

## RESUMEN

El objetivo de este estudio, es la evaluación del riesgo sísmico para capitales de provincias y su población en zonas sísmicamente activas de Argentina.

Para este propósito, se seleccionaron 17 ciudades capitales localizadas en la parte noroeste y centro-oeste del país.

Para el cálculo, se consideraron dos medidas de riesgo sísmico:

- número de capitales que pueden ser afectadas por movimientos de intensidad VII v VIII (escala modificada de Mercalli):
- número de habitantes que pueden ser afectados por los movimientos antes mencionados

La estimación se basó en:

- análisis sismotectónico de la región bajo estudio:
- modelo de ocurrencia de sismos:
- modelo de isosistas v datos consistentes en: mapas geológicos, tectónicos y de isosistas; catálogos de sismos y datos demográficos.

Todas estas componentes, están representadas en dicho estudio v son de interés para la estimación de otros efectos producidos por la sismicidad

El presente estudio, fue financiado por Fundación MAPFRE, Madrid - España y realizado en base a la metodología de estimación probabilística de riesgo sísmico preparada por el International Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, Moscow, Russia, bajo la supervisión científica del Prof. G. Molchan, Drs. T. Kronrod v A. Gorbshkov. Supervisor del local Prof. S. Carmona: UNSJ, San Juan - Argentina.

2.5.1. Formulación del problema.

2.5.2. Características de los objetos del reconocimiento.

### **CAPITULO 3.**

#### **3. ANALISIS DE LOS DATOS.**

3.1. Origen de los datos

3.1.1. Origen del catálogo Local.

3.1.2. Catálogo mundial NOAA - versión IITEP -

3.2. Preparación del catálogo de parámetros sísmicos para la zona de estudio.

3.2.1. Análisis del catálogo Local.

3.2.2. Transformación del catálogo Mundial

3.2.3. Obtención del catálogo de trabajo (ARSUM).

3.3. Determinación de profundidades en el catálogo.

3.3.1. Decisión final sobre profundidades.

3.4. Representación gráfica del catálogo de trabajo.

3.5. Eliminación de sismos secundarios (réplicas).

### **CAPITULO 4.**

#### **4. CARACTERISTICAS BASICAS DE SISMICIDAD.**

4.1. Sismicidad de la República Argentina.

4.2. Algoritmo y software para la estimación de RFM.

4.3. Magnitud.

4.3.1. Escala de magnitud.

4.3.2. Agrupamiento de magnitudes.

4.4. Estimaciones de RFM para toda la región investigada.

4.5. Estimación de RFM para la zona de Benioff y de Corteza.

4.6. Estimación de RFM para cada subregión.

4.7. Análisis de los parámetros RFM.

## CONTENIDO

### INTRODUCCION.

### CAPITULO 1.

#### 1. ESTIMACION PROBABILISTICA DEL RIESGO SISMICO.

- 1 1. Medidas del riesgo sismico
- 1.2. Ejemplos de aplicación:
  - 1.2.1. Riesgo sismico para las grandes ciudades del mundo.
  - 1 2 2. Seguro para Caucazo
- 1.3 Modelo de ocurrencia de sismos.
- 1 4. Regionalización sismotectónica.
- 1.5. Catálogo de sismos.
- 1.6 Modelo de isosistas.
- 1 7. Esquema de la estimación del riesgo sismico.

### CAPITULO 2.

#### 2. REGIONALIZACION SISMOTECTONICA DE LA PARTE NOROESTE Y CENTRO OESTE DE ARGENTINA Y RECONOCIMIENTO DE AREAS PROPENSAS A PRODUCIR SISMOS DE $M \geq 7.0$ .

- 2 1. Principios de regionalización.
- 2.2 Zonificación morfoestructural de la parte noroeste y cento-oeste de Argentina.
- 2.3. Regionalización sismotectónica del noroeste y centro-oeste de Argentina
- 2 4. Regiones sismotectónicas
- 2.5. Evaluación de la máxima magnitud posible de una región sobre la base del reconocimiento de áreas propensas a sismos

4.8. Decisión sobre la máxima magnitud para los próximos 30 años

## CAPITULO 5.

### 5. MODELO DE ISOSISTAS.

- 5.1. Datos iniciales
- 5.2. Cálculo del área de las isosistas.
- 5.3. Modelo del area de las isosistas.
- 5.4 Comparación con otras relaciones.
- 5.5. Decisión final para  $\text{Log } Q_I(M)$ .
- 5.6. Intensidad en el área epicentral.
- 5.7. Forma y orientación de las isosistas.
  - 5.7.1. Forma de las isosistas.
  - 5.7.2. Orientacion de las isosistas
    - 5.7.2.1. Decision sobre orientación de las isosistas.

## CAPITULO 6

### 6. ESTIMACION DEL RIESGO SISMICO.

- 6.1. Ciudades y su población.
- 6.2. Parámetros computacionales.
- 6.3. Resultados de la estimación del riesgo sísmico.
- 6.4. Análisis de los resultados.
- 6.5. Futuras investigaciones.

## CONCLUSIONES.

## REFERENCIAS.

## INTRODUCCION

Los sismos, como fenómenos del medio ambiente, no reconocen fronteras nacionales ni diferencias entre sociedades organizadas bajo diferentes filosofías. Estos fenómenos afectan, en diferentes grados, a la humanidad entera, y constituyen un enemigo natural común del cual se conoce relativamente poco.

En 1987 la Asamblea General de las Naciones Unidas aprobó la resolución 42/169 y votó para designar la década de 1990 como la Década Internacional para la Reducción de los Desastres Naturales (IDNDR). Los reportes presentados por las Naciones Unidas en los últimos 20 años, han declarado, que casi tres millones de víctimas y ochocientos millones de personas han sido afectadas adversamente en todo el mundo por causa de los desastres naturales. Desde 1900 - 1976 los terremotos fueron los responsables de casi el 60% de las muertes producidas [1]. Teniendo en cuenta estos desalentadores porcentajes y la alta peligrosidad sísmica que presenta parte del territorio argentino, resulta de sumo interés continuar con estudios que nos permitan ampliar nuestros conocimientos sobre la sísmicidad nacional, con el objeto de evaluar su incidencia e incorporarlas en el planeamiento del uso de la tierra y en el diseño y construcción de edificios más seguros, de modo de reducir el daño que producen los terremotos a las personas y a sus propiedades.

La República Argentina, en la que se ubica el área bajo estudio, está situada en el extremo sur del continente Sudamericano (Figuras 1 y 2).

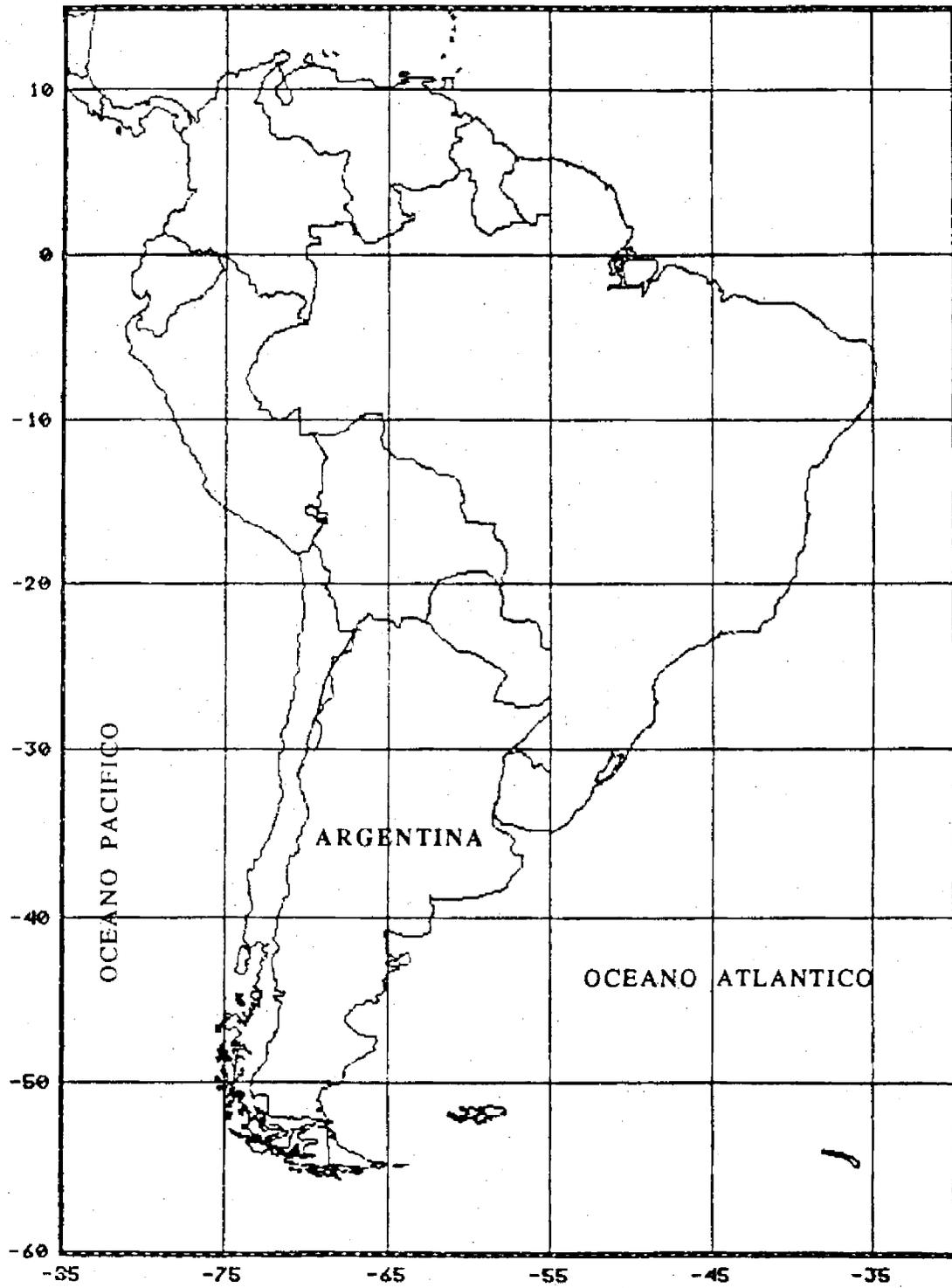
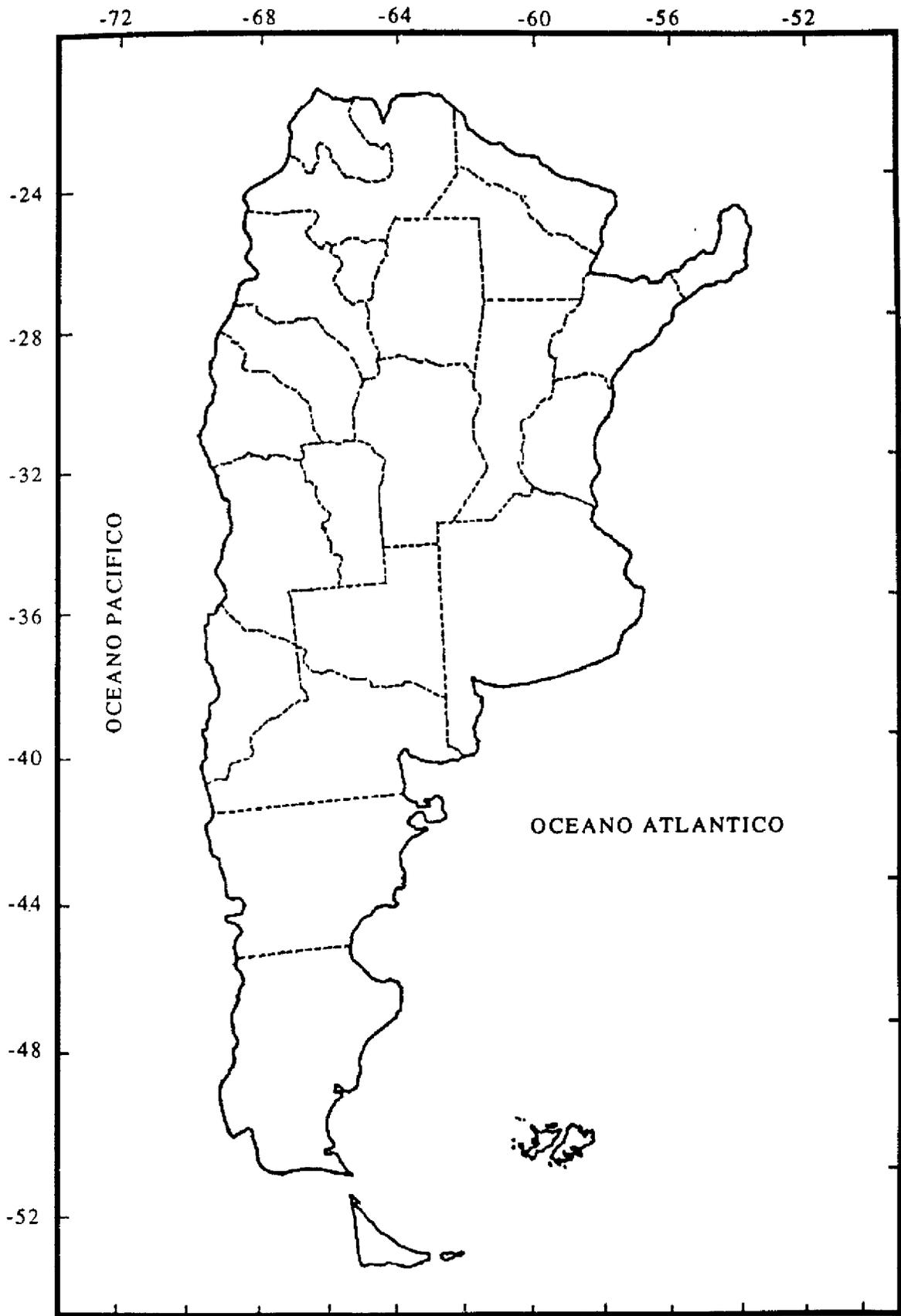


Figura 1: Continente Sudamericano



**Figura 2: República Argentina**

## PRINCIPALES SISMOS HISTORICOS

Muchos son los terremotos que han afectado al país desde la conquista española hasta nuestros días, antecedentes que no hacen más que acentuar el interés y la necesidad de investigar el riesgo sísmico al que se hallan expuestas las distintas zonas del extenso territorio nacional.

Se describen aquí, algunos de los principales terremotos que han afectado a las distintas provincias de la Argentina , sobre los cuales se presenta una breve reseña [2].

- El 13 de septiembre de 1692, la ciudad de Esteco, provincia de Salta es destruida por un terremoto, siendo éste el primer sismo del que se poseen documentos escritos. El sismo que destruyó por completo las construcciones de la ciudad, tuvo una duración aproximada de 15 minutos, sus fuertes réplicas se sintieron hasta tres días después; el terremoto estuvo acompañado de fuertes ruidos subterráneos y modificaciones en la topografía del terreno que causaron el desvío del río Piedras que inundó la ya destruida ciudad. La otrora importante ciudad de Esteco, con iglesia, cabildo, conventos, molinos, hornos de fundición, etc, importante centro comercial de la época, quedó convertida en escombros y polvo para ya nunca mas ser reconstruida. El terremoto fue en horas de la mañana, 10 hs., por lo que el número de víctimas fueron 11 muertos, muchos heridos y la destrucción casi total de las construcciones. Documentos de la época narran que en la ciudad de Salta, distante 90 Km al nor-noreste del área epicentral, se produjeron daños de consideración en templos y viviendas, causando gran alarma, pero no víctimas entre la pobla-

ción. El terremoto fue sentido con regular intensidad en todo el noroeste argentino.

- EL 20 de marzo de 1861, la ciudad de Mendoza es destruida por un terremoto, siendo éste uno de los mas destructivos de la historia sísmica argentina. El área epicentral se estimó al oeste de la ciudad, en el extremo sur de la precordillera mendocina. Los departamentos más afectados fueron la Ciudad capital, Las Heras y Godoy Cruz. El terremoto dejó el triste saldo de alrededor de 5.000 muertos, que constituían las dos terceras partes de la población. El Censo Oficial de 1857 indicaba una población de 8 678 habitantes, de los cuales se supone sobrevivieron 3.000. Produjo la destrucción total de 2.000 viviendas, la mayoría de ellas hechas de adobes con techos de caña y barro, sin ningún tipo de trabazón o llaves en las esquinas. El movimiento sísmico causó la rotura de cañerías, entre ellas las del gas utilizado para la iluminación, lo que produjo un incendio que no hizo mas que agrandar la tragedia. El terremoto estuvo precedido por un sismo premonitor, acompañado de un fuerte estruendo al oeste de la ciudad. En el departamento Guaymallén y zona de Las Ciénagas por aquellos días, se abrieron grietas y pozos de los que manaba agua. En la localidad de Uspallata hubo deslizamientos de laderas y caída de grandes bloques. El terremoto fue sentido con regular intensidad en todo Chile y Argentina.

- El 8 de octubre de 1871, un terremoto de intensidad VIII en la escala Mercalli Modificada, destruye por completo la ciudad de Orán, en la provincia de Salta. Las crónicas de la época dicen de

la pérdida de muchas vidas, heridos y grandes daños; la población de Orán quedó en la mas completa indigencia. Los daños causados por el terremoto fueron muy serios debidos a la hora en que se produjo el sismo y trajo aparejado un éxodo de la población del lugar.

- El 27 de octubre de 1894, tuvo lugar el denominado Terremoto Argentino, llamado así, puesto que sus características destructivas cubrieron un área superior a los 300 km a la redonda. Sus efectos destructivos se hicieron sentir tanto en la ciudad de San Juan como en la capital de La Rioja. Destruyó la antigua ciudad de San Juan, situada entonces en el actual barrio de Concepción, es decir, un poco mas al norte de su actual ubicación. La ciudad contaba en ese entonces con una población de 10 000 habitantes y la construcción era toda de adobes. El área epicentral estuvo en el valle de Iglesia-Rodeo, en este lugar, donde la intensidad fue máxima, no quedó ninguna casa en pié y los muertos superaron los 20. Se informó de la formación de grandes grietas, donde el sismo se manifestó con fuertes golpes de abajo hacia arriba y seguido de muy fuertes réplicas. Los daños en la ciudad y departamentos aledaños fueron importantes y oficialmente se reportaron alrededor de 20 muertos y numerosos heridos.

- El 14 de abril de 1927, se produjo en Mendoza en horas de la noche, un sismo, llamado el terremoto Argentino-Chileno, causando daños en las ciudades de Mendoza-Argentina y en Santiago-Chile. El área epicentral se ubicó en las cercanías del C° Aconcagua, limite internacional entre Chile y Argentina. En Mendoza, Capital, hubo derrumbes de cornisas y agrietamiento de

muros. No se reportaron víctimas, solo algunos contusos y heridos leves. En Chile alcanzó mayor violencia en particular en la parte norte de Santiago, como así también en las localidades de Colina y Llai-Llai. Oficialmente se reportaron 40 muertos y muchos heridos. Hubo derrumbes de edificios.

- El 30 de mayo de 1929, un intenso terremoto afectó el sur de la provincia de Mendoza, departamento de San Rafael; las mayores catástrofes se reportaron en las localidades de Colonia Las Malvinas y en Villa Atuel. Oficialmente se reportaron 30 muertos y muchos heridos. Los daños materiales fueron totales en las construcciones de adobe; mientras que en las de ladrillo fueron menores. Las localidades de Villa Atuel y Colonia Las Malvinas están fundadas en terrenos de rocas sedimentarias, depósitos eólicos, del tipo loess, cuya constitución varía de un lugar a otro, siendo en Colonia Las Malvinas algo más arcilloso y en Villa Atuel más arenoso. Las construcciones comunes en aquella época eran las de adobe, fabricados con tierras provenientes del médano, lo que da un material y tipo de construcción poco resistente a los temblores. Los cimientos por lo general estaban hechos con ladrillos y mezcla de calidad variada y la altura de las casas era de 5 a 6 metros. Eran muy pocas las casas de ladrillo, en Colonia Las Malvinas faltaban por completo. Villa Atuel en el año 1930 era un pueblo de 1 Km<sup>2</sup>, con una población de 900 personas. El Registro Civil informó que a causa del terremoto murieron 17 personas y se registraron 17 heridos en la villa. El terremoto fue sentido en toda la provincia de Mendoza, San Juan,

San Luis, suroeste de Córdoba, oeste y centro de Buenos Aires, La Pampa y Neuquen. El Observatorio Astronómico de La Plata, registro hasta el día 9 de Junio, algo mas de 50 réplicas.

- El 24 de diciembre de 1930, el noroeste argentino es sacudido por un fuerte terremoto que afectó principalmente la provincia de Salta, siendo la zona mas dañada el pueblo de La Poma, donde se reportaron 33 muertos y mas de 70 heridos, en su gran mayoría mujeres y niños. El sismo ocurrió en horas de la madrugada y las replicas se sucedian a intervalos de 10 minutos. La población estaba aterrorizada y pernoctaba en las calles soportando la lluvia y frío que sobrevino al terremoto. En los días siguientes el clima fue frío y lluvioso, mientras que todas las noches se sentian fuertes réplicas. En La Poma, se formaron profundas grietas en el suelo; la mayoría de las casas quedaron caídas o inhabitadas. El informe oficial cita además que habian 20 heridos graves y alrededor de 40 con contusiones leves. El día 27 de diciembre, en horas de la noche, se registró una replica muy fuerte, que terminó por destruir las casas ya agrietadas

- El 11 de junio de 1934, las provincias de Córdoba y La Pampa fueron azotadas por un fuerte terremoto, que durante 6 horas produjeron alrededor de 70 fuertes réplicas. La zona más afectada fue la localidad de Sampacho, pues los daños fueron de alrededor de un 90% en las viviendas, hubo muchos heridos y se produjo gran alarma en la población. El fenómeno fue acompañado de ruidos subterráneos de mucha intensidad. El terremoto fue sentido en todo el centro del país de manera particular en el sur de Córdoba

y noreste de La Pampa.

- El 15 de enero de 1944, se produjo un temblor en la provincia de San Juan con consecuencias devastadoras por la pérdida de vidas, heridos y daños económicos. La intensidad máxima fue de IX de la escala internacional de Mercalli. Los daños materiales fueron cuantiosos y produjo mas de 10.000 muertos, en gran parte de la capital y los departamentos de Albardón, Zonda, Ullún, 25 de Mayo, Caucete, Angaco, Rawson y Pocito. San Juan colonial sucumbió por la calidad del material de las construcciones, aunque algunos edificios importantes quedaron en pié, tras algunos vaivenes, por estar construidos de hierro y cemento. La ciudad de San Juan tenía 80.000 habitantes , el terremoto dejo un saldo de 10 000 muertos y alrededor de 15.000 heridos; su edificación en su mayoría de adobe, fue destruida en un 80 a 90% Las características destructivas de este terremoto se ven reflejadas en la curva isosista de VII MM. que abarcó un área de alrededor de 40.000 Km<sup>2</sup>; muestra también de la extraordinaria energía liberada en el evento. La duración de la fase más intensa del terremoto fue estimado de acuerdo a relatos de testigos presenciales, entre 15 y 20 segundos.

- El 25 de agosto de 1948, ocurrió un fuerte terremoto que afectó a la provincia de Salta, el gobierno informó que el Departamento de Anta, en cuya zona se supone el epicentro, fue la mas afectada, los edificios de sus poblaciones se vieron agrietadas o destruidas, especialmente las localidades de Palermo, Los Nogales, Piquete, Las Lajitas y daños menores en Joaquín V González. Los mayores daños se registraron en las localidades de Palomitas,

La Trampa, Santa Rita y Las Pavas, donde los destrozos fueron graves, se cayeron casas y se formaron grietas en el suelo. Hubo 2 muertos y muchos heridos. Los temblores fueron acompañados de ruidos subterráneos, fue sentido muy fuerte en las localidades de Campo Santo, donde hubo serios daños materiales y fue también sentido en Metán y Rosario de la Frontera. En el parque nacional El Rey se derrumbaron muros y paredes, se reportó un muerto y varios heridos; algo similar pasó en el pueblo de La Trampa. El sismo y sus réplicas se sintieron en las provincias de Tucumán, Formosa y Jujuy, en esta última en la localidad de Maimará se cayeron casas y muros, pero no hubo víctimas. En Buenos Aires fue sentido en los edificios altos. En Salta, hubo caída de cornisas y paredes agrietadas, produciéndose además el corte de energía eléctrica.

- El 23 de noviembre de 1977, San Juan es despertado por un violento movimiento sísmico que afectó la zona central y sur de San Juan y todo el norte de la provincia de Mendoza. El área epicentral fue el flanco oriental de la Sierra de Pie de Palo, cerca de la localidad de Nikizanga, departamento Caucete, lugar donde se produjeron víctimas y graves daños. El número de víctimas fatales en la provincia de San Juan fue de 70 y alrededor de 209 heridos graves. El mayor porcentaje de víctimas fatales referido a la población ocurrió en la localidad de Bermejo, a 60 Km al este de la ciudad de Caucete. La ciudad de Caucete, ubicada a 30 Km al este de la capital de San Juan fue donde se produjeron los mayores daños y víctimas, mientras que daños menores se extendieron hasta algunos edificios de la ciudad de Córdoba a

poco mas de 400 Km al este de Cauce. Las vibraciones se percibieron dentro de los edificios de cuatro capitales Sudamericanas: Santiago de Chile, Buenos Aires, Montevideo, Asunción del Paraguay y aún en los edificios altos de Puerto Alegre y San Pablo, Brasil, esta última ubicada a algo mas de 2000 Km de San Juan. Se reportaron colapsos e importantes daños en las construcciones de adobe y mamposteria sin refuerzos, también hubo problemas de licuefacción de suelos que afectó un área de alrededor de 1000 Km<sup>2</sup> afectando viñedos, canales de riego, rutas y vias férreas. El terremoto estuvo precedido por un fuerte ruido subterráneo y comenzó a percibirse en forma suave durante algunos segundos antes, algo que permitió poner en sobre aviso a la población y ganar prontamente lugares seguros.

- El 26 de enero de 1985, La provincia de Mendoza fue afectada por un fuerte sismo, con epicentro en la localidad de Barrancas-Maipú, afectando además a los departamentos de Godoy Cruz, Ciudad, Las Heras, Guaymallén, Palmira, Luján y Rivadavia. Oficialmente se reportaron 10 muertos y gran cantidad de heridos y contusos. En general, los daños predominantes se produjeron en construcciones de adobe o mamposteria de ladrillos muy antiguas. Se manifestaron como grietas en las paredes, corrimientos de techos y muros fuera de la vertical. En algunas zonas se produjeron colapsos parciales de edificios. Los daños mas importantes se manifestaron en las construcciones de adobe, fueron de menor importancia en las obras de infraestructura, no se observaron fenómenos importantes en los suelos. Por las características del terremoto, foco cercano, radiación de energía sísmica y factores

propios del lugar, tales como topografía, suelo de fundación y tipo de construcción, hizo que los efectos no presentaran una distribución uniforme. En el departamento Godoy Cruz se produjo el colapso de un Hospital, construcción antigua, provocando algunas víctimas. En general resultaron mas afectadas las viviendas del oeste de la ciudad de Mendoza Capital y Las Heras, como así tambien aquellas que estaban ubicadas en paleocauces. Este terremoto causó daños menores en el resto de los departamentos, pero no de las características señaladas para los antes mencionados, tal es el caso de las observadas en Fray Luis Beltrán, Palmira, Medrano, Junín, San Martín y Rivadavia; donde la intensidad del sismo fue menor.

Analizando los efectos de estos terremotos, se observa que el producido en Mendoza en el año 1861 dio como resultado un saldo de 5.000 muertos, que constituían las dos terceras partes de la población en esos momentos, actualmente el conglomerado urbano de Mendoza cuenta con más de 600.000 habitantes; el terremoto de 1692 en el norte argentino, se produjo cuando las capitales de Salta y Tucumán recién habían sido fundadas, actualmente la ciudad de Salta cuenta con 373.857 habitantes, y la de Tucumán con 473.014; el terremoto de 1894, tuvo su epicentro en una zona completamente despoblada, sin embargo produjo muchísimos daños en las ciudades de San Juan, la Rioja y Córdoba, cuyas ciudades cuentan con una población actual de 119.399, 106.281 y 1.179.067 de habitantes respectivamente. Teniendo en cuenta estas consideraciones, se comprende que el problema sísmico en Argentina es una realidad que puede afectarnos en cualquier momento con conse-

cuencias imposibles de predecir. Es por esta razón que se hace necesario estudiar todo los antecedentes existentes para poder obtener estimaciones cuantitativas del riesgo sísmico que nos permitan ampliar nuestros conocimientos sobre el tema y se traduzca en una reducción de los desastres producidos por los terremotos a las personas y sus propiedades.

En Tabla 1. se presenta un listado de los terremotos destructivos más importantes ocurridos en Argentina, que han producido daños equivalentes a intensidad M.M. VIII o mayores.

TABLA 1

TERREMOTOS DESTRUCTIVOS MAS IMPORTANTES

FECHA	PROV.	LUGAR	COORDENADAS		PROF. Km	INT. I(M.M.)	MAG. M
			Sur	Oeste			
1 692-13-09	SALTA	ESTECHO	25.40	64.80	30	IX	7.0
1 782-22-05	MENDOZA	CIUDAD	32.90	68.90	30	VIII	7.0
1.826-19-01	TUCUMAN	TRANCAS	26.20	65.30	30	VIII	6.0
1.844-18-10	SALTA		24.80	64.70	--	VII	6.5
1.861-20-03	MENDOZA	CIUDAD	32.90	68.90	30	X	7.0
1 871-08-10	SALTA	ORAN	23.07	64.40	30	VIII	6.5
1.873-06-07	SALTA	ORAN	23.07	64.40	30	VIII	6.5
1.873-05-12	JUJUY	CIUDAD	24.20	65.20	30	VIII	6.5
1.894-27-10	SAN JUAN	JACHAL	30.50	68.40	30	X	7.5
1.898-04-02	CATAMARCA	POMAN	28.10	66.10	30	VIII	6.0
1 899-12-04	LA RIOJA		28.70	68.30	30	VIII	6.3
1.903-12-08	MENDOZA	LAS HERAS	32.10	69.10	70	VII	6.3
1.920-17-12	MENDOZA	LAVALLE	32.70	68.40	40	VIII	6.3
1.927-14-04	MENDOZA	LAS HERAS	32.40	69.30	60	VIII	7.4
1 929-30-05	MENDOZA	SAN RAFAEL	34.90	68.00	40	VII	6.5
1 930-24-12	SALTA	LA POMA	24.70	66.30	30	VIII	6.0
1.934-11-06	CORDOBA	SAMPACHO	33.70	64.50	30	VIII	6.0
1 936-22-05	SAN LUIS	S. FRANCISCO	32.50	65.90	40	VIII	6.2
1 941-03-07	SAN JUAN	CAUCETE	31.70	67.90	70	VII	6.7
1 944-15-01	SAN JUAN	LA LAJA	31.40	68.40	30	IX	7.8
1.948-25-08	SALTA	PALOMITAS	24.90	64.80	50	VIII	7.0
1.949-17-12	T. FUEGO	E. MAGALLANES	54.10	70.50	30	VII	7.8
1.952-11-06	SAN JUAN	POCITO	31.70	68.90	30	VIII	7.0
1 957-24-10	LA RIOJA	V CASTELLI	28.90	68.00	37	VII	6.0
1.959-12-05	SALTA	SAN ANDRES	23.20	64.70	100	VII	6.8
1.966-21-10	CATAMARCA	BELEN	27.80	67.50	30	VII	5.0
1 973-19-11	SALTA		24.80	64.60	40	VII	6.1
1.974-17-08	SALTA	ORAN	23.30	64.40	30	VII	5.0
1 977-23-11	SAN JUAN	CAUCETE	31.30	67.70	17	IX	7.4
1.985-26-01	MENDOZA	MAIPU	33.10	68.80	12	VIII	6.0

## CAPITULO 1

### ESTIMACION PROBABILISTICA DEL RIESGO SISMICO

La estimación del riesgo sísmico es básica para la toma de decisiones concernientes a la prevención y mitigación de los daños producidos por terremotos. En este capítulo se describen las bases generales de la metodología probabilística utilizada para su cálculo.

La estimación estadística del riesgo sísmico es la distribución de probabilidad de diferentes clases de daños producidos por terremotos. Específicamente esto involucra la convolución de cuatro modelos de ocurrencia de sismos, de isosistas, de daños y el de dinámica en el tiempo de los objetivos propuestos para el estudio.

La naturaleza del problema requiere, que el riesgo sísmico sea estimado para objetivos específicos. Esto es:

•

- a)-combinación de puntos (edificios o pequeñas ciudades)
- b)-combinación de líneas (grandes carreteras, autopistas líneas ferroviarias)
- c)-combinación de dos áreas dimensionales (regione económicas, habitantes de áreas, grandes ciudades, etc)
- d)-combinación de objetivos del tipo a,b,c.

#### 1.1. MEDIDAS DEL RIESGO SISMICO

Diferentes medidas de daños producidos por terremotos debe ser considerados bajo diferentes circunstancias Las siguientes

dos medidas son las de mayor importancia ya que ellas caracterizan directamente las pérdidas ocasionadas por los terremotos:

1-número de víctimas: (a) número total; (b) número de víctimas que pueden ser prevenidas mediante medidas de seguridad.

2-pérdidas económicas ocasionadas por terremotos: (a) pérdidas totales; (b) pérdidas prevenidas mediante medidas de seguridad

Para aclarar el significado de lo expresado en el párrafo anterior, supongamos que en el transcurso de un periodo de tiempo de estudio ocurre un terremoto y que durante cada terremoto existe la posibilidad de pérdidas. La suma de estas pérdidas es lo que expresa el punto 2a. Parte de estas pueden ser prevenidas; la suma de las pérdidas prevenidas es el punto 2b.

Las siguientes medidas caracterizan indirectamente las pérdidas ocasionadas por los terremotos:

3 - número total de personas presentes en la zona de estudio

4 - valor total de las propiedades presente en dicha zona.

5 - número total de objetivos presentes en la zona.

Si el estudio se basa en objetivos puntuales, se tendrá en cuenta la suma total de objetivos presentes en la zona. En caso de que los objetivos sean lineales o areales, se tendrá en cuenta la suma de los segmentos (autopistas, vías de ferrocarril, etc) o áreas respectivamente.

La probabilidad de pérdida total 1a. 2a es la medida directa del riesgo sísmico. Es necesario conocer también la probabilidad de pérdidas prevenidas 1b, 2b en orden de optimizar las medidas de seguridad. Las características 3-5 dan solamente una medida indirecta del riesgo sísmico (p.ej., el valor total de las

propiedades caracteriza indirectamente las posibles pérdidas). Sin embargo estas características indirectas pueden ser útiles para análisis preliminares.

## 1.2. EJEMPLOS DE APLICACION.

La metodología de esta estimación puede ser mejor descripta con ejemplos concretos. En todos los ejemplos se han usado los conceptos, métodos y suposiciones descriptas en [3,4], junto con el correspondiente software.

### 1.2.1. RIESGO SISMICO PARA LAS GRANDES CIUDADES DEL MUNDO.

En este trabajo, se realizó un análisis del riesgo sísmico para las ciudades con población mayor a un millón de habitantes en regiones sísmicamente activas del mundo, como base para la toma de decisiones. La ocurrencia de terremotos es un problema muy importante a tener en cuenta, puesto que pueden ocasionar pérdidas económicas del orden de los cien billones de dólares, desestabilizando la economía mundial [5].

Las estimaciones están basadas en una regionalización tectónica del mundo y en base a tres modelos:

- 1) - modelo de ocurrencia de sismos.
- 2) - modelo de las isosistas.
- 3) - dinámica poblacional.

Las estimaciones fueron examinadas mediante la comparación con la historia sísmica de las ciudades consideradas, obteniéndose resultados satisfactorios a pesar del hecho que todos los modelos usados son groseramente promediados debido a la

falta de datos. Estos resultados nos muestran que los datos disponibles pueden ser suficientes para estimar el riesgo sísmico para un gran grupo de objetivos, mientras no sea para cada objetivo en forma particular.

Los resultados indican que en los próximos 30 años,  $8 \pm 3.5$  ciudades y  $40 \pm 21$  millones de habitantes de esas ciudades experimentarán fuertes movimientos de intensidad M.M. VIII y mayores.

La segunda estimación es muy alarmante por el gran número de habitantes afectados, esto se debe al alto índice de crecimiento poblacional. Datos más conservadores sobre el crecimiento de la población, reducen esta estimación a no más del 30%. Ello indica que globalmente el riesgo sísmico está incrementándose rápidamente, presentando nuevos e inesperados problemas.

Los resultados parecen ser de interés general indicando el empinado ascenso y la cambiante naturaleza global del riesgo sísmico.

#### 1.2.2. SEGURO PARA CAUCASO.

Este trabajo se realizó para obtener un valor de tasa de seguro por terremoto, para áreas rurales con pequeño, pero significativo daño potencial. Como objetivo se tomaron las viviendas en las villas de Georgia. Para este propósito, se obtuvo la función de distribución de probabilidad del daño total causado a estas viviendas por terremotos sobre un determinado intervalo de tiempo. Tal función de distribución determinó la tasa de seguro [6].

### 1.3. MODELO DE OCURRENCIA DE SISMOS.

El modelo de ocurrencia de sismos, es representado por la función de distribución del valor aleatorio  $N(G, M, T)$  Donde  $N$ , es el número de sismos que pueden suceder en  $T$  años en un rango de magnitud  $M$ , en la región  $G$ . Estas regiones son definidas con la condición, que la función de distribución de  $N$  tenga parámetros comunes en cada región. Por lo tanto, la regionalización sismotectónica es necesariamente un paso preliminar.

Una suposición adicional es que los sismos en cada volumen: (espacio-tiempo-energía), son estadísticamente independientes; por lo tanto el número total de sismos siguen una distribución de Poisson. Para que esta suposición sea válida, es necesario eliminar del catálogo los sismos secundarios (réplicas), pues estos guardan una dependencia del sismo principal que les dio origen.

### 1.4. REGIONALIZACION SISMOTECTONICA.

En una regionalización sismotectónica lo que se trata de conseguir, es la división de la región en áreas aproximadamente homogéneas. "Homogéneas" significa que algunos parámetros que permanecen fijos en la ocurrencia de sismos, pueden ser atribuidos al área.

La determinación de los límites de las regiones homogéneas, está basada en el análisis conjunto de mapas: topográficos, tectónicos, geológicos, distribución de epicentros como así también fotos satelitales.

### 1.5. CATALOGO DE SISMOS

Los catálogos de sismos son la principal fuente estadística de sismos. Aquí, el propósito principal, es la creación de un catálogo amplio, unificado, libre de errores y en el que se conozca su grado de integridad para los distintos períodos de tiempo. El análisis del catálogo utilizado en este estudio es descrito en Capítulo 3.

### 1.6. MODELO DE ISOSISTAS.

El modelo de los movimientos generado por un terremoto, está dado por el valor aleatorio  $J(g_1, g, M)$ . Aquí  $J$ , es la intensidad del movimiento al punto  $g_1$  durante un terremoto con hipocentro en el punto  $g$  y magnitud  $M$ .

El método sugerido se aplica a todas las medidas de intensidad. Sin embargo, en la práctica los autores de [ 7 y 8 ] han tenido hasta ahora, solamente éxito en recolectar suficiente material de terremotos en la escala macrosísmica.

Una suposición adicional, está dada por establecer que con condiciones homogéneas del suelo, las isosistas son elípticas y concéntricas. Sus parámetros (área, elongación, azimut del eje mayor) son valores aleatorios, cuya distribución depende del valor de magnitud y de las coordenadas del epicentro. En promedio el azimut del eje mayor de la elipse coincide con la dirección de la falla principal.

Los parámetros de este modelo han sido determinados mediante el análisis observacional de mapas de isosistas. Para la obtención de los valores de elongación y azimut se han utilizado

datos adicionales como son : isosistas para el periodo preinstrumental; mapas de zonas post-terremoto y datos sobre orientación de ruptura en la fuente.

### 1.7. ESQUEMA DE LA ESTIMACION DEL RIESGO SISMICO.

El riesgo sísmico es estimado sobre la base de todos los factores anteriormente enumerados. La descripción del algoritmo está dado en [9]. Este consiste principalmente en 3 partes:

1 - se construye la imagen del territorio estudiado. Esta incluye toda la información inicial: objetivos, epicentros, parámetros de todos los modelos usados conectados con coordenadas geográficas;

2 - se construye la función de distribución  $F(x)$  para el efecto de un sismo. En la zona de estudio, se efectúa un reticulado, cada una de estas retículas es considerada como un posible epicentro. Para cada combinación (epicentro, magnitud), se consideran todos los valores posibles de parámetros de isosistas (área, azimut, forma). Para cada combinación (epicentro, magnitud, área, azimut y forma de la isosistas) la intensidad del movimiento y el valor del efecto producido a cada punto del objetivo es determinado y con esto el efecto total para todos los puntos del objetivo.

Como resultado, para cada posible combinación (epicentro, magnitud, área, azimut y área de la isosistas), tenemos un par de figuras.  $x$  - el efecto total,  $p$  - su probabilidad. El valor  $p$  es el producto de las probabilidades de cada parámetro en la combinación dada. El juego de pares  $(x,p)$  define la distribución  $F(x)$ .

para un sismo arbitrario:

3 - si conocemos el número general de sismos  $N$  en la totalidad de la zona, una estimación del riesgo sísmico  $F_{\Sigma}(x,T)$  es construida desde la función  $F(x)$ , el número de sismos  $N$  y los parámetros de la dinámica del objetivo en el tiempo. Como resultado tenemos la función de distribución del efecto total de todos los sismos en el intervalo de tiempo  $T$ .