el AH Lomo de Corvina, Villa El Salvador. Lima:

Pontificia Universidad Católica Del Perú, Tesis para optar el Grado de Magíster en Ingeniería Civil.

Feijoo, E., & Padrón, J. (2020). La Resistividad de Rocas y su Relación con la Resistencia a Compresión Simple en Mina. Cuenca, Ecuador: Universidad del Azuay, Facultad de Ciencia y Tecnología, Escuela de Ingeniería en Minas, Tesis De Grado De Ingeniero En Minas.

Fernández, A., Muguruza, C., Azcárate, M., Santa-Cecilia, F., & Cortés, I. (2015). *Iniciación a la Geografía*. Madrid: Ed. Universitaria.

Fernández, M. (2007). *Arica 1868: un tsunami y un terremoto*. Santiago, Chile: Centro de Investigaciones Barros Arana y Universidad de Tarapacá.

García, M. (04 de Abril de 2022). *Imágenes digitales del terremoto de 1970*. Recuperado el 2025, de El Comercio Perú - Archivo El Comercio. <https://elcomercio.pe/archivo-elcomercio/imagenes-digitales-del-terremoto-de-1970-en-la-tienda-de-el-comercio-sismo-huaraz-tienda-el-comercio-nnsp-noticia/>

Garcia, V. (1997). *Historia y Desastres en América Latina*. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina.

Geotechnical Engineering Bureau NYSDOT. (2015). *Geotechnical Design Procedure: Liquefaction Potential Of Cohesionless Soils*. New York State Department of Transportation - Geotechnical Engineering Bureau. <https://www.dot.ny.gov/divisions/engineering/technical-services/technical-services-repository/GDP-9b.pdf>

Giuliani, F. (2008). Reconocimiento Realizado en la Zona Afectada por el Sismo de Pisco, Perú, del 15 de Agosto de 2007. *Terremoto de Pisco, Perú 15 de Agosto, 2007 - Informe de la Misión CERESIS/UNESCO*, 3 - 7. Recuperado el 2025, de <https://ceresis.org/ceresis/imagen/files/Terremoto-de-Pisco-Per%C3%BA.pdf>

González de Vallejo, L. (2010). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson.

- González, A. (2004). Investigación Básica y Aplicada en el Campo de las Ciencias Económico Administrativas. *Ensayos*(1), 77-88. Recuperado el 2026
- Goto, H., & Morikawa, H. (2012). Ground motion characteristics during the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake. *Soils and Foundations*, 65(4), 769-779.
- Grases, J. (2014). *La Amenaza Sísmica. Estrategias Preventivas*. Caracas: Banco de Desarrollo de América Latina.
- Hanco, N. (21 de Enero de 2018). El tsunami que destruyó La Punta en Camaná. *Diario Correo*. <https://diariocorreo.pe/edicion/arequipa/el-tsunami-que-destruyo-la-punta-en-camana-798641/?ref=dcr>
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, M. (2014). *Metodología de la Investigación* (6 ed.). Mexico D.F.: MCGRAW-HILL.
- Herráiz, M. (1997). *Conceptos Básicos de Sismología Para Ingenieros* (1 ed.). Lima: Universidad Nacional de Ingeniería - Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres CISMID.
- historicpictoric.com. (s.f.). *Lima, Peru 1940, Plano de Lima, Callao y Balnearios con una guía turística en Inglés y Castellano , Antique Vintage Reproduction*. Recuperado el 2025, de Historic Pictoric. <https://historicpictoric.com/products/map-lima-peru-1940-plano-callao-balnearios-con-una-guia?srsId=AfmBOopyQhZnKxj9NNHbBnBop19JDahiOP5ACT-Empzj3cOi7cOuZTD0>
- IGP. (3 de Octubre de 2019). "Dr. Hernando Tavera narra detalles del terremoto en Lima de 1974", [Vídeo]. Recuperado el 2025, de Youtube - Instituto Geofísico del Perú. <https://www.youtube.com/watch?v=XNxxTn06oMk>
- IGP. (31 de Mayo de 2020a). *Conferencia virtual: 50 años del terremoto del 31 de mayo de 1970*, [Vídeo]. Recuperado el 2025, de Youtube -

Instituto Geofísico del Perú.
https://www.youtube.com/watch?v=8i5_B1wV0Aw

IGP. (3 de Octubre de 2020b). *Conferencia virtual “Terremoto de 1974: el sismo que cambió el rostro de Lima y el Callao”*, [Video]. Recuperado el 2025, de Youtube - Instituto Geofísico del Perú.
<https://www.youtube.com/watch?v=r7JbEhfoFUU>

INACAP. (2011). *Propiedades índices de los suelos y características del hormigón fresco y endurecido*. Instituto Nacional de Capacitación Profesional - Universidad Tecnológica de Chile.

INAIGEM. (2023). *Memoria Descriptiva del Inventario Nacional de Glaciares y Lagunas de Origen Glaciar*. Huaraz, Áncash, Perú: Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña - INAIGEM.

INDECI - PNUD. (s.f.). Estudio: Mapa de Peligros de la Ciudad de Huaraz y sus Áreas de Expansión. *Proyecto INDECI - PNUD PER/02/051 Ciudades Sostenibles*.

INDECI. (2016). *Compendio Estadístico del INDECI 2016 en la Preparación, Respuesta y Rehabilitación ante Emergencias y Desastres*. Recuperado el 2025, de <https://portal.indeci.gob.pe/wp-content/uploads/2019/01/201705031610011.pdf>

INDECI. (2017). Escenario Sísmico para Lima Metropolitana y Callao: Sismo 8.8 Mw. Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI) - Dirección de Preparación (DIPRE).

INEI. (2017b). *Perú Perfil SocioDemográfico*.
https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1539/cap01.pdf

INEI. (abril de 2020). *Panorama de la Economía Peruana 1950 - 2019*.

INEI. (s.f.). *Capítulo 1: Características Demográficas*. Recuperado el 2025, de Lima Metropolitana · Perfil Socio-Demográfico.

<https://proyectos.inei.gob.pe/web/biblioineipub/bancopub/est/lib0002/cap0101.htm>

Instituto Geográfico Nacional de España. (s.f.). <https://www.ign.es/web/sis-teoria-general#:~:text=Las%20de%20mayor%20velocidad%2C%20y,S%2C%20que%20tienen%20car%C3%A1cter%20transversal>

Instituto Tecnológico GeoMinero de España ITGM. (s.f.). *Manual de Ingeniería Geológica.* España: Ministerio de industria y energía.

Jiménez, C., & Ortega, E. (s.f.). *Simulación Numérica del Tsunami del Callao de 1746.* Perú: Dirección de Hidrografía y Navegación, División de Geofísica.

Jiménez, C., Moggiano, N., Yauri, S., & Calvo, M. (2016). Fuente Sísmica del Terremoto de Huacho-Perú 1966 de 8.1 MW a partir de Inversión de registros mareográficos. (U. M. Marcos, Ed.) *Revista de Investigación de Física*, 19(1).

Joly, F. (1997). *Glossaire de Géomorphologie.* París: Armand Colin.

Keller, A., & Blodgett, R. (2007). *Riesgos Naturales: Procesos de la Tierra Como Riesgos, Desastres y Catástrofes.* Madrid: Pearson, Prentis Hall.

Kramer, S. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering.* New Jersey: Prentice-Hall International.

Kuroiwa, J. (2005). *Reducción de Desastres: Viviendo en Armonía con la Naturaleza* (2 ed.). Bruño.

Kuroiwa, J. (2010). Los Sismos de Ancash (1970), Pisco (2007), Haití y Chile (2010) y el Desarrollo Sostenible del Perú. *Encuentro Económico - Región Ica, 13 - 14 Abril 2010.* Ica: Banco Central de Reserva del Perú - BCRP. Recuperado el 2025, de Banco Central de Reserva del Perú - [bcrp.gob.pe. https://www.bcrp.gob.pe/docs/Proyeccion-](https://www.bcrp.gob.pe/docs/Proyeccion-)

Institucional/Encuentros-Regionales/2010/Ica/EER-Ica-Julio-Kuroiwa.pdf

Lario, J., & Bardají, T. (2016). *Introducción a los Riesgos Geológicos*. Madrid, España: Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED).

Liendo, R. (23 de Junio de 2021). Terremoto de 8.4 en Perú: El sismo del 2001 que afectó Arequipa, Tacna y Moquegua [FOTOS]. *Peru21*. <https://peru21.pe/peru/terremoto-de-84-en-peru-recordemos-el-sismo-del-2001-que-afecto-arequipa-tacna-y-moquegua-nnsp-noticia/>

Lomnitz, C. (2005). *El Próximo Sismo en la Ciudad de México D.F.* México: Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM.

Lugo, J. (2011). *Diccionario Geomorfológico*. México: Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM.

Luyo, A. (4 de Junio de 2022). *52 años tras el terremoto de Áncash*. Recuperado el 2025, de OGRAC - UNMSM. <https://oggrac.unmsm.edu.pe/52-anos-tras-el-terremoto-de-ancash/>

Mabres, A., Woodman, R., & Zeta, R. (1993). Algunos Apuntes Históricos Adicionales Sobre la Cronología de el Niño. *Boletín del Instituto Francés de Estudios Andinos*, 22(1), 395-406.

Macharé, & Ortlieb. (1991). Comportamiento Tectónico de la Costa Sur del Perú Durante el Cuaternario. *VII Congreso Peruano de Geología, Resúmenes Extendidos*, págs. 35-39. Lima.

Martínez Hernández, C. (2014). La Geografía de los Riesgos en la Región de Murcia. *ContraClave*(30). Recuperado el 2026, de https://www.researchgate.net/publication/349535981_LA_GEOGRAFIA_DE_LOS_RIESGOS_EN_LA_REGION_DE_MURCIA

Martínez, M. (2015). *La Construcción del Conocimiento Científico del Riesgo de Desastre: Epistemología, Teorías y Metodología de los Estudios*,

desde una Perspectiva Geográfica. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

Morales-Soto, N., & Zavala, C. (2008). Terremotos en el Litoral Central del Perú: ¿Podría Ser Lima el Escenario de un Futuro Desastre? *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 25(2), 217 - 224.

Muñoz, R. (28 de Mayo de 2020). *Terremoto de áncash: ¿Qué Aprendió Perú?* Recuperado el 2025, de dw.com - Deutsche Welle. <https://www.dw.com/es/50-a%C3%B1os-tras-el-terremoto-de-%C3%A1ncash-qu%C3%A9-aprendi%C3%B3-per%C3%BA/a-53601637>

Narvaez, L. (2020). Modelo Decisional de Riesgo Sísmico en el Departamento Pocito (San Juan - Argentina). *Boletín Geográfico*, 42(2), 169-183.

O'Phelan, S. (2022). El terremoto de 1746 y la gestación de la conspiración de Lima de 1750. *Revista Del Instituto Riva-Agüero*, 7(2), 15-55. <https://doi.org/10.18800/revistaira.202202.002>

Ocola, L. (2005). Peligro, vulnerabilidad, riesgo y la posibilidad de desastres sísmicos en el Perú. *Revista Geofísica*(61), 81 - 125.

Palacios, A. (2016). *Fuentes para la Historia sísmica de Chile (1570-1906)*. Santiago de Chile: Centro de Investigaciones Diego Barros Arana.

Pérez-Mallaína, P. (2005). Las Catástrofes Naturales Como Instrumento de Observación Social: El Caso del Terremoto de Lima en 1746. *Anuario De Estudios Americanos*, 62(2), 47-76. <https://doi.org/10.3989/aeamer.2005.v62.i2.49>

Pizarro, E. (2007). Lo que el presente no ve: el terremoto y maremoto de arica (1868). fuentes para su historia. *Diálogo Andino - Revista de Historia, Geografía y Cultura Andina*(29), 47-64.

Plano histórico de Lima. (1946). Recuperado el 2025, de Lima 2000. <https://lima2000.com/wp-content/uploads/2016/12/1750Plano155.jpg>

Plano histórico de Lima. (1970). Recuperado el 2025, de lima 2000. <https://lima2000.com/wp-content/uploads/2016/12/1970plano90.jpg>

Porta, J., López-Acevedo, M., & Poch, R. (2014). *Edafología : Uso y Protección de Suelos* (3a ed.). Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.

Redacción Perú21. (21 de Agosto de 2019). *¿Vuelve Brady otra vez?* Recuperado el 2025, de Perú21.pe. <https://peru21.pe/voces/vuelve-brady-vez-15037-noticia/>

Redacción RPP. (17 de Septiembre de 2015). *Región Piura tiene un gran silencio sísmico desde 1912.* Recuperado el 2025, de rpp.pe. <https://rpp.pe/peru/actualidad/region-piura-tiene-un-gran-silencio-sismico-desde-1912-noticia-836626>

Redacción RPP. (21 de Agosto de 2019). *Perú Comenzará a instalar en 2020 su sistema de Alerta Temprana de terremotos.* Recuperado el 2025, de rpp.pe. <https://rpp.pe/peru/actualidad/peru-comenzara-a-instalar-en-2020-su-sistema-de-alerta-temprana-de-terremotos-noticia-1215646?ref=rpp>

Reyes, L. (1980). Geología de los Cuadrángulos de Cajamarca, San Marcos y Cajabamba. *BOLETIN No 31 Serie A : Carta Geológica Nacional.* Perú: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico - INGEMMET.

Rivera, H. (2011). *Geología General* (3a ed.). Lima, Perú: Editorial Megabyte.

Robert, J., & Metzger, P. (2013). Enfoques de la Vulnerabilidad Urbana: Entre Geografía de los Riesgos y Geografía Urbana. *Encuentro de Geógrafos de América Latina EGAL 2013.* Lima, Perú.

RPP. (26 de Mayo de 2022). *Temblor en Perú: IGP advierte que no se libera energía sísmica hace más de 270 años en la costa*, [Vídeo]. YouTube - RPP Noticias. <https://www.youtube.com/watch?v=tqLhOfXEeWE>

Ruiz, M. (2011). *Vulnerabilidad Territorial y Evaluación de Daños Postcatástrofe: Una Aproximación Desde la Geografía del Riesgo.*

Madrid: Universidad Complutense de Madrid, Servicio de Publicaciones.

Scharager, J., & Armijo, I. (2001). Metodología de la Investigación para las Ciencias Sociales [CD-ROM]: Versión 1.0. Santiago, Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile - Escuela de Psicología.

SENCICO. (2018). *Norma Técnica Peruana E.030 Diseño Sismorresistente*. SENCICO - Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción. <https://www.gob.pe/institucion/sencico/informes-publicaciones/887225-normas-del-reglamento-nacional-de-edificaciones-rne>

Silgado, E. (1978). Historia de los Sismos Mas Notables Ocurridos en el Perú (1513 - 1974). *Boletín N. 3 Serie C. - Geodinámica e Ingeniería Geológica*. Lima: INGEMMET Instituto de Geología y Minería. https://repositorio.ingemmet.gob.pe/bitstream/20.500.12544/251/2/C-003-Boletin-Historia_sismos_mas_notables_Peru.pdf

Sistema Nacional de Alerta de Tsunamis - Departamento de Oceanografía - División de Geofísica. (s.f.). *Tsunami Costa Sur del Perú Camaná 23 de Junio 2001*. Marina de Guerra del Perú. Recuperado el 2025, de https://www.dhn.mil.pe/files/cnat/pdf/otros/Panel_tsunami_Camana_.pdf

Solís, R., Moreno, É., & Castro, P. (2005). Durabilidad en la estructura de concreto de vivienda en zona costera. *Ingeniería*, 9(1), 13-18.

Strahler, A. (1974). *Geografía Física*. Barcelona: Oikos - Tau Editores.

Summerfield, M. (1996). *Global Geomorphology*. Singapur: Longman Singapore Publishers.

Tarbuck, E., & Lutgens, F. (2010). *Ciencias de la Tierra: Una Introducción a la Geología Física* (8a ed.). Pearson Educación Prentice Hall.

- Tavera. (2002). El Terremoto de la Región Sur del Perú del 23 de Junio de 2001. Centro Nacional de Datos Geofísicos - CNDG.
- Tavera. (2014a). *Evaluación del Peligro Asociado a los Sismos*. Lima, Perú: Instituto Geofísico del Perú - IGP.
- Tavera. (2014b). Zonificación Sísmica - Geotécnica Ciudad de Punta de Camaná. Lima, Perú.
- Tavera, H. (2019). *Los terremotos profundos, por el Dr. Hernando Tavera*. Instituto Geofísico del Perú - IGP. <https://www.gob.pe/institucion/igp/noticias/74134-los-terremotos-profundos-por-el-dr-hernando-tavera>
- Tavera, H., Agüero, C., & Fernández, E. (2016). *Catálogo General de Isosistas Para Sismos Peruanos*. Lima, Perú: Instituto Geofísico del Perú - IGP. https://sigrid.cenepred.gob.pe/docs/PARA%20PUBLICAR/IGP/Catalogo_Isosistas_Peru_2016.pdf
- Thouret, J.-C., Dávila, J., Rivera, M., Gourgaud, A., Eissen, J.-P., Le Pennec, J.-L., & Juvigné, É. (1997). L'éruption explosive de 1600 AU huaynaputina (Pérou), La Plus Volumineuse de l'histoire dans les Andes Centrales. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science*, 325(12), 931 - 938.
- Tricart, J. (1973). Un problème de géomorphologie appliquée : le choix des sites d'habitat dans une région sismique (Andes centrale, Pérou). *Annales de Géographie*, 82(449), 8-27. Recuperado el 2025, de <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/Reg-232.pdf>
- U.S. Geological Survey. (s.f.). *Mapa de Sismicidad en el Perú*. DePeru.com. https://www.deperu.com/abc/en-informacion-sismica_2999_mapa-de-sismicidad-en-el-peru.html
- UNISDR. (2015). *Hacia el desarrollo sostenible: El futuro de la gestión del riesgo de desastres. Informe de Evaluación Global sobre la Reducción del Riesgo de Desastres*. (C. J. Anderson, Ed.) Ginebra, Suiza: Oficina

de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDR).

Urdanivia, H. (2019). *Relación entre el tipo de suelo (SUCS y AASHTO) y el asentamiento de suelos para determinar asentamientos diferenciales en cimientos de concreto armado*. Cerro de Pasco, Perú: Universidad Nacional Daniel Alcides Carrion - Facultad de Ingeniería - Tesis de Grado - Ingeniería Civil.

Vallenas, L. (2001). Terremoto en el sur de Perú: Una prueba de capacidad nacional y local. *EIRD Informa - America Latina y el Caribe*(4), 7. Recuperado el 2025, de https://www.eird.org/esp/revista/No4_2001/pagina7.htm

Vásquez, M. (2017). Muestreo Probabilístico y no Probabilístico. Universidad del Istmo.

Viers, G. (1974). *Geomorfología*. Oikos-tau Ediciones.

Vílchez, M. (2013). Redimensionamiento y evaluación del deslizamiento traslacional - flujo de detritos de Mayunmarca y alrededores (Andabamba, Huancavelica). *Foro Internacional Peligros Geológicos, Arequipa, 14-16 octubre 2013, Libro de resúmenes*, 172-176. Arequipa: INGEMMET.

Welsch, W. (25 de Julio de 1970). Aluvión sobre Yungay y Ranrahirca del pico Norte (6,655 m) del nevado Huascarán el 31-Mayo-1970. *[Fotografía]*. Sociedad Alpina Alemana-Sección Bayerland. Recuperado el 2025, de <https://jcsfhuaraz.blogspot.com/2020/04/50-anos-del-terremoto-de-mayo-1970.html>

Wikipedia. (2025). *Anexo:Terremotos en Perú*. es.Wikipedia.org. https://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Terremotos_en_Per%C3%BA

Wilson, J. (1984). Geología del Cuadrángulo de Celendín. *BOLETIN No 38 Serie A : Carta Geológica Nacional*. Perú: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico - INGEMMET.

- Wilson, J., Reyes, L., & Garayar, J. (1995). Geología del Cuadrángulo de Pallasca, Tayabamba, Corongo, Pomabamba, Carhuaz y Huari. *BOLETIN No 60 Serie A : Carta Geológica Nacional*. Perú: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico - INGEMMET.
- Zilio, M., D'Amico, G., Baez, S., Palacios, F., & Aranda, M. (2017). Una Mirada Geográfica sobre las Problemáticas Geológicas y Geomorfológicas. Riesgo e Incertidumbre en Los Terremotos de Chile y Haití, 2010. *XIX Jornadas de Investigación y Enseñanza de la Geografía*. Universidad Nacional de la Plata.
- Zúñiga, F. (2011). *Notas Introductorias Sismología*. Juriquilla: Centro de Geociencias de la UNAM.