



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



FACULTAD DE INGENIERÍA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

MODELO NEURONAL ARTIFICIAL PARA ESTIMAR
LA ACELERACIÓN MÁXIMA DEL TERRENO PRODUCIDA
POR SISMOS EN EL ESTADO DE OAXACA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERA CIVIL

P R E S E N T A :

IRENE NALLELY MONTERO AGUILAR

TUTOR:

M.I. LEONARDO ALCÁNTARA NOLASCO



2010



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedico este trabajo a mi mamá, hermano y papá por su confianza, apoyo y por ser mi principal motivación para poder lograr este objetivo.

AGRADECIMIENTOS

A mi mamá, hermano y papá, por su cooperación y principalmente por inculcarme responsabilidad y perseverancia, ya que sin estos valores no hubiera sido posible lograrlo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, en especial a la Facultad de Ingeniería, por la formación académica y humana, gracias a la cual me permitió alcanzar una meta muy importante en mi vida.

A los profesores de la Facultad de Ingeniería por proporcionarme las herramientas necesarias con las cuales podre desempeñarme en el ámbito profesional, en particular a todos aquellos que, comparten más tiempo con sus alumnos con el fin de brindar una mejor enseñanza.

Al Instituto de Ingeniería, principalmente:

Al M. en I. Leonardo Alcántara, por las horas de asesoría otorgadas para poder culminar este trabajo y sentirme orgullosa de ello.

Al M. en I. Marco Antonio Macías, por su paciencia, dedicación y confianza brindada, durante este tiempo como becaria.

A las ingenieras Citlali Pérez, Rosario Delgado y Ana Ruiz, a Miguel, Víctor y Alex por su apoyo, sus platicas y sobre todo por permitirme ser parte de su equipo de trabajo en estos años.

A mis tías Nena, Juanita, María, Lucy, Temo y a todos mis primos, por su cariño y por tener siempre palabras de aliento que me impulsaron a seguir adelante.

A mi amigo, compañero y confidente Luis, en este camino nos conocimos y ahora juntos vamos a lograr terminar de recorrerlo, gracias por todo tu apoyo y cariño.

A mis amigos Ari, Carlo, Cabrerita, Güeris y Pau, años de conocernos y compartir momentos que sin lugar a dudas marcaron y seguirán marcando mi vida, gracias por formar parte de ella.

A Faby, Sandra y Rubí, les agradezco las horas de estudio en el anexo, pero aun más valoro haberme brindado su amistad.

| | PÁGINA |
|--|--------|
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| OBJETIVO | 6 |
| CONTENIDO | 6 |
| I. SISMICIDAD EN EL ESTADO DE OAXACA | 7 |
| I.1 MARCO TECTÓNICO | 8 |
| I.2 HISTORIA SÍSMICA | 11 |
| II. RED DE ACELERÓGRAFOS EN EL ESTADO DE OAXACA | 17 |
| II.1 SISMÓGRAFOS Y ACELERÓGRAFOS | 18 |
| II.2 RED ACELEROGRÁFICA | 23 |
| II.3 SISMOS REGISTRADOS | 29 |
| III. REDES NEURONALES Y SU APLICACIÓN EN LA INGENIERÍA SÍSMICA | 32 |
| III.1 CONCEPTOS GENERALES | 33 |
| III.2 APLICACIONES EN INGENIERÍA SÍSMICA | 41 |
| IV. ESTIMACIÓN DE LA ACELERACIÓN MÁXIMA UTILIZANDO EL MODELO NEURONAL ARTIFICIAL | 44 |
| IV.1 DEFINICIÓN DE PARÁMETROS | 45 |
| IV.2 SELECCIÓN DE LA BASE DE DATOS SÍSMICOS | 47 |
| IV.3 PROCESO DE ENTRENAMIENTO Y PRUEBA | 50 |
| IV.4 RESULTADOS | 56 |
| V. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS | 60 |
| CONCLUSIONES | 61 |
| COMENTARIOS | 62 |

| | |
|-------------------|----|
| ANEXO | 63 |
| FALLAS GEOLÓGICAS | 64 |
| INTENSIDAD | 66 |
| MAGNITUD | 69 |
| ONDAS SÍSMICAS | 72 |
| REFERENCIAS | 75 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | | PÁGINA |
|--------------|--|--------|
| Figura 1 | Placas tectónicas sobre la Tierra | 3 |
| Figura I.1 | Placas tectónicas en la República Mexicana | 9 |
| Figura I.2 | Mapa tectónico del estado de Oaxaca | 10 |
| Figura I.3 | Fallas en el estado de Oaxaca | 11 |
| Figura I.4 | Zonas sísmicas en el estado de Oaxaca | 15 |
| Figura II.1 | Esquema de un sismógrafo | 19 |
| Figura II.2 | Sismógrafo | 20 |
| Figura II.3 | Acelerógrafo digital modelo <i>Etna</i> | 22 |
| Figura II.4 | Estación acelerográfica | 23 |
| Figura II.5 | Ubicación estaciones RAO | 27 |
| Figura II.6 | Ubicación estaciones RACO | 29 |
| Figura III.1 | Neurona biológica | 34 |
| Figura III.2 | Comparación entre neuronas biológicas y artificiales | 35 |
| Figura III.3 | Capas de una RNA | 36 |
| Figura III.4 | Arquitectura Perceptron Multicapa | 37 |
| Figura III.5 | Función de transferencia escalón | 38 |
| Figura III.6 | Función de transferencia gaussiana | 38 |
| Figura III.7 | Función de transferencia sigmoideal | 39 |
| Figura III.8 | Función de transferencia lineal | 39 |
| Figura III.9 | Mínimos locales y global | 41 |

| | | |
|-------------|--|----|
| Figura IV.1 | Distancia Epicentral | 46 |
| Figura IV.2 | Azimut | 46 |
| Figura IV.3 | Estaciones de estudio | 47 |
| Figura IV.4 | Resultados de las tres estaciones | 58 |
| Figura IV.5 | Resultados de las tres estaciones con sus tres componentes | 59 |
| | | |
| Figura A.1 | Falla Normal | 64 |
| Figura A.2 | Falla Inversa | 65 |
| Figura A.3 | Falla Transcurrente | 65 |
| Figura A.4 | Esquema ondas P y ondas S | 73 |
| Figura A.5 | Esquema onda Love y onda Rayleigh | 74 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | | PÁGINA |
|------------|--|--------|
| Tabla I.1 | Sismos representativos Oaxaca | 16 |
| Tabla II.1 | Red Regional del ITO | 24 |
| Tabla II.2 | Red Sísmica CFE | 25 |
| Tabla II.3 | Red Sísmica Instituto de Geofísica | 26 |
| Tabla II.4 | Red Acelerográfica de la ciudad de Oaxaca | 27 |
| Tabla II.5 | Red Acelerográfica de la costa de Oaxaca | 28 |
| Tabla II.6 | Sismos registrados en las estaciones LANE, RIOG, SCRUI | 30 |
| Tabla IV.1 | Sismos utilizados para la estación LANE | 48 |
| Tabla IV.2 | Sismos utilizados para la estación RIOG | 49 |
| Tabla IV.3 | Sismos utilizados para la estación SCRUI | 50 |
| Tabla IV.4 | Relación de eventos sísmicos utilizados en el modelo | 51 |
| Tabla IV.5 | Grupo de entrenamiento y prueba estación LANE | 52 |
| Tabla IV.6 | Grupo de entrenamiento y prueba estación RIOG | 53 |
| Tabla IV.7 | Grupo de entrenamiento y prueba estación SCRUI | 54 |
| Tabla IV.8 | Sismos obtenidos mediante leyes de atenuación | 55 |
| Tabla IV.9 | Arreglos empleadas en el modelo | 56 |
| Tabla A.1 | Escala de Intensidades de Mercalli Modificada | 67 |

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

Un elevado porcentaje de las víctimas cobradas por los temblores, se debe al derrumbe de construcciones hechas por el hombre. Este fenómeno natural se ha transformado en una amenaza a medida que las áreas urbanas han crecido y han incrementado el número de habitantes. Sólo para tener una idea, de las pérdidas que ocasionan los sismos, se presentan los siguientes datos:

- 19 de Septiembre de 1985 Michoacán, México. Temblor cuya magnitud $M_w=8$ ocasionó la muerte de 10,000 personas y se destinaron cerca de 900 millones de dólares para la reconstrucción de las zonas afectadas (ref 1).
- 17 de Enero de 1994 Los Ángeles California, EUA, con magnitud $M_w= 6.6$ se presentó un terremoto que provocó un total de 60 muertes y pérdidas materiales por 44,000 millones de dólares (ref 2).
- 12 de Enero de 2010 Puerto Príncipe, Haití se presenta un sismo que alcanzó una magnitud de momento $M_w=7$ dejó más de 200,000 muertos; se estiman en más de 8,000 millones de dólares, las pérdidas materiales, según las autoridades haitianas (ref 3).
- 27 de Febrero de 2010 Cobquecura, Chile, con una $M_w=8.8$ dejó cerca de 340 muertos y pérdidas materiales por cerca de 29,700 millones de dólares (ref 4)

Las magnitudes de los eventos sísmicos antes indicados se obtuvieron del catálogo global CMT (ref 5).

Para explicar el origen de los temblores, se toma como base la teoría de la tectónica de placas, la cual postula que la litosfera, capa rígida superficial de la Tierra, no es continua, por el contrario se encuentra dividida formando bloques que reciben el nombre de Placas Tectónicas, cuyos espesores van desde 15 hasta 50 km (ref 6) aproximadamente, todas ellas flotantes sobre un manto caliente y viscoso llamado astenosfera, se desplazan en varias direcciones con velocidades del orden de uno a cinco centímetros al año (ref 7). El mecanismo básico causante de este movimiento son las corrientes de convección, esto es, el material caliente del interior de la Tierra sube a la superficie liberando calor interno, mientras que el frío baja. Como podemos ver en la figura 1 las placas no están delimitadas por los continentes, ya que en una sola de ellas, se encuentran parcialmente tanto bloques de tierra, como áreas oceánicas.



Figura 1 Placas tectónicas sobre la Tierra (ref 8)

En los límites donde las placas hacen contacto, se generan fuerzas de fricción que impiden el desplazamiento de una con respecto a la otra, lo que ocasiona la acumulación de energía del tipo elástico, ya que si cesaran las fuerzas sobre el material (rocas), también lo harían las deformaciones. Cuando los esfuerzos superan la resistencia de la roca, o se vencen las fuerzas de fricción, se produce una ruptura violenta dando lugar a la liberación de la energía acumulada, en forma de ondas llamadas sísmicas, de esta manera se generan la mayor parte de temblores en nuestro planeta, aunque también existen otras formas de fuentes sísmicas como son las de colapso (derrumbes), explosivas (explosiones químicas, nucleares), volcánicas (asociadas a la actividad volcánica) o de impacto (meteoritos).

Los límites entre placas se clasifican en tres diferentes tipos (ref 9):

Divergentes: se presentan donde se separan unas de otras, por lo que el vacío que resulta de esta separación es ocupado por magma que emerge desde el fondo del manto terrestre, ocasionando empujes laterales sobre sí mismas.

Convergentes o de subducción: los límites son convergentes cuando dos placas continentales chocan entre sí, formando extensas cordilleras, la cadena del Himalaya es el resultado de la colisión entre la Indoaustraliana y la Euroasiática; por otra parte cuando dos placas oceánicas chocan dan origen a un arco de islas, un ejemplo de ello es Japón. Por el contrario los límites de subducción se presentan donde una placa oceánica (más densa) se introduce debajo de una placa continental (menos densa), en la superficie la modificación topográfica consiste en una fosa oceánica en el agua y un grupo de montañas en la tierra, por ejemplo la de Cocos penetra bajo la de Norteamérica en la costa occidental de México.

Transformación o transcurrentes: ocurre donde dos placas se mueven entre sí con la misma dirección pero con sentidos diferentes, como la falla de San Andrés ubicada en el Oeste de Norteamérica producto del roce entre la Norteamericana y la del Pacífico.

El impacto social y económico que representa un sismo es de los más altos entre los desastres que ocurren a nivel mundial, mediante el estudio de su origen, comportamiento y consecuencias generadas es posible tomar medidas de

prevención como la creación o modificaciones de reglamentos de construcción, diseño de edificaciones, etc. Es indispensable conocer los parámetros que describen su comportamiento como lo son el desplazamiento, la velocidad, la aceleración y la energía liberada, todos ellos en función del tiempo, los cuales se obtienen a partir del procesamiento de acelerogramas y sismogramas generados en las estaciones de registro, con el objeto de realizar un estudio de las características de un sismo.

En este trabajo se presenta una alternativa, mediante el uso de Redes Neuronales Artificiales, para poder estimar la aceleración del terreno en el estado de Oaxaca, el cual se encuentra en una zona sísmica del sureste de la República Mexicana, en la cual subducen las placas de Cocos y Rivera bajo la Norteamericana, de hecho en dicha región han tenido lugar los sismos que más han impactado a México (ref 10).

Para tener una idea clara acerca del término aceleración del terreno, el cual es el principal interés de este trabajo, se sabe que, cuando la aceleración producida por un sismo es alta, la fuerza adicional que se provoca en una edificación, también lo será, tal como se especifica en la segunda ley de Newton, donde la fuerza ejercida sobre un objeto es proporcional al producto de su masa y la aceleración a la que se ve sometido. La aceleración provocada por el sismo en el terreno es registrada en tres componentes, dos horizontales (norte-sur y este-oeste) y una vertical; siendo las tres ortogonales entre sí.

Una estimación confiable de dicho parámetro es muy útil para proyectar y, construir estructuras capaces de resistir las acciones sísmicas que se producirían en la zona en donde se llevará a cabo su construcción. Por lo que es importante considerar lo siguiente:

- Establecer las áreas en las que se estime más probable la ocurrencia de un sismo importante a corto plazo.
- Seleccionar los parámetros que resulten más confiables para representar el fenómeno.
- Contar con los medios adecuados para medirlos sistemáticamente durante periodos considerables.

OBJETIVO:

Desarrollo de un modelo neuronal artificial que permita estimar la aceleración máxima, producida por un sismo, en tres sitios ubicados en la costa del estado de Oaxaca.

CONTENIDO:

El primer capítulo presenta el marco tectónico de la República Mexicana así como del estado de Oaxaca, también se exponen treinta sismos representativos de las ocho zonas sísmicas del mismo estado con eventos desde el año de 1727 hasta 2008 y que superan o igualan la magnitud de 6.5. En el capítulo dos se explica el funcionamiento de los sismógrafos y acelerógrafos, así mismo se realiza una breve descripción de la instrumentación sísmica con la que cuenta el estado de Oaxaca y se presentan los sismos registrados por las estaciones con las que se realizó el modelo de redes neuronales. Los fundamentos, componentes y operación de las Redes Neuronales Artificiales son expuestos en el tercer capítulo, donde también se describen algunas aplicaciones de este método en la Ingeniería Civil y particularmente en la Ingeniería Sísmica. Los parámetros que definen mejor el comportamiento de la aceleración máxima del terreno se detallan en el capítulo cuarto, además se especifican los registros con los que se llevó a cabo el entrenamiento y prueba del modelo, al final de este capítulo se presentan los resultados. En el quinto capítulo se presentan tanto las conclusiones como los comentarios de esta tesis, se cuenta también con un anexo, donde se resumen algunos conceptos básicos de sismicidad y por último se detallan las referencias utilizadas en el desarrollo de este trabajo.

I. Sismicidad en el estado de Oaxaca

I. SISMICIDAD EN EL ESTADO DE OAXACA

I.1 MARCO TECTÓNICO

México se ubica entre cinco placas tectónicas: Pacífico, Caribe, Cocos, Rivera y Norteamericana (fig I.1). En esta última se encuentra la mayor parte del territorio mexicano, los Estados Unidos de Norteamérica, Canadá, parte del océano Atlántico y parte de Asia; en la placa del Pacífico se localiza la península de Baja California, gran parte del océano Pacífico y California; la placa del Caribe alberga parte del sur de Chiapas, las islas Caribeñas y los países de Centroamérica. Las placas de Cocos y Rivera son oceánicas y se encuentran debajo del océano Pacífico.

La actividad sísmica en la República Mexicana se debe particularmente, a los desplazamientos entre las placas de Cocos, Rivera, del Pacífico y de Norteamérica, la interacción de estas dos últimas originan la actividad sísmica que se manifiesta en la parte norte de la Península de Baja California, en tanto que la subducción de la placa de Cocos y Rivera bajo la placa Norteamérica, origina la actividad sísmica en el Sureste de México, esta área de contacto comprende toda la costa del Pacífico desde el estado de Jalisco hasta el de Chiapas.



Figura I.1 Placas tectónicas en la República Mexicana

A su vez el estado de Oaxaca está dividido en las siguientes unidades tectónicas (fig I.2):

- A. Cuenca sedimentaria de Tlaxiaco
- B. Cuenca de Tehuantepec
- C. Batolito de Chiapas
- D. Cuenca de Papaloapam
- E. Cuencas Terciarias
- F. Península de Oaxaca
- G. Sierra Madre del Sur



Figura I.2 Mapa tectónico del estado de Oaxaca (ref 11)

En las unidades tectónicas se localizan fallas, que son discontinuidades formadas a partir de fracturas en rocas superficiales de la Tierra, ocasionadas cuando las fuerzas tectónicas rebasan la resistencia de las rocas. En Oaxaca los terrenos Maya, Cuicateco, Zapoteco, Mixteco y Chatino (fig I.3), están definidos por las fallas de mayor consideración en el estado las cuales son:

- Cabalgadura de Vista Hermosa, limita parte de los terrenos Maya y Cuicateco
- Falla Oaxaca, limita a los terrenos de Cuicateco y Zapoteco. Se extiende desde los límites con el estado de Puebla hasta la parte norte de la Ciudad de Oaxaca, es de tipo normal, (ver ANEXO), de la misma forma que las siguientes.
- Falla de Tamazulapan, su extensión abarca desde la parte norte del estado hasta la falla Juchatengo.
- Falla Juchatengo, se extiende desde los límites con el estado de Guerrero hasta la falla Chacalapa.
- Falla Chacalapa, continuación de la falla Juchatengo, extendiéndose hasta la región del Istmo de Tehuantepec.

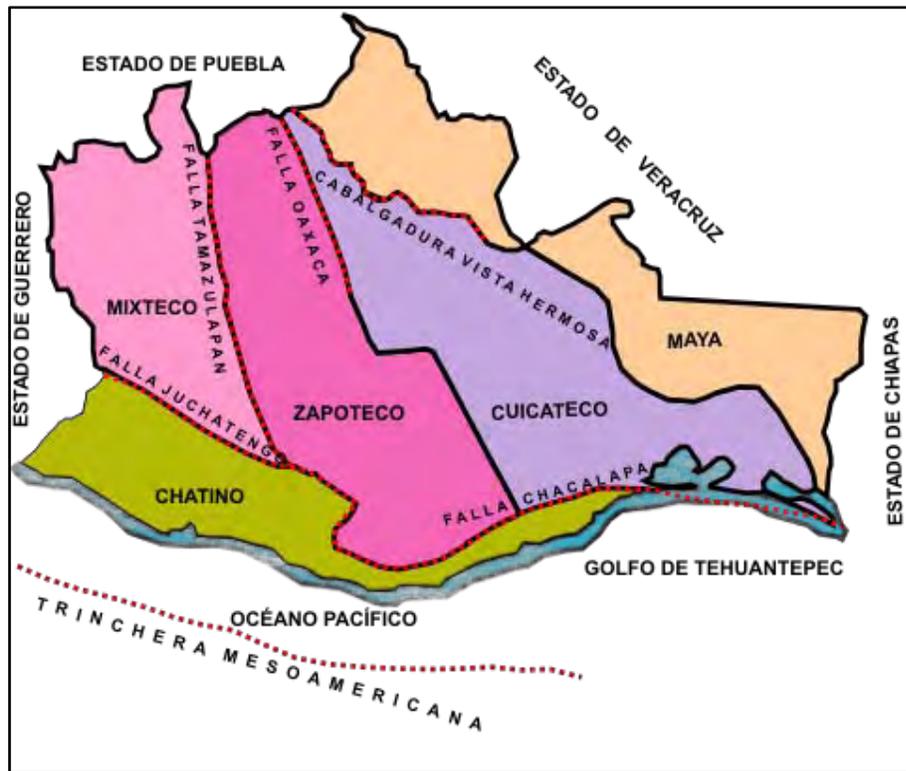


Figura I.3 Fallas en el estado de Oaxaca (ref 12)

1.2 HISTORIA SÍSMICA

El tamaño de un sismo es función de la región que sufre resquebrajamiento, entre mayor sea el área que se rompe por la acción de las fuerzas tectónicas, mayor es el tamaño del temblor. Dado que el área máxima de contacto entre placas se encuentra en las zonas de subducción, es aquí donde se originan los sismos más fuertes.

Los eventos sísmicos con mayor impacto que se han registrado en México, han tenido su origen a lo largo de la costa del Pacífico, en la zona de subducción de la placa de Cocos y de Rivera bajo la placa Norteamericana. En esta zona el ángulo de buzamiento de la placa de Cocos es aproximadamente de 14° , la velocidad relativa con respecto a la de Norteamérica es de 6.4 cm/año y su zona de contacto se encuentra a 16 km de profundidad a lo largo de una franja de 80 km (ref 13). El

estado de Oaxaca se ubica en una zona de alta sismicidad para México, donde la actividad sísmica se clasifica en tres diferentes tipos (ref 14):

- a) Actividad sísmica superficial. Es generada en la zona de subducción de las placas citadas previamente, en una franja aproximada de 80 km a todo lo largo de la costa, en donde la velocidad de penetración de la placa de Cocos es de 7.8 cm por año. Los eventos generados tienen un mecanismo focal de falla inversa, epicentro en la costa y su profundidad promedio es de 16 km. Algunos de los sismos más importantes que han ocurrido son Huatulco 1965 (M=7.8), Pinotepa 1968 (M=7.4), Pochutla 1978 (M=7.8), Ometepec 1982 (M=7), Ometepec 1995 (M=7), Puerto Escondido 1999 (M= 7.4).
- b) Actividad sísmica intermedia. Es debida a un proceso gravitacional asociado con la ruptura de la placa de Cocos con epicentros al sur de la ciudad de Oaxaca y que genera eventos a profundidades entre 25 y 40 km. Estos sismos han alcanzado magnitudes considerables como los del 15 de enero de 1931 (M=7.8) y del 30 de septiembre de 1999 (M=7.5).
- c) Actividad sísmica profunda. Es ocasionada por un proceso gravitacional conocido como mecanismo de falla normal, tienen lugar en la placa subducente con epicentros en el interior del continente al norte de la ciudad de Oaxaca y a una profundidad de 65 a 115 km. Algunos de los eventos ocurridos en esta zona son: 10 de febrero de 1928 (M=6.7), 26 de julio de 1937 (M=7.3), 11 de octubre de 1945 (M=6.5), 25 de mayo de 1959 (M=6.8), 28 de agosto de 1973 (M=7.3), 24 de octubre de 1980 (M=7.1) y 15 de junio de 1999 (M=7).

El estado de Oaxaca a su vez se ha dividido en ocho zonas sísmicas (ref 15), que se aprecian en la figura I.4

- 1) Zona Mixteca Media, en esta zona los temblores afectan a los estados de Guerrero y Oaxaca, sintiéndose con menor intensidad en la costa y Huajuapán de León, el valle central de Oaxaca y las zonas de Tlapa y Chilapa en Guerrero. En algunos casos presentan intensidades más fuertes al oeste de la zona como se observó durante el sismo de 1894 que causó graves daños en la ciudad de

Oaxaca, Silacayoapan e Ixapantepec. En otras ocasiones se han generado intensidades más fuertes al este, por ejemplo el temblor de 1854 ($M=7.7$) que afectó principalmente la Mixteca, Cañada y Valle en especial las poblaciones de Jamiltepec, Juquila, Huaxolotitlán, Amatenango, Tlaxiaco y Juxtlahuaca, también fue sentido en la ciudad de México.

- 2) Zona Huajuapán, los temblores de esta zona afectan primordialmente el sur del estado de Puebla, el noroeste del estado de Oaxaca y el noreste del estado de Guerrero. Esta zona se caracteriza porque en relación con el epicentro la intensidad es más fuerte en la dirección sur que en la dirección norte. Dentro de esta zona se destacan dos temblores el del 19 de julio de 1882 sentido en gran parte del país y el sismo del 24 de octubre de 1980 ($M=7$) debido a un mecanismo de falla normal y con una profundidad de 65 km, se sintió en las ciudades de Oaxaca, Huajuapán de León, Tamazulapán e Ixtlahuaca.
- 3) Zona Norte y Cañada, se caracteriza porque los sismos en relación con su epicentro son más intensos hacia el norte que hacia el sur, afectando principalmente las ciudades de Tehuacán, Orizaba, Córdoba, Veracruz y Puebla. Esta zona es la más extensa y bordea el Eje Volcánico Mexicano, como ejemplos se pueden citar 1928 ($M=7.7$), 1937 ($M=7.6$), 1945 ($M=6.5$) y 1973 ($M=6.8$), todos ellos tuvieron un mecanismo de falla normal y profundidades que oscilaron entre los 82 y 95 km.
- 4) Zona Istmo, es un área comprendida dentro del estado de Oaxaca y limitada al este por el Istmo de Tehuantepec y al oeste por las zonas 5, 6 y 7. Existen tan sólo cinco eventos reportados en los últimos 200 años, dentro de los que destaca el del 27 de agosto de 1911 ($M=6.7$) que fue sentido en el Istmo y alcanzó el grado VI en la escala de intensidades de Mercalli Modificada.
- 5) Zona Mixe, los temblores de esta zona han causado destrucción importante en la ciudad de Oaxaca y el área Mixe. Un evento característico de esta es el del 17 de abril de 1928 ($M=7.7$), que presentó un mecanismo de falla normal, una

profundidad de 115 km y fue sentido en la ciudad de Oaxaca causando graves daños en Villa Alta, Oaxaca.

- 6) Zona Valle, los sismos en esta zona han producido daños en la ciudad de Oaxaca y en la parte sur del Valle de Oaxaca. El temblor del 15 de enero de 1931 ($M=7.8$) ocurrió en esta zona, presentó un mecanismo focal de falla normal y una profundidad de 25 km, causó grandes daños en todo el valle y el poblado de Mihuatlán resultó gravemente dañado.

- 7) Zona Puerto Escondido-Huatulco, los sismos generados en esta zona han afectado localidades de Puerto Escondido, Pochutla, Puerto Angel, Huatulco y Loxicha. Un temblor característico de esta zona fue el del 10 de marzo de 1727 que dejó a la ciudad de Oaxaca en ruinas, ocho días después ocurrió otro reportado como más fuerte que el anterior. Posteriormente con el evento de 1870 ($M=7.9$) Miahuatlán y Pochutla quedaron en ruinas, se formaron grandes grietas en los campos y hubo derrumbes en los cerros reportándose además un fuerte calentamiento del suelo, este sismo fue sentido muy fuerte en Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Con relación al sismo del 22 de marzo de 1928 ($M=7.7$) se reportaron ruidos subterráneos en Tehuantepec e invasiones del mar en Puerto Ángel. Por otra parte, el 17 de junio del mismo año se presentó un sismo ($M=8$) que produjo un tsunami ocasionando fuertes daños en Chacahua, Huatulco, Pochutla y Puerto Ángel.

- 8) Zona Pinotepa Nacional-Jamiltepec, las áreas más afectadas por temblores son: Chacahua, Jamiltepec, Pinotepa Nacional y Ometepec. En esta zona es importante mencionar el temblor de San Sixto (28 de marzo 1787) que por los reportes de daños y el área afectada se infiere que tuvo una magnitud superior a 8. Siendo el más grande de todos los sucedidos en la región en los últimos 400 años, este gran terremoto fue seguido de 141 años de ausencia de sismicidad de gran magnitud en la zona.

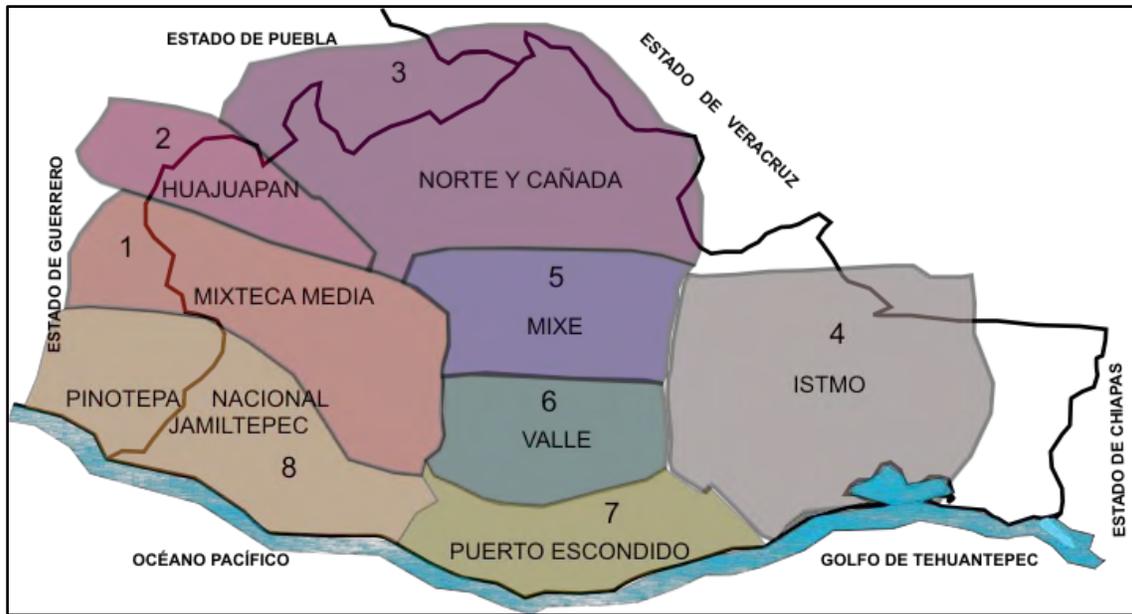


Figura I.4 Zonas sísmicas en el estado de Oaxaca (ref 16)

En la tabla I.1 se presenta un compendio de 30 sismos representativos de las ocho zonas sísmicas del estado de Oaxaca, esta recopilación incluye eventos desde 1727 hasta 2008 cuya $M \geq 6.5$. Los parámetros que la integran son: fecha, hora, zona sísmica, intensidad, magnitud y coordenadas epicentrales. La intensidad es la correspondiente a la escala de Mercalli Modificada (ver ANEXO), en cuanto a la magnitud, la abreviatura mb significa la magnitud basada en ondas de cuerpo y Ms es la magnitud de ondas superficiales (ver ANEXO). Los superíndices al final de las fechas indican la fuente de donde están publicados los parámetros de dichos sismos.

Tabla I.1 Sismos representativos Oaxaca

| FECHA | HORA | ZONA | INT (MM) | MAG | EPICENTRO | |
|--------------------------|----------|------|-----------|----------------------------------|-----------|---------|
| | | | | | LAT. N | LONG. O |
| 10 Mar 1727 ¹ | | 7 | IX | 7.5 ≥ Ms ≤ 8.0 7.0 ≥ mb ≤ 8.0 | | |
| 18 Mar 1727 ¹ | | 7 | VIII | 7.5 ≥ Ms ≤ 8.0 7.0 ≥ mb ≤ 8.0 | | |
| 28 Mar 1787 ¹ | 11:30 | 8 | IX | Ms > 8.0 mb > 8.0 | | |
| 05 May 1854 ¹ | 09:15 | 1 | VIII | M = 7.7 | | |
| 03 Oct 1864 ² | 02:00 | 3 | VII | M = 7.3 | 18.7 | 97.4 |
| 11 May 1870 ¹ | 23:30 | 7 | X | M = 7.9 | | |
| 27 Mar 1872 ¹ | 07:52 | 7 | VIII | 7.5 ≥ Ms ≤ 8.0 7.0 ≥ mb ≤ 8.0 | | |
| 19 Jul 1882 ¹ | 14:20 | 2 | VII | 7.5 ≥ Ms ≤ 8.0 7.0 ≥ mb ≤ 8.0 | | |
| 02 Nov 1894 ¹ | 18:35 | 1 | VI | 7.0 ≥ Ms ≤ 7.5 6.5 ≥ mb ≤ 7.0 | | |
| 27 Ago 1911 ³ | 10:59:18 | 4 | VI | M = 6.7 | 16.77 | 95.9 |
| 10 Feb 1928 ² | 04:38:32 | 3 | VII | M = 6.5 | 18.26 | 97.99 |
| 22 Mar 1928 ¹ | 04:18 | 7 | VI | M = 7.7 | | |
| 17 Abr 1928 ¹ | 03:25:25 | 5 | VIII | M = 7.7 | | |
| 17 Jun 1928 ¹ | 03:20 | 7 | VII | M = 8 | | |
| 04 Ago 1928 ³ | 18:27 | 8 | VI | M = 7.4 | 16.4 | 97.8 |
| 15 Ene 1931 ² | 01:51 | 6 | VIII- VII | M = 7.8 | 16.34 | 96.87 |
| 26 Jul 1937 ² | 03:47:04 | 3 | | M = 7.3 | 18.48 | 96.08 |
| 02 Ene 1938 ¹ | 22:28 | 1 | | M = 6.5 | | |
| 11 Oct 1945 ² | 16:52:56 | 3 | | M = 6.5 | 18.32 | 97.65 |
| 24 May 1959 ² | 19:17:37 | 1 | | M = 6.8 | 17.72 | 97.72 |
| 28 Ago 1973 ¹ | 09:50:40 | 3 | VII | M = 7.1 | 18.3 | 96.53 |
| 24 Oct 1980 ² | 14:53:32 | 2 | VI | M = 7 | 18.03 | 98.27 |
| 07 Jun 1982 ⁴ | 06:52:33 | 8 | | M = 6.9 | 16.42 | 98.25 |
| 24 Ene 1983 ⁴ | 08:17:40 | 4 | | M = 6.8 | 16.17 | 95.21 |
| 24 Oct 1993 ⁴ | 07:52:19 | 8 | | M = 6.6 | 16.17 | 98.77 |
| 14 Sep 1995 ⁴ | 14:04:33 | 8 | | M = 7.3 | 16.75 | 98.67 |
| 25 Feb 1996 ⁴ | 03:08:19 | 8 | | M = 7.1 | 15.88 | 97.98 |
| 19 Jul 1997 ⁴ | 14:22:09 | 8 | | M = 6.7 | 15.86 | 98.26 |
| 15 Jun 1999 ⁴ | 20:42:04 | 3 | | M = 6.7 | 18.13 | 97.54 |
| 30 Sep 1999 ⁴ | 16:31:13 | 7 | | M = 7.4 | 16.03 | 97 |
| 16 Ene 2002 ⁵ | 23:09:55 | | | mb=5.8 | 15.43 | 93.55 |
| 12 Feb 2008 ⁵ | 12:50:18 | | | M = 6.6 | 16.19 | 94.54 |

Superíndices:

1 = ref 17 4 = ref 20
 2 = ref 18 5 = ref 21
 3 = ref 19

II. RED DE ACELERÓGRAFOS EN EL ESTADO DE OAXACA

II. RED DE ACELERÓGRAFOS EN EL ESTADO DE OAXACA

II.1 SISMÓGRAFOS Y ACELERÓGRAFOS

Para poder estudiar la actividad sísmica es necesario contar con registros instrumentales de los temblores, con el fin de precisar su magnitud, localización epicentral, profundidad, la duración de la fase intensa del movimiento, tanto en el suelo como en las estructuras. Los instrumentos que se emplean principalmente para poder realizar estas tareas son los sismógrafos y los acelerógrafos, que registran el movimiento del terreno al paso de las ondas sísmicas (ver ANEXO).

a) Sismógrafo

Es un instrumento de alta sensibilidad, capaz de registrar los movimientos de la superficie de la Tierra, en función del tiempo, dichos movimientos son causados por el paso de las ondas sísmicas. Opera con el principio de inercia, el cual señala que los objetos estacionarios se mantienen sin movimiento a menos que se les aplique una fuerza. Su mecanismo de funcionamiento consiste en una masa suspendida de un

resorte ligado a un soporte anclado al suelo (fig II.1), cuando este es sacudido por el paso de las ondas sísmicas, la inercia de la masa hace que esta permanezca un instante en el mismo reposo, y cuando sale de este tiende a oscilar. El desplazamiento relativo entre la masa y la base proporciona una medida del movimiento asociado a la tierra. El registro se realiza en dos componentes horizontales y uno vertical; en el caso de la figura II.1 el movimiento sentido es en dirección vertical. El sistema de registro está integrado por un tambor en la base y un marcador sujeto a la masa, mediante el cual se generan los sismogramas, es decir los registros sísmicos del movimiento relativo entre la masa y la base, los cuales representan el movimiento del suelo.

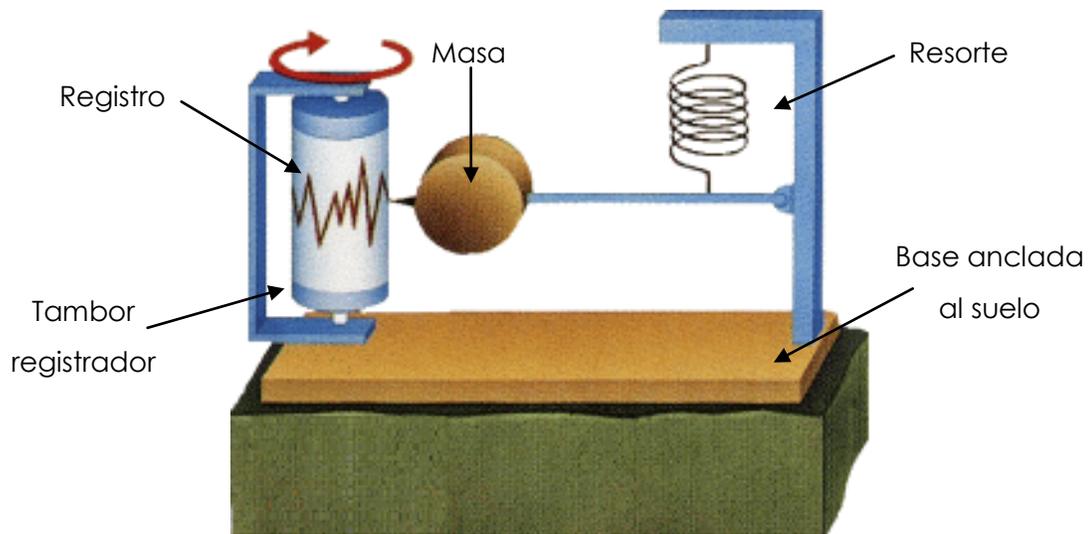


Figura II.1 Esquema de un sismógrafo (ref 22)

En la actualidad los sismógrafos son eléctricos y de banda ancha (fig II.2). La mayoría utiliza el sistema de fuerza de retroalimentación, mediante el cual se ejerce una fuerza proporcional al desplazamiento de la masa inercial para cancelar el movimiento relativo. Un transductor eléctrico convierte el movimiento de la masa en una señal eléctrica, la cual es una estimulación de la fuerza de retroalimentación que debe ejercer para anular el movimiento del péndulo (ref 23).



Figura II.2 Sismógrafo

Los sismógrafos cuya utilidad se enfoca a estudios de sismos, son diseñados para ser sumamente sensibles a los movimientos de la tierra, ya que tienen la capacidad de ampliar diez o hasta cientos de miles de veces la velocidad del movimiento del terreno, ya sea a causa de un sismo cercano y pequeño o de uno grande y lejano. Sin embargo cuando a corta distancia ocurre un sismo muy fuerte, el sismógrafo no es capaz de obtener un registro completo, ya que debido a su gran sensibilidad puede llegar a generar un sismograma en el cual se corten los valores de amplitud del movimiento, cuando esto ocurre suelo decirse que el registro está “saturado”. Para evitar esta problemática, se utilizan los instrumentos conocidos como acelerógrafos.

b) Acelerógrafo

En la Ingeniería Sísmica es importante medir las fuerzas que actúan sobre suelos y estructuras (cimentación, pisos intermedios y azotea) durante un temblor. Para lo cual son utilizados los acelerógrafos que miden la aceleración que actúa sobre ellos, generalmente son capaces de registrar valores mayores a la gravedad terrestre. Los acelerógrafos funcionan bajo el mismo principio que los sismógrafos (ver fig II.1), una diferencia importante es que manteniendo la masa constante, la rigidez del resorte es mayor en un acelerógrafo, ya que es menos sensible que un sismógrafo.

En general los acelerógrafos muestrean continuamente el movimiento sísmico y la señal analógica adquirida por los sensores es convertida a muestras digitales y mediante un algoritmo especial de activación se verifica muestra a muestra si esta se satisface. Cuando el movimiento del suelo rebasa el umbral programado, el equipo comienza a almacenar la información digital ya sea en memoria RAM o en dispositivos tipo *flash*. Los instrumentos cuentan con un retardo digital fijo o programable que permite registrar parte de la señal previa al punto de activación, conocida como memoria de pre evento. Actualmente los acelerógrafos son de tipo digital, facilitando el procesamiento de la información mediante el uso de computadoras. En la figura 11.3 se presenta el esquema de un acelerógrafo digital modelo ETNA. El equipo es autónomo, de alta resolución y de bajo consumo de corriente; opera con celdas solares y baterías en flotación. Está integrado por un adquirente de datos, un transductor y sensores; estos últimos son del tipo Episensor o de fuerzas balanceadas y cuyo arreglo triaxial permite registrar el movimiento sísmico en tres direcciones ortogonales. Los principales componentes de un acelerógrafo son:

- Los sensores
- El conversor analógico-digital
- El sistema de almacenamiento de datos

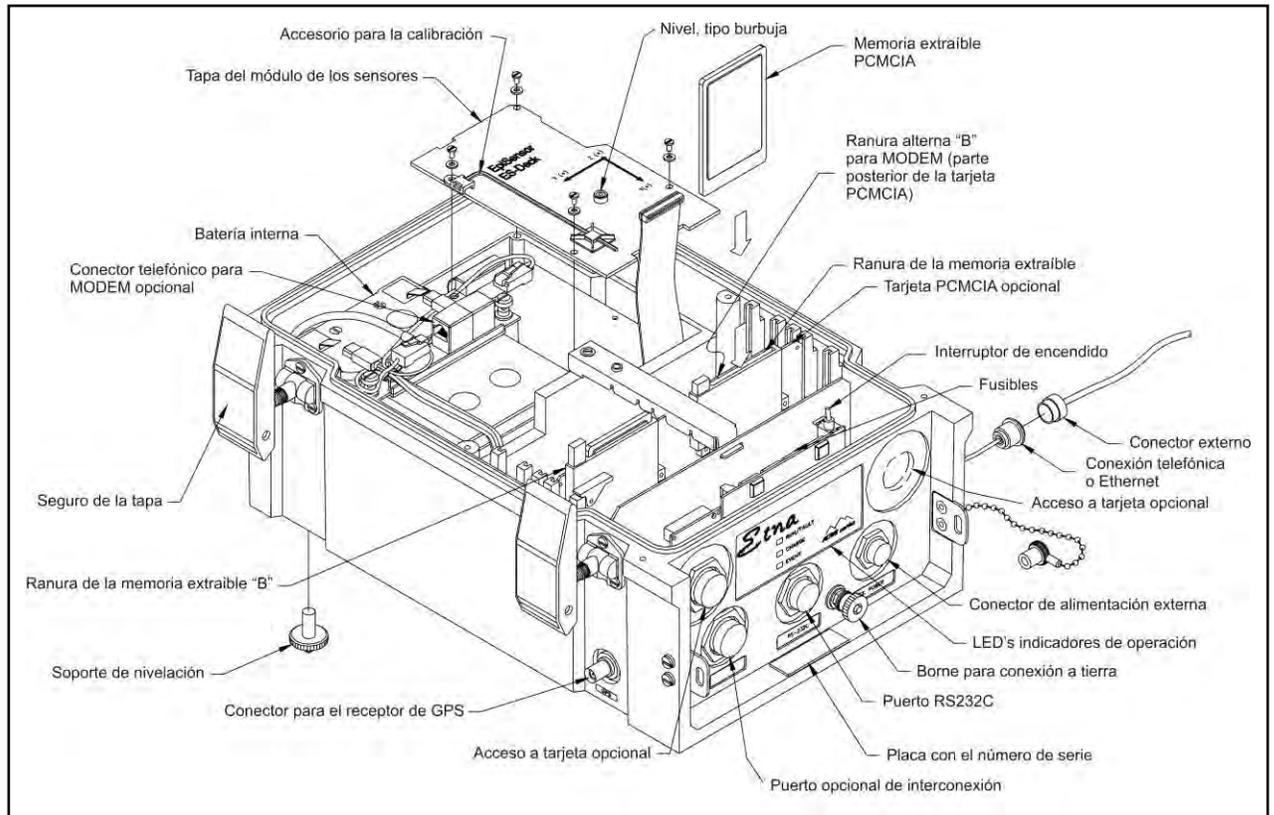


Figura II.3 Acelerógrafo digital modelo *Etna* (ref 24)

Las estaciones acelerográficas, en general, están integradas por una caja metálica empotrada en una base de concreto armado y de una torre metálica como la ilustrada en la figura II.4. La caja metálica funciona como sistema de protección contra la intemperie y el vandalismo, en su interior se cuenta con dos compartimientos, uno con espacio suficiente para albergar el acelerógrafo y otro para resguardar las baterías, el regulador de voltaje y el cableado propio de la instrumentación. En la torre se instala el sistema de posicionamiento global (GPS) para sincronizar la señal de tiempo del equipo, así como las celdas solares que se utilizan para cargar las baterías que alimentan al acelerógrafo; ambos se conectan al equipo y cargador respectivamente mediante cables que van insertados en un ducto, el cual es enterrado en el suelo hasta llegar a la estación acelerográfica.

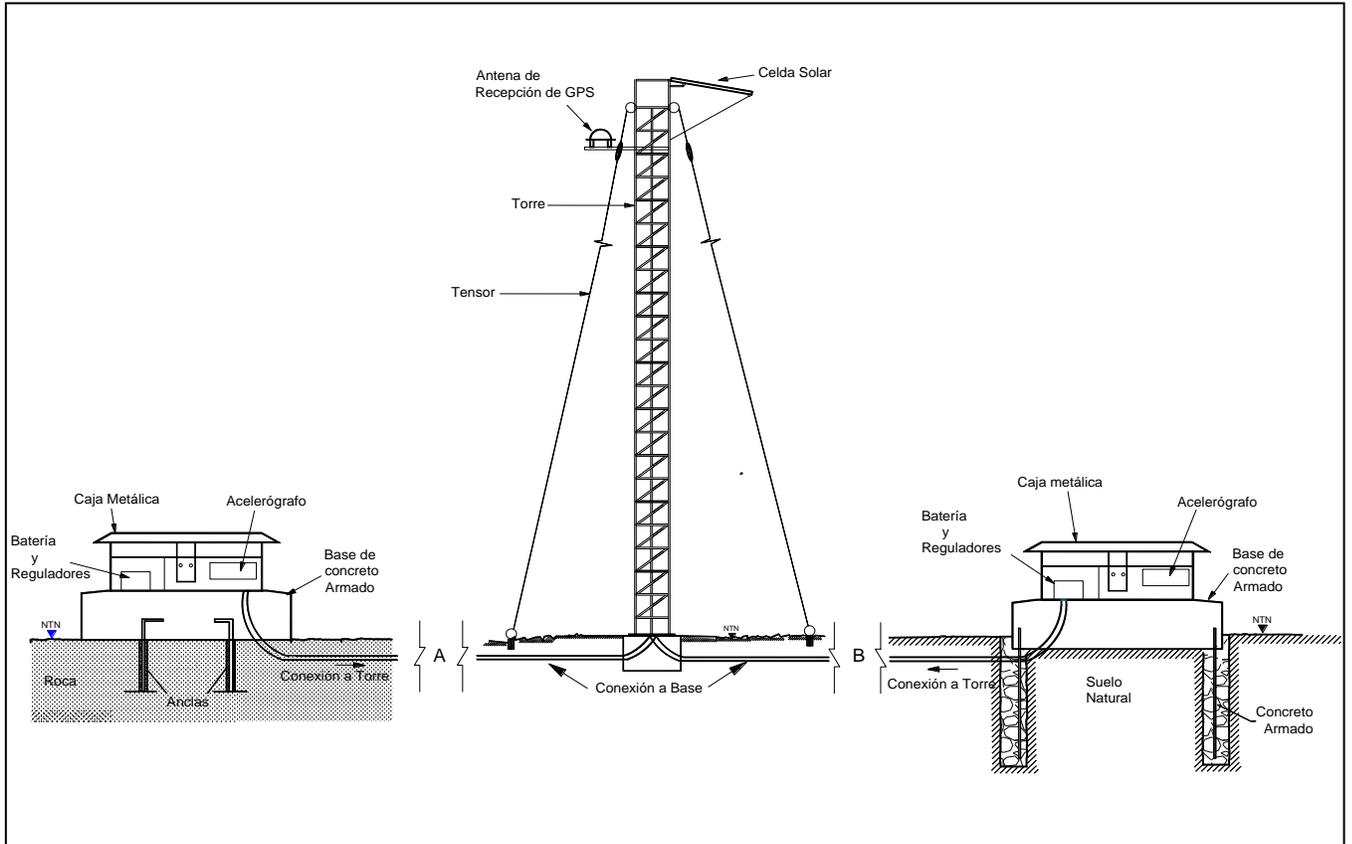


Figura II.4 Estación acelerográfica (ref 25)

II.2 RED ACELEROGRÁFICA

El estado de Oaxaca se ha visto seriamente afectado por eventos sísmicos generados tanto en la zona de subducción mexicana como continente adentro, tal es el caso de los temblores de 1931 ($M=7.8$), 1980 ($M=7.1$), 15 de junio ($M=7$) y 30 de septiembre ($M=7.6$) ambos en 1999. Debido a la falta de información de la respuesta sísmica del subsuelo del estado y la forma en que los efectos de sitio modifican los movimientos sísmicos, en Oaxaca se han instalado redes de instrumentación sísmica con equipos sísmológicos y acelerográficos, por parte de instituciones dedicadas al estudio de la

actividad sísmica. La información recabada de las estaciones es de gran importancia para la proyección de obras civiles, así como para el estudio del comportamiento del suelo. A continuación se describen brevemente las redes instaladas en el estado de Oaxaca por parte del Instituto Tecnológico de Oaxaca (ITO), la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y los Institutos de Geofísica (IGEOF) e Ingeniería (II) de la UNAM.

a) Red Regional del ITO

Las estaciones que forman esta red son: Temascal (TMH), Guevea de Humbolt (GVH), Tlaxiaco (TLA), Teotitlán (TEO) y Puerto Escondido (PES). Los equipos que se ubican en estas estaciones son sismógrafos analógicos *RANGER* alimentados con energía solar mediante foto celdas. La tabla II.1 presenta las coordenadas de las estaciones de esta red.

Tabla II.1 Red Regional del ITO (ref 26)

| Localidad | Clave | Coordenadas | | Descripción |
|-------------------|-------|-------------|------------|---|
| | | Lat. N | Long. O | |
| Temascal | TMH | 18° 13.51' | 96° 22.38' | Ubicada en la parte norte del estado de Oaxaca en las instalaciones de la presa Miguel Alemán |
| Guevea de Humbolt | GVH | 16° 47.67' | 95° 22.43' | Se encuentra en la ubicación del mismo nombre |
| Tlaxiaco | TLA | 17° 15.60' | 97° 41.40' | Se ubica en la parte oeste del estado, en los límites del poblado de Sta. María Asunción Tlaxiaco |
| Teotitlán | TEO | 18° 07.63' | 97° 04.48 | Se localiza en la población del mismo nombre |
| Puerto Escondido | PES | 15° 52.23' | 97° 04.44 | Ubicada en el sur del estado |

b) Red Sísmica de la CFE

La Comisión Federal de Electricidad, a través del departamento de sismotectónica de la gerencia de estudios de Ingeniería Civil, estudia el potencial sísmico de sitios determinados y caracteriza su respuesta ante la ocurrencia de temblores, proporcionando los parámetros sísmicos necesarios para el diseño de estructuras civiles. En el estado de Oaxaca se localizan las siguientes estaciones sismológicas:

Tabla II.2 Red Sísmica CFE (ref 27)

| Localidad | Clave | Coordenadas | |
|--------------------------|-------|-------------|------------|
| | | Lat. N | Long. O |
| Huazantlán | HUA | 16° 14.05' | 95° 07.45' |
| Aguas Calientes | AGS | 16° 06.13' | 95° 26.52' |
| Presa Benito Juárez, CFE | PBJ | 16° 26.20' | 95° 26.41' |
| La Cañada | LCD | 16° 09.19' | 97° 41.12' |
| Pochutla | PCH | 15° 44.43' | 96° 27.46' |
| Ixtlán de Juárez | IXT | 17° 19.86' | 96° 29.01' |
| Tlaxiaco | TLA | 17° 14.78' | 97° 41.83' |
| Teotitlán | TEO | 18° 08.45' | 97° 04.08' |

c) Red Sismológica del IGEOF

Esta dependencia de la UNAM, cuenta con 4 estaciones sísmicas en el estado de Oaxaca, las cuales son operadas por el Servicio Sismológico Nacional y su localización es la siguiente:

Tabla II.3 Red Sísmica Instituto de Geofísica (ref 28)

| Localidad | Clave | Coordenadas | | Equipo |
|-------------------|-------|-------------|---------|---------------------------|
| | | Lat. N | Long. O | |
| Huatulco | HUIG | 15.768° | 96.108° | Sismógrafo y acelerógrafo |
| Oaxaca, Oax | OXIG | 17.073° | 96.733° | Sismógrafo y acelerógrafo |
| Oaxaca, Oax | OXX | 17.082° | 96.723° | Sismógrafo |
| Pinotepa Nacional | PNIG | 16.395° | 96.127° | Sismógrafo y acelerógrafo |

d) Red acelerográfica del II

Esta red surge a consecuencia del estudio de la actividad sísmica en la zona de subducción mexicana, en la que se detectó que la zona centro de Oaxaca tiene una alta probabilidad de generar sismos de gran intensidad en un periodo. La red está integrada por la Red Acelerográfica de la ciudad de Oaxaca (RAO) y por la Red Acelerográfica de la Costa de Oaxaca (RACO).

En 1970 el Instituto de Ingeniería instaló la estación acelerográfica OAXM en la Facultad de Medicina de la ciudad de Oaxaca, posteriormente en 1998 se implementó la estación OXLC, en la ciudad de las Canteras. En los siguientes meses se siguió con la integración de la RACO, hasta que en octubre de 1999 esta red inició con su operación formal con seis estaciones acelerográficas en diferentes tipos de suelo.

- Red Acelerográfica de la ciudad de Oaxaca (RAO)

En la siguiente tabla se muestran algunas características de las estaciones que actualmente integran esta red, así mismo en la figura II.5 se presenta un croquis de ubicación de las mismas

Tabla II.4 Red Acelerográfica de la ciudad de Oaxaca (ref 29)

| Ubicación o Localidad | Clave | Coordenadas | | Aparato/Serie | Construida sobre |
|--------------------------------|-------|-------------|---------|---------------|------------------|
| | | Lat. N | Long. O | | |
| Oaxaca Facultad de Medicina | OAXM | 17.084 | 96.716 | DCA-333/122 | Suelo Aluvial |
| Oaxaca Alameda de León | OXAL | 17.061 | 96.726 | ETNA/1918 | Suelo |
| Oaxaca Escuela Benito Juárez | OXBJ | 17.067 | 96.723 | ETNA/1916 | Roca |
| Oaxaca Cd. Universitaria | OXCU | 17.049 | 96.713 | DCA-333/170 | Arcilla |
| Oaxaca Escuela Primaria Mugica | OXPM | 17.061 | 96.717 | ETNA/1917 | Suelo |
| Oaxaca Instituto Tecnológico | OXTO | 17.078 | 96.744 | ETNA/1531 | Suelo Aluvial |
| Las Canteras | OXLC | 17.06 | 96.7 | ETNA/1328 | Roca, Cantera |
| Oaxaca Aeropuerto | OXAE | 17.001 | 96.722 | ETNA/4454 | Suelo Aluvial |
| Oaxaca Protección Civil | OXPC | 17.051 | 96.723 | ETNA/4576 | Suelo Aluvial |

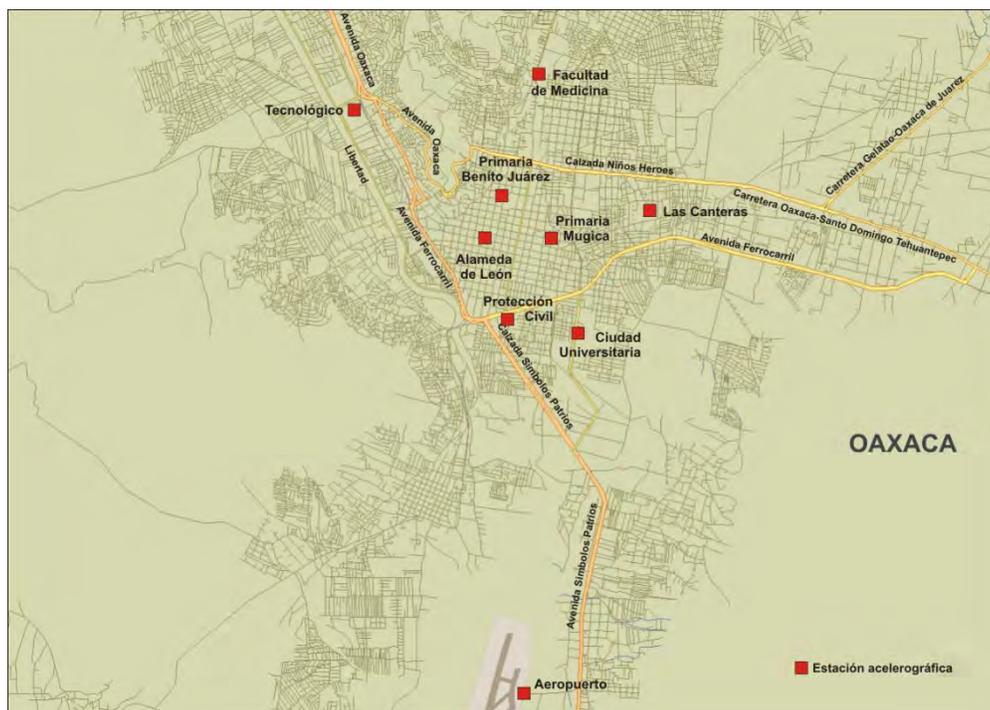


Figura II.5 Ubicación estaciones RAO

- Red Acelerográfica de la Costa de Oaxaca (RACO)

La instrumentación de la franja costera de Oaxaca se inicia en 1979 cuando se instaló, sobre depósitos de arena, la estación Puerto Escondido (PESC), posteriormente en 1985 se instaló la estación Pinotepa Nacional (PNTP) por medio del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Por otro lado, el Instituto de Geofísica, de la misma casa de estudios, puso en operación como parte de la red sismológica nacional, dos estaciones en roca con registradores de banda ancha en Huatulco y Pinotepa Nacional. La selección de los sitios donde se encuentran los acelerógrafos se basó en la calidad de la roca, la seguridad del sitio y la facilidad de acceso. Actualmente la Red Acelerográfica de la Costa de Oaxaca está integrada por 12 estaciones, en la siguiente tabla se enlistan y se proporcionan algunas de sus características.

Tabla II.5 Red Acelerográfica de la costa de Oaxaca (ref 30)

| Ubicación o localidad | Clave | Coordenadas | | Aparato/Serie | Construida sobre |
|------------------------|-------|-------------|---------|---------------|------------------|
| | | Lat. N | Long. O | | |
| Huamelula | HUAM | 16.031 | 95.67 | ETNA/1315 | Roca |
| Jamiltepec | JAMI | 16.285 | 97.82 | ETNA/372 | Roca |
| Las Negras | LANE | 15.948 | 97.187 | ETNA/372 | Roca |
| Niltepec | NILT | 16.566 | 94.616 | ETNA/972 | Roca |
| Jalapa del Marqués | OXJM | 16.445 | 95.444 | ETNA/2224 | Roca |
| Puerto Ángel | PANG | 15.668 | 96.491 | ETNA/921 | Roca |
| Pinotepa Nacional | PNTP | 16.349 | 98.061 | DCA-333/306 | Limo Arenoso |
| Río Grande | RIOG | 16.014 | 97.439 | ETNA/922 | Roca |
| Salina Cruz | SCRU | 16.187 | 95.209 | ETNA/2223 | Roca |
| San Martín Los Canseco | SMLC | 16.655 | 96.729 | ETNA/1327 | Roca |
| Tamazulapan | TAMA | 16.261 | 96.575 | ETNA/1326 | Roca |
| La Galera | GALE | 15.977 | 96.491 | ETNA/4440 | Roca |



Figura II.6 Ubicación estaciones RACO

II.3 SISMOS REGISTRADOS

En la tabla II.6 se presentan los sismos registrados durante el periodo del 3 de febrero de 1998 al 20 de junio de 2009 únicamente para las estaciones LANE, RIOG y SCRUI. Se muestran características importantes de los sismos como son la fecha, la hora, las coordenadas epicentrales, profundidad y magnitud de cada uno de ellos, así como las estaciones en donde se registró el evento. Dicha tabla cuenta con 85 sismos con magnitudes que van de 3.6 a 7.6, siendo esta última la registrada en el temblor del 30 de septiembre de 1999.

Tabla II.6 Sismos registrados en las estaciones LANE, RIOG, SCRUI

| Evento | Fecha | Hora Sismo (GMT) | Coordenadas epicentro | | Profundidad (km) | Magnitud (M) | Estación con Registro |
|--------|------------|------------------|-----------------------|---------|------------------|--------------|-----------------------|
| | | | Lat. N | Long. O | | | |
| 1 | 03/02/1998 | 03:02:01 | 15.69 | 96.37 | 33 | 6.4 | RIOG |
| 2 | 03/03/1998 | 07:38:23 | 15.71 | 96.47 | 12 | 5 | LANE |
| 3 | 21/11/1998 | 06:43:54 | 15.96 | 96.7 | 42 | 4.5 | LANE |
| 4 | 13/01/1999 | 02:14:08 | 16.1 | 97.18 | 6 | 4.5 | LANE, RIOG |
| 5 | 15/06/1999 | 20:42:07 | 18.18 | 97.51 | 69 | 7 | LANE, RIOG |
| 6 | 28/08/1999 | 00:44:26 | 15.86 | 97.41 | 10 | 4.5 | LANE, RIOG |
| 7 | 30/09/1999 | 16:31:14 | 15.95 | 97.03 | 16 | 7.6 | LANE, RIOG |
| 8 | 30/09/1999 | 16:50:57 | 16.07 | 97.4 | 31 | 4.2 | LANE, RIOG |
| 9 | 30/09/1999 | 19:04:45 | 16.09 | 97.34 | 43 | 4.5 | LANE, RIOG |
| 10 | 01/10/1999 | 00:30:43 | 16.11 | 97.44 | 11 | 4.2 | LANE, RIOG |
| 11 | 01/10/1999 | 03:33:38 | 15.91 | 97.14 | 37 | 4.6 | LANE, RIOG |
| 12 | 01/10/1999 | 14:44:10 | 15.87 | 97.11 | 34 | 4.5 | LANE, RIOG |
| 13 | 02/10/1999 | 10:23:19 | 16 | 97.31 | 44 | 4.3 | LANE, RIOG |
| 14 | 14/12/1999 | 23:53:02 | 16.04 | 97.16 | 10 | 4.2 | LANE |
| 15 | 02/01/2000 | 17:35:17 | 16.07 | 97.35 | 16 | 4.3 | LANE, RIOG |
| 16 | 01/03/2000 | 23:31:21 | 15.86 | 97.11 | 16 | 4.9 | LANE |
| 17 | 12/03/2000 | 22:21:32 | 14.59 | 92.27 | 35 | 5.9 | SCRUI |
| 18 | 10/05/2000 | 15:57:44 | 16.02 | 97.23 | 28 | 4.7 | LANE, RIOG |
| 19 | 06/06/2000 | 17:03:19 | 16.27 | 97.49 | 45 | 4.5 | RIOG |
| 20 | 29/09/2000 | 11:31:31 | 16.1 | 95.91 | 60 | 4.7 | SCRUI |
| 21 | 09/01/2001 | 01:46:14 | 15.36 | 93.27 | 13 | 5 | SCRUI |
| 22 | 19/01/2001 | 01:12:53 | 15.1 | 93.03 | 108 | 6.3 | SCRUI |
| 23 | 16/01/2002 | 23:09:55 | 15.43 | 93.55 | 76 | 6.7 | SCRUI |
| 24 | 30/01/2002 | 08:42:04 | 18.1 | 95.97 | 109 | 5.6 | SCRUI |
| 25 | 13/04/2002 | 19:05:59 | 16.23 | 95.22 | 55 | 4.7 | SCRUI |
| 26 | 11/05/2002 | 17:08:09 | 16.17 | 97.51 | 29 | 4.5 | LANE, RIOG |
| 27 | 07/06/2002 | 16:02:59 | 15.98 | 96.88 | 14 | 5 | LANE, RIOG |
| 28 | 07/06/2002 | 16:02:59 | 15.98 | 96.88 | 14 | 5 | LANE, RIOG |
| 29 | 05/08/2002 | 01:25:18 | 15.6 | 96.05 | 9 | 5.3 | SCRUI |
| 30 | 27/08/2002 | 17:08:48 | 16.04 | 97.59 | 15 | 5 | LANE, RIOG |
| 31 | 02/12/2002 | 04:24:49 | 15.8 | 96.74 | 6 | 4.8 | LANE |
| 32 | 19/04/2003 | 11:38:27 | 16.18 | 97.27 | 25 | 4.4 | LANE, RIOG |
| 33 | 02/08/2003 | 03:34:42 | 15.83 | 95.78 | 16 | 4.3 | SCRUI |
| 34 | 13/01/2004 | 19:50:19 | 16 | 97.17 | 20 | 5.1 | LANE, RIOG |
| 35 | 13/01/2004 | 21:28:58 | 15.99 | 97.15 | 16 | 5.7 | LANE, RIOG |
| 36 | 13/01/2004 | 21:39:29 | 15.9 | 97.15 | 16 | 4.1 | LANE, RIOG |
| 37 | 14/01/2004 | 12:04:41 | 16.03 | 97.19 | 29 | 4.6 | LANE, RIOG |
| 38 | 10/02/2004 | 10:37:59 | 16.06 | 97.2 | 44 | 4.4 | LANE, RIOG |
| 39 | 03/03/2004 | 09:21:30 | 15.49 | 97.33 | 20 | 4.8 | LANE, RIOG |
| 40 | 20/04/2004 | 17:44:20 | 17.33 | 94.74 | 144 | 5.2 | SCRUI |
| 41 | 14/06/2004 | 22:54:21 | 16.22 | 98.16 | 10 | 6.4 | LANE, RIOG |
| 42 | 14/06/2004 | 22:55:25 | 16.12 | 98.09 | 6 | 4.3 | RIOG |
| 43 | 01/08/2004 | 22:57:15 | 16.07 | 97.16 | 28 | 4.6 | LANE, RIOG |
| 44 | 07/08/2004 | 11:49:12 | 17.05 | 95.43 | 110 | 5.9 | RIOG, SCRUI |
| 45 | 18/08/2004 | 09:03:10 | 16.24 | 95.15 | 51 | 5.7 | SCRUI |
| 46 | 10/12/2004 | 10:32:22 | 15.18 | 97.29 | 16 | 5.4 | RIOG |
| 47 | 15/12/2004 | 08:05:14 | 16.03 | 95.44 | 12 | 4.5 | SCRUI |
| 48 | 18/02/2005 | 11:08:05 | 16.08 | 97.17 | 6 | 4.1 | LANE, RIOG |
| 49 | 21/05/2005 | 20:17:34 | 16.19 | 95.35 | 20 | 3.9 | SCRUI |
| 50 | 21/11/2005 | 01:25:17 | 16.11 | 97.43 | 8 | 4.4 | LANE, RIOG |
| 51 | 07/07/2006 | 17:43:34 | 15.78 | 96.26 | 31 | 4.7 | SCRUI |
| 52 | 19/08/2006 | 05:41:30 | 15.91 | 97.3 | 52 | 5.5 | LANE, RIOG |
| 53 | 01/10/2006 | 06:59:50 | 16.11 | 94.55 | 60 | 4.8 | SCRUI |
| 54 | 20/10/2006 | 06:21:40 | 15.66 | 97.28 | 12 | 4.7 | LANE, RIOG |
| 55 | 08/11/2006 | 17:18:47 | 16.05 | 96.54 | 45 | 5.1 | LANE, RIOG |

Tabla II.6 (Continuación)

| Evento | Fecha | Hora Sismo (GTM) | Coordenadas epicentro | | Profundidad (km) | Magnitud (M) | Estación con Registro |
|--------|------------|------------------|-----------------------|---------|------------------|--------------|-----------------------|
| | | | Lat. N | Long. O | | | |
| 56 | 10/11/2006 | 06:33:07 | 15.46 | 97.48 | 20 | 4.8 | LANE, RIOG |
| 57 | 15/01/2007 | 20:50:20 | 15.92 | 95.51 | 29 | 4.5 | SCRU |
| 58 | 15/03/2007 | 13:13:00 | 16.08 | 97.26 | 15 | 5.1 | LANE, RIOG |
| 59 | 27/06/2007 | 13:46:02 | 16.29 | 96.61 | 98 | 4.4 | LANE, RIOG |
| 60 | 06/07/2007 | 01:09:19 | 16.9 | 94.1 | 100 | 6.2 | SCRU |
| 61 | 11/09/2007 | 03:12:04 | 15.4 | 94.8 | 10 | 4.8 | SCRU |
| 62 | 15/09/2007 | 10:30:48 | 17.46 | 94.71 | 153 | 5 | SCRU |
| 63 | 01/10/2007 | 14:41:52 | 17.24 | 94.36 | 149 | 4.7 | SCRU |
| 64 | 20/10/2007 | 15:14:46 | 16.08 | 95.6 | 26 | 4.5 | SCRU |
| 65 | 24/10/2007 | 18:25:51 | 15.58 | 94.28 | 18 | 4.8 | SCRU |
| 66 | 21/11/2007 | 15:00:12 | 16.13 | 97.19 | 22 | 4.6 | LANE |
| 67 | 26/11/2007 | 17:41:40 | 15.28 | 93.36 | 87 | 5.6 | SCRU |
| 68 | 11/12/2007 | 01:28:52 | 15.74 | 96.92 | 27 | 4.6 | LANE, RIOG |
| 69 | 11/02/2008 | 22:20:33 | 16.22 | 94.22 | 109 | 4.8 | SCRU |
| 70 | 12/02/2008 | 12:50:18 | 16.19 | 94.54 | 90 | 6.6 | LANE, SCRU |
| 71 | 04/05/2008 | 10:21:35 | 15.41 | 96.75 | 10 | 4.5 | LANE |
| 72 | 30/07/2008 | 10:23:33 | 15.98 | 96.1 | 49 | 5.1 | SCRU |
| 73 | 04/12/2008 | 05:38:13 | 16.36 | 95.1 | 65 | 4.2 | SCRU |
| 74 | 09/12/2008 | 10:23:13 | 16.02 | 97.16 | 12 | 4 | LANE |
| 75 | 31/12/2008 | 19:53:28 | 16.01 | 97.11 | 35 | 4.1 | LANE |
| 76 | 17/01/2009 | 02:57:30 | 15.74 | 92.76 | 15 | 5.2 | SCRU |
| 77 | 18/02/2009 | 05:41:36 | 16.72 | 94.71 | 82 | 4.8 | SCRU |
| 78 | 02/03/2009 | 21:20:52 | 15.82 | 95.36 | 71 | 4.2 | SCRU |
| 79 | 10/03/2009 | 00:36:44 | 16.46 | 93.65 | 147 | 4.9 | SCRU |
| 80 | 07/04/2009 | 21:49:28 | 15.82 | 96.65 | 20 | 4.8 | LANE, RIOG, SCRU |
| 81 | 08/04/2009 | 01:20:32 | 15.69 | 94.01 | 16 | 4.5 | SCRU |
| 82 | 23/05/2009 | 19:01:16 | 16.01 | 97.22 | 16 | 3.6 | LANE |
| 83 | 26/05/2009 | 19:13:47 | 15.86 | 95.65 | 10 | 4.6 | SCRU |
| 84 | 07/06/2009 | 21:26:47 | 16.15 | 93.32 | 135 | 5 | SCRU |
| 85 | 20/06/2009 | 23:42:07 | 16.35 | 94.35 | 12 | 4.4 | SCRU |

III. REDES NEURONALES Y SU APLICACIÓN EN LA INGENIERÍA SÍSMICA

III. REDES NEURONALES ARTIFICIALES Y SU APLICACIÓN EN LA INGENIERÍA SÍSMICA

III.1 CONCEPTOS GENERALES

En sus orígenes las Redes Neuronales Artificiales (RNA) fueron concebidas como un intento para entender y explicar como funciona y opera el cerebro humano. Warren McCulloch un neurofisiólogo y Walter Pitts un matemático fueron los primeros en establecer los fundamentos de la computación neuronal, mediante la analogía que presentaron en 1943 entre la estructura y las funciones de las redes neuronales y los circuitos lógicos digitales (ref 31).

Las neuronas biológicas son células del cerebro cuya función primordial radica en la recolección, procesamiento y emisión de señales eléctricas. Su estructura está integrada por un cuerpo celular o soma, del que se ramifican fibras cortas llamadas dendritas y una sola fibra larga conocida como axón que generalmente llega a medir un centímetro, pero puede alcanzar hasta un metro de longitud (fig III.1). Incluso los axones pueden dar lugar a ramificaciones colaterales junto con la rama principal y por consiguiente la conectividad real de esta célula cerebral puede ser bastante complicada, se sabe que una neurona puede tener 10 y hasta 100,000 interconexiones formando complejas estructuras (ref 32).

Las dendritas reciben las señales de entrada, el soma se encarga de procesarlas mientras que el axón transmite la señal desde el soma hacia otras neuronas. El punto de contacto entre el axón de una célula y la dendrita de otra, recibe el nombre de sinapsis. Se estima que el cerebro humano cuenta con cien mil millones de neuronas, que ejecutan millones de instrucciones indispensables para realizar una vida normal.

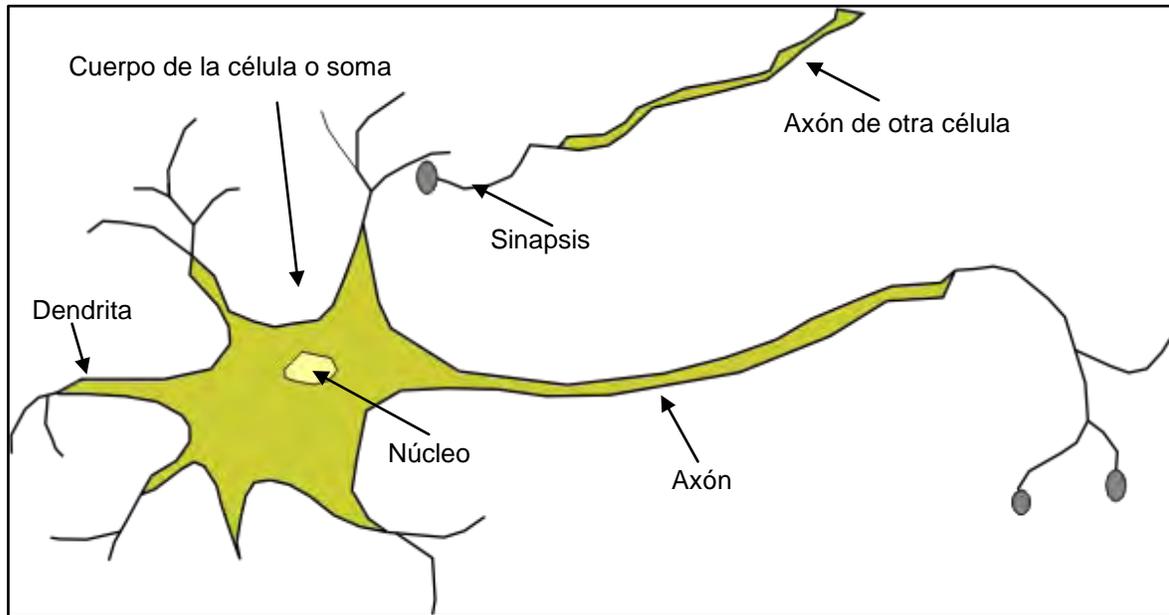


Figura III.1 Neurona biológica (ref 33)

Las RNA's tratan de imitar el comportamiento de la neurona biológica a través de los nodos que son las unidades de procesamiento de estas redes; los nodos igual que las neuronas poseen una gran cantidad de conexiones tanto de entrada de información como de salida (fig III.2). La información recibida se procesa tomando en cuenta los pesos asociados a los nodos W_i , también llamados sinápticos, estos representan la resistencia y el signo de la conexión. Cada nodo tiene un peso asociado, que es la suma de todas las conexiones que llegan al mismo, enseguida de haber sido asignados a todos los nodos, la red evalúa la respuesta que obtiene como salida y ajusta dichos valores para cada nodo.

se componen de capas, y de acuerdo al lugar que ocupan en la red se puede clasificar como:

- De entrada: Es la encargada de recibir la información que llega del exterior a la red.
- Ocultas: No mantienen contacto con el entorno exterior y su número varía desde cero hasta un valor grande. Los nodos de las capas ocultas pueden estar interconectados de diversas maneras, dependiendo de la topología de la red.
- De salida: Esta transmite la información hacia el exterior.

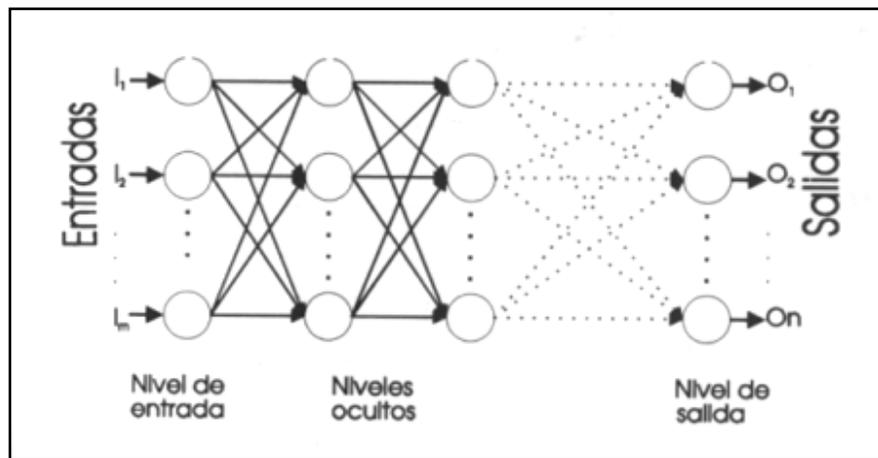


Figura III.3 Capas de una RNA (ref 34)

Los parámetros fundamentales en la arquitectura de una RNA son:

- Número de capas
- Número de nodos por capa
- Tipo de conexiones entre nodos, es decir hacia atrás, laterales o recurrentes (salida de un nodo aplicada hacia su propia entrada).

Existen diversos tipos de topologías uno de los más utilizados es el Perceptrón Multicapa. Dicha arquitectura está compuesta de una capa de entrada cuya única función es transmitir la información de entrenamiento a las capas ocultas, las cuales no tiene contacto directo con el exterior, pero procesan y transmiten la información hacia la capa de salida, la que puede estar integrada de uno o varios nodos. Debido a que el flujo de información se realiza en la dirección que va de la capa de entrada

hasta la de salida, la conexión de los nodos es únicamente con los elementos de la capa siguiente debido a que además está restringida la comunicación lateral con nodos de la misma capa.

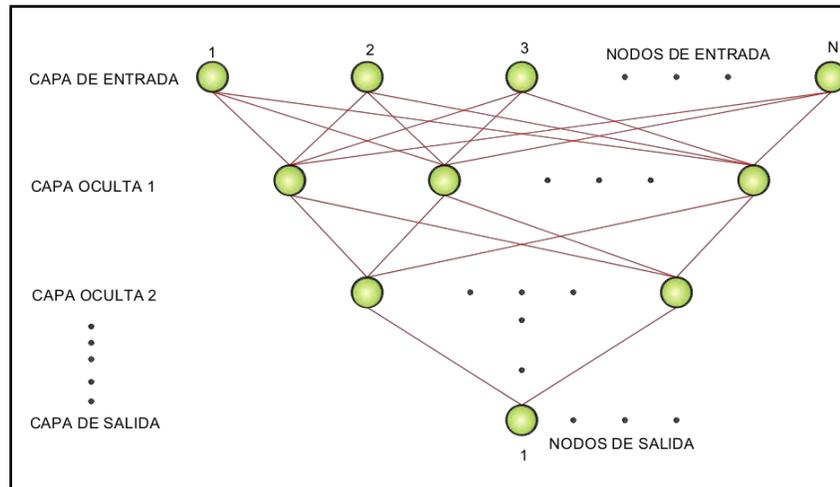


Figura III.4 Arquitectura Perceptrón Multicapa (ref 35)

Dinámica de computación: una RNA requiere que sus nodos estén unidos mediante conjuntos de conexiones, asociado a cada uno hay una función de salida o de transferencia, la cual determina si el nodo entra o no, en un estado de activación. Existen diversas funciones de transferencia, entre las más utilizadas se encuentran la escalón, lineal, gaussiana y sigmoideal. La función escalón o umbral (fig III.5) únicamente se utiliza cuando las salidas de la red son binarias (dos posibles valores), se obtiene una respuesta sólo cuando el estado de activación es mayor o igual que cierto valor límite.

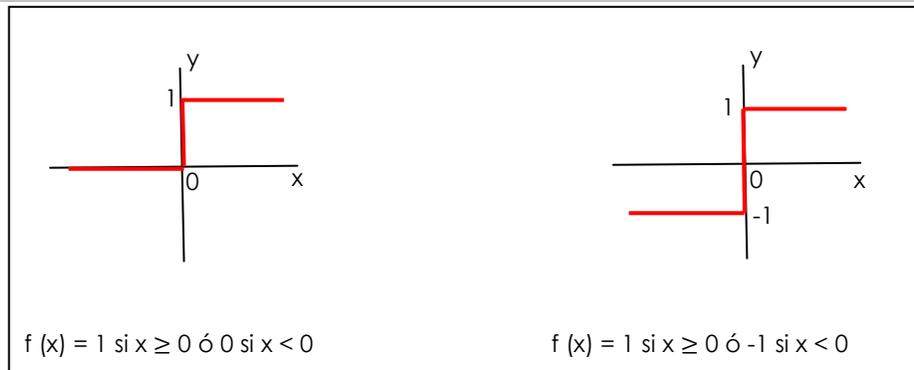


Figura III.5 Función de transferencia escalón

La función de transferencia gaussiana (fig III.6) es más adaptativa que la sigmoideal debido a que el centro (definido por μ) y anchura (en función de σ) de esta se pueden ajustar.

$$FT_{gaussiana} = f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (3.1)$$

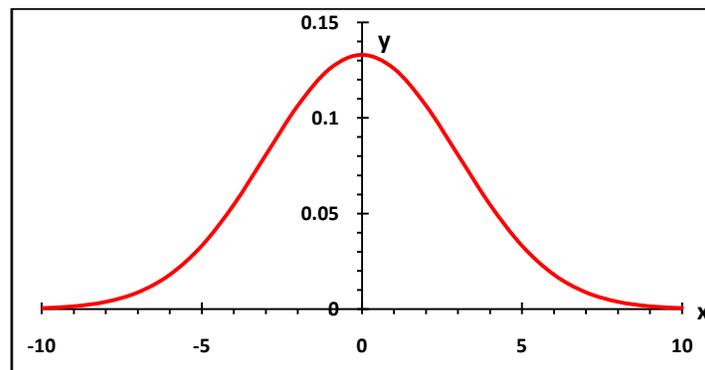


Figura III.6 Función de transferencia gaussiana

La importancia de la función sigmoideal radica en que toma los valores de entrada, que pueden estar entre mas y menos infinito, y restringe la salida a valores entre cero y uno de acuerdo a la siguiente ecuación

$$FT_{sigmoideal} = f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}} \quad (3.2)$$

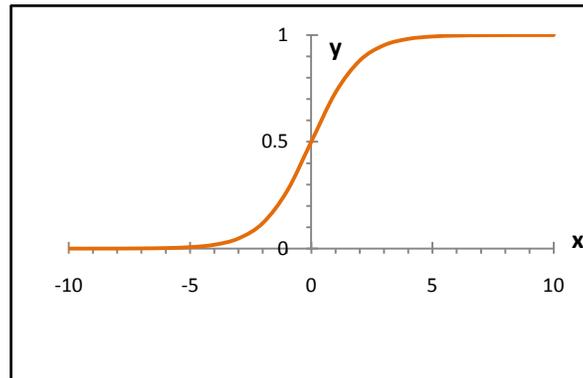


Figura III.7 Función de transferencia sigmoideal

Por otro lado la función de transferencia lineal o identidad (fig III.8) equivale a no aplicar una función de salida, ya que como su nombre lo indica, se trata de una línea recta y por ello no afecta la entrada neta de cada nodo. Es común utilizarla en la obtención de una salida inalterada en la última capa de los arreglos de la RNA.

$$FT_{lineal} = f(x) = x \quad (3.3)$$

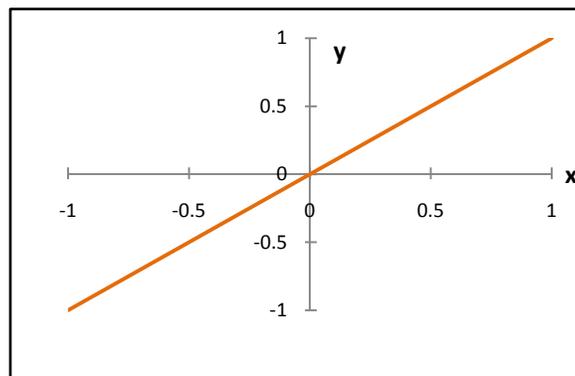


Figura III.8 Función de transferencia lineal

Algoritmo de Entrenamiento o Aprendizaje: de la misma manera en que el funcionamiento de una red depende del número de nodos de los que disponga y la conexión entre ellos, cada modelo cuenta con su propia regla de entrenamiento que representa una parte primordial del proceso de aprendizaje de la RNA así como de su capacidad de generalización. La operación del algoritmo de aprendizaje la integran dos partes fundamentalmente, una fase directa y una inversa o de retroceso. En la primera fase se ingresa a la red un conjunto integrado por pares de entradas y salidas, la información se aplica a la primera capa de entrada y es propagada por las capas ocultas hasta obtener la respuesta real de la red en la capa de salida, estos resultados son comparados con los valores objetivo y se calcula el error, durante esta fase los pesos sinápticos de la red permanecen fijos. En la fase de retroceso el valor del error es transmitido hacia atrás partiendo de la capa de salida, pasando por las capas ocultas hasta alcanzar las capas de entrada, los pesos sinápticos son ajustados de acuerdo con la regla de corrección del error para que en el siguiente ciclo, el valor de las salidas este más próximo a los valores objetivo.

Existen diversos algoritmos de entrenamiento como lo son Propagación Inversa (*Back Propagation*), de Rápida Propagación (*Quick Propagation*), Correlación en Cascada, Gradiente Conjugado, *Levenberg Marquardt* entre otros.

Un problema frecuente que se presenta en los algoritmos de redes multicapa, al buscar minimizar la función de error, es caer en un mínimo local o en algún punto estacionario (fig III.9), con lo cual no se llega a encontrar el mínimo global de la función error. Aunque en algunas aplicaciones no es primordial encontrar el mínimo global, si no encontrar el error mínimo preestablecido, que puede ser una solución aceptable en la práctica (ref 36).

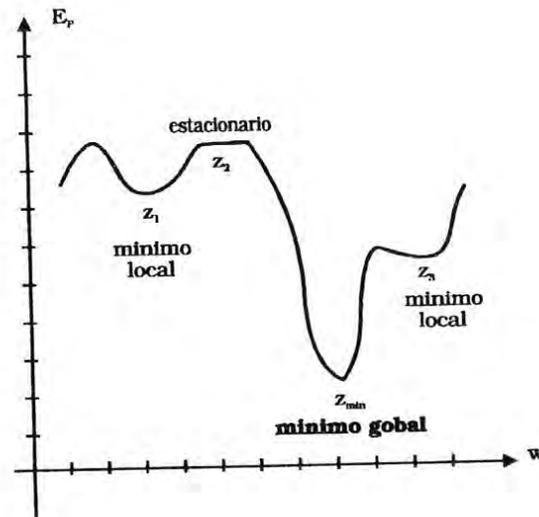


Figura III.9 Mínimos locales y global (ref 37)

III.2 APLICACIONES EN INGENIERÍA SÍSMICA

Las redes neuronales son técnicas de análisis de información desarrolladas para el estudio y manejo, de sistemas mal definidos y difíciles de modelar (ref 38). Son una herramienta para construir modelos “aproximados” contrario a los “precisos” obtenidos con métodos numéricos clásicos. La tecnología computacional que representan las RNA tiene múltiples aplicaciones en diversos campos, algunas aplicaciones son las siguientes:

- Explotación de base de datos
- Optimización de plazas y horarios en líneas de vuelo
- Reconocimiento de caracteres escritos
- Previsión del clima
- Valoración del riesgo de los créditos
- Interpretación de firmas
- Control de producción en líneas de procesos
- Diagnóstico y tratamiento a partir de síntomas y/o de datos analíticos (electrocardiogramas, encefalograma, análisis sanguíneo, etc)
- Predicción de reacciones adversas a los medicamentos
- Clasificación de señales

En la actualidad las RNA's se han aplicado satisfactoriamente en diversos campos de la ingeniería civil, una rama de esta ingeniería es la ingeniería estructural donde, se han utilizado como herramientas para determinar la localización y severidad del daño estructural de manera confiable (ref 39), aunque se han desarrollado distintos métodos para la evaluación de este, como lo son los de inspección visual, emisión acústica, ultrasónicos y dinámicos, todos ellos presentan algunos inconvenientes, el mayor de ellos es que su aplicación no resulta práctica, ya que requieren que la porción de la estructura a inspeccionar sea de fácil acceso, lo cual no siempre sucede, o bien los métodos dinámicos, que se basan en la medición de la respuesta de la estructura (vibración) aún resultan en la mayoría de los casos poco confiables debido a que tienen el inconveniente de no ser lo suficiente precisos para detectar el daño, localizarlo y determinar su severidad, por lo que su uso es un tanto limitada. Una aplicación más de las RNA's en la ingeniería estructural es el desarrollo de modelos para la predicción de la resistencia a la compresión del concreto (ref 40), a partir de variables como la velocidad de pulso ultrasónico y el peso unitario, variables que no son destructivas y si de fácil obtención.

En Geotecnia las redes neuronales han sido una alternativa para modelar el comportamiento de la arena sujeta a esfuerzos de compresión monotónica (ref 41) así como también han representado una nueva opción para la estimación de asentamientos superficiales por tuneleo en los suelos blandos de la ciudad de México (ref 42), este ha sido un tema recurrentemente estudiado debido a la construcción de las obras de infraestructura importantes, como el Drenaje Profundo, el Transporte Colectivo METRO, así como en obras especiales , por ejemplo en la excavación de la Catedral Metropolitana, en este trabajo se comparan los resultados obtenidos mediante los métodos semiempírico, analítico y RNA, obteniéndose la mejor aproximación con esta última.

Dentro de las aplicaciones que la Ingeniería Sísmica ha aportado se encuentran RNA's capaces de modelar la atenuación sísmica, para representar este fenómeno se han desarrollado una gran variedad de leyes de atenuación sin embargo presentan limitaciones, ya que la experiencia en el modelado de los fenómenos sísmicos ha demostrado la no-linealidad, la gama de comportamientos y la imposibilidad para medir algunas variables de estado, dando como resultado que las operaciones de

procesamiento tradicionales resulten poco eficaces en numerosas aproximaciones; en el caso del fenómeno de atenuación sísmica donde las características del comportamiento del sistema se representan por medio de datos de entrada-salida, los arreglos neuronales constituyen una interesante alternativa de modelado (ref 43). Asimismo se cuenta con RNA con capacidad predictiva que pueden estimar espectros de respuesta (ref 44), los cuales son una necesidad para caracterizar los movimientos del terreno bajo acción sísmica y su efecto en las estructuras, de hecho es un medio para representar la respuesta máxima de todos los posibles sistemas de un grado de libertad, para un movimiento particular del terreno, gráficamente el espectro de respuesta es un elemento que integra todos los valores máximos que, como respuesta tiene un sistema de un grado de libertad cuando está expuesto a una excitación en su base. Una aplicación mas es para estimar la duración de la fase intensa (ref 45) cuya interpretación es el tiempo bajo el cual se presenta la parte más relevante del acelerograma; en dicho trabajo se puede apreciar una gran similitud con ecuaciones que describen el fenómeno, dejando en claro la capacidad predictiva que estas redes ofrecen.

IV. ESTIMACIÓN DE LA ACELERACIÓN MÁXIMA UTILIZANDO EL MODELO NEURONAL ARTIFICIAL

IV. ESTIMACIÓN DE LA ACELERACIÓN MÁXIMA UTILIZANDO EL MODELO NEURONAL ARTIFICIAL

IV.1 DEFINICIÓN DE PARÁMETROS

Se determinó que los parámetros que influyen en la estimación de la aceleración máxima del terreno son la magnitud del sismo (M), la distancia epicentral (De) y el azimut (Az). Estos tres parámetros se utilizaron como nodos de entrada en el modelo neuronal artificial y como único nodo de salida u objetivo la aceleración máxima del terreno (a_{Max}), enseguida se amplían dichos conceptos

La magnitud de un sismo es una escala, que representa la energía sísmica liberada por cada sismo; existen diversos tipos (ver Anexo), cada una con limitantes de aplicación si ciertas condiciones de registro y en el acelerógrafo se cumplen. En la práctica la magnitud de un temblor se define como el promedio de las magnitudes calculadas en tantas estaciones como sea posible. Para este modelo se utilizó el valor máximo de los reportados por el Servicio Sismológico Nacional, de manera que la red lo utilice como marcador de patrones de comportamiento.

La aceleración máxima del terreno, es la ordenada máxima absoluta del acelerograma de un sismo en particular.

La distancia epicentral, es la distancia que existe entre las coordenadas del epicentro de un sismo y las correspondientes a la estación que lo registró, tomando en cuenta la curvatura de la Tierra. El punto de origen dentro de la Tierra de donde proviene el movimiento y es la causa del sismo se denomina foco o hipocentro. El punto o área del planeta en donde más se sienten los efectos de las sacudidas y está encima del foco, se llama epicentro.

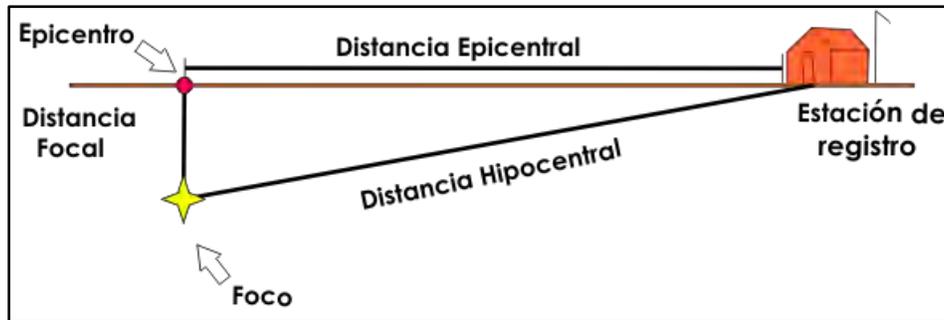


Figura IV.1 Distancia Epicentral

El valor del azimut, se toma como el ángulo que se forma entre el norte geográfico y el segmento dirigido que va del epicentro a la estación. Estos tres últimos parámetros se obtuvieron mediante el uso del programa Espectra (ref. 46).

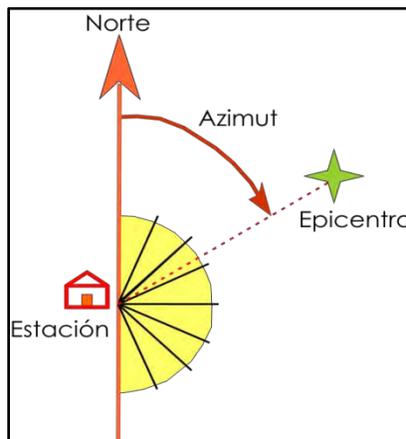


Figura IV.2 Azimut

IV.2 SELECCIÓN DE LA BASE DE DATOS SÍSMICOS

Para este modelo neuronal artificial se decidió trabajar con estaciones que fueran cercanas a la costa, que estuvieran desplantadas sobre roca y que además tuvieran un número considerable de registros; las estaciones que cuentan con estas características son Las Negras (LANE), Río Grande (RIOG) y Salina Cruz (SRCU).



Figura IV.3 Estaciones de estudio

En las tablas IV.1 a IV.3 se presenta la información correspondiente a los sismos utilizados en las etapas de prueba y entrenamiento de las RNA's. La fecha del sismo que está integrado por nueve números, los primeros cuatro de izquierda a derecha son el año, los siguientes dos son el mes y los últimos dígitos antes del punto decimal son el día, después del punto decimal está el número de evento registrado en esa fecha. Enseguida se indica la magnitud, la distancia epicentral y el azimut.

Para la estación LANE se contó con 46 sismos, para RIOG con 40 y para SCRU con 37.

Tabla IV.1 Sismos utilizados para la estación LANE

| LANE | | | | | | | | | |
|------|------------|-----|---------|--------|-----|------------|-----|---------|--------|
| No. | Sismo | M | De (km) | Az (°) | No. | Sismo | M | De (km) | Az (°) |
| 1 | 19980303.1 | 5 | 81 | 108.36 | 24 | 20040113.2 | 5.7 | 6 | 41.38 |
| 2 | 19981121.1 | 4.5 | 52 | 88.59 | 25 | 20040113.3 | 4.1 | 6 | 142.37 |
| 3 | 19990113.1 | 4.5 | 16 | 2.64 | 26 | 20040114.1 | 4.6 | 9 | 357.9 |
| 4 | 19990615.1 | 7 | 249 | 351.77 | 27 | 20040210.1 | 4.4 | 12 | 353.38 |
| 5 | 19990828.1 | 4.5 | 25 | 248.46 | 28 | 20040303.1 | 4.8 | 52 | 197.34 |
| 6 | 19990930.1 | 7.6 | 16 | 89.27 | 29 | 20040614.1 | 6.4 | 108 | 285.62 |
| 7 | 19990930.3 | 4.2 | 26 | 299.8 | 30 | 20040801.1 | 4.6 | 13 | 12.48 |
| 8 | 19990930.4 | 4.5 | 22 | 312.86 | 31 | 20050218.1 | 4.1 | 14 | 7.34 |
| 9 | 19991001.1 | 4.2 | 32 | 302.63 | 32 | 20051121.1 | 4.4 | 31 | 303.69 |
| 10 | 19991001.2 | 4.6 | 6 | 128.96 | 33 | 20060819.1 | 5.5 | 12 | 251.41 |
| 11 | 19991001.3 | 4.5 | 11 | 135.37 | 34 | 20061020.1 | 4.7 | 33 | 197.9 |
| 12 | 19991002.1 | 4.3 | 14 | 292.92 | 35 | 20061108.1 | 5.1 | 70 | 81.04 |
| 13 | 19991214.1 | 4.2 | 10 | 16.36 | 36 | 20061110.1 | 4.8 | 62 | 210.98 |
| 14 | 20000102.1 | 4.3 | 22 | 306.81 | 37 | 20070315.1 | 5.1 | 16 | 331.2 |
| 15 | 20000301.1 | 4.9 | 12 | 138.81 | 38 | 20070627.1 | 4.4 | 72 | 59.35 |
| 16 | 20000510.1 | 4.7 | 9 | 329.15 | 39 | 20071121.1 | 4.6 | 20 | 359.16 |
| 17 | 20020511.1 | 4.5 | 42 | 304.5 | 40 | 20071211.1 | 4.6 | 36 | 127.86 |
| 18 | 20020607.1 | 5 | 33 | 84.05 | 41 | 20080212.1 | 6.6 | 284 | 84.77 |
| 19 | 20020607.2 | 5 | 33 | 84.05 | 42 | 20080504.1 | 4.5 | 75 | 140.88 |
| 20 | 20020827.1 | 5 | 44 | 282.86 | 43 | 20081209.1 | 4 | 8 | 20.74 |
| 21 | 20021202.1 | 4.8 | 50 | 108.32 | 44 | 20081231.1 | 4.1 | 10 | 51.2 |
| 22 | 20030419.1 | 4.4 | 27 | 340.31 | 45 | 20090407.1 | 4.8 | 59 | 103.38 |
| 23 | 20040113.1 | 5.1 | 6 | 18.1 | 46 | 20090523.1 | 3.6 | 7 | 332.28 |

Tabla IV.2 Sismos utilizados para la estación RIOG

| RIOG | | | | | | | | | | |
|------|------------|-----|---------|--------|--|-----|------------|-----|---------|--------|
| No. | Sismo | M | De (Km) | Az (°) | | No. | Sismo | M | De (Km) | Az (°) |
| 1 | 19980203.1 | 6.4 | 119 | 106.86 | | 21 | 20040113.2 | 5.7 | 31 | 94.75 |
| 2 | 19990113.1 | 4.5 | 29 | 71.63 | | 22 | 20040113.3 | 4 | 25 | 83.79 |
| 3 | 19990615.1 | 7 | 239 | 358.12 | | 23 | 20040114.1 | 4.6 | 26 | 86.32 |
| 4 | 19990828.1 | 4.5 | 17 | 169.34 | | 24 | 20040210.1 | 4.4 | 26 | 79.11 |
| 5 | 19990930.1 | 7.6 | 44 | 98.89 | | 25 | 20040303.1 | 4.8 | 59 | 168.25 |
| 6 | 19990930.3 | 4.2 | 7 | 34.85 | | 26 | 20040614.1 | 6.4 | 80 | 285.95 |
| 7 | 19990930.4 | 4.5 | 13 | 52.49 | | 27 | 20040614.2 | 4.3 | 70 | 279.25 |
| 8 | 19991001.1 | 4.2 | 10 | 359.4 | | 28 | 20040801.1 | 4.6 | 30 | 78.65 |
| 9 | 19991001.2 | 4.6 | 34 | 109.18 | | 29 | 20040807.1 | 5.9 | 243 | 62.72 |
| 10 | 19991001.3 | 4.5 | 38 | 113.64 | | 30 | 20041210.1 | 5.4 | 93 | 169.87 |
| 11 | 19991002.1 | 4.3 | 13 | 96.19 | | 31 | 20050218.1 | 4.1 | 29 | 76.21 |
| 12 | 20000102.1 | 4.3 | 11 | 57.82 | | 32 | 20051121.1 | 4.4 | 10 | 5.36 |
| 13 | 20000510.1 | 4.7 | 22 | 88.36 | | 33 | 20060819.1 | 5.5 | 18 | 126.8 |
| 14 | 20000606.1 | 4.5 | 28 | 348.73 | | 34 | 20061020.1 | 4.7 | 42 | 155.81 |
| 15 | 20020511.1 | 4.5 | 18 | 335.53 | | 35 | 20061108.1 | 5.1 | 96 | 87.71 |
| 16 | 20020607.1 | 5 | 59 | 93.48 | | 36 | 20061110.1 | 4.8 | 61 | 184.23 |
| 17 | 20020607.2 | 5.6 | 51 | 102.5 | | 37 | 20070315.1 | 5.1 | 20 | 69.82 |
| 18 | 20020827.1 | 5 | 16 | 279.77 | | 38 | 20070627.1 | 4.4 | 93 | 71.6 |
| 19 | 20030419.1 | 4.4 | 25 | 45.51 | | 39 | 20071211.1 | 4.6 | 63 | 117.88 |
| 20 | 20040113.1 | 5.1 | 28 | 92.98 | | 40 | 20090407.1 | 4.8 | 87 | 103.84 |

Tabla IV.3 Sismos utilizados para la estación SCRU

| SRCU | | | | | | | | | |
|------|------------|-----|---------|--------|-----|------------|-----|---------|--------|
| No. | Sismo | M | De (Km) | Az (°) | No. | Sismo | M | De (Km) | Az (°) |
| 1 | 20000312.1 | 5.9 | 298 | 125.51 | 20 | 20070915.1 | 5 | 150 | 21.42 |
| 2 | 20000929.1 | 4.7 | 75 | 262.87 | 21 | 20071001.1 | 4.7 | 147 | 38.9 |
| 3 | 20010109.1 | 5 | 227 | 113.11 | 22 | 20071020.1 | 4.5 | 43 | 254.62 |
| 4 | 20010119.1 | 6.3 | 262 | 116.53 | 23 | 20071024.1 | 4.8 | 120 | 123.18 |
| 5 | 20020116.1 | 6.7 | 196 | 114.54 | 24 | 20071126.1 | 5.6 | 222 | 116.14 |
| 6 | 20020130.1 | 5.6 | 226 | 338.31 | 25 | 20080211.1 | 4.8 | 105 | 88.12 |
| 7 | 20020413.1 | 4.7 | 4 | 345.68 | 26 | 20080212.1 | 6.6 | 71 | 89.79 |
| 8 | 20020805.1 | 5.3 | 111 | 235.05 | 27 | 20080730.1 | 5.1 | 98 | 256.89 |
| 9 | 20030802.1 | 4.3 | 72 | 237.93 | 28 | 20081204.1 | 4.2 | 22 | 32.34 |
| 10 | 20040420.1 | 5.2 | 135 | 22.33 | 29 | 20090117.1 | 5.2 | 266 | 100.35 |
| 11 | 20040807.1 | 5.9 | 98 | 345.64 | 30 | 20090218.1 | 4.8 | 79 | 43.15 |
| 12 | 20040818.1 | 5.7 | 8 | 48.54 | 31 | 20090302.1 | 4.2 | 43 | 202.31 |
| 13 | 20041215.1 | 4.5 | 30 | 235.66 | 32 | 20090310.1 | 4.9 | 169 | 80.09 |
| 14 | 20050521.1 | 3.9 | 15 | 270.94 | 33 | 20090407.1 | 4.8 | 159 | 255.69 |
| 15 | 20060707.1 | 4.7 | 121 | 248.83 | 34 | 20090408.1 | 4.5 | 139 | 112.53 |
| 16 | 20061001.1 | 4.8 | 70 | 96.66 | 35 | 20090526.1 | 4.6 | 59 | 233.39 |
| 17 | 20070115.1 | 4.5 | 43 | 228.43 | 36 | 20090607.1 | 5 | 202 | 91.14 |
| 18 | 20070706.1 | 6.2 | 142 | 57.26 | 37 | 20090620.1 | 4.4 | 104 | 80.39 |
| 19 | 20070911.1 | 4.8 | 97 | 152.54 | | | | | |

IV.3 PROCESO DE ENTRENAMIENTO Y PRUEBA

Se elaboraron redes para cada estación, y debido a que cada evento sísmico es registrado en tres direcciones ortogonales, se entrenó una red para cada dirección.

Ahora bien cada red está dividida en dos grupos: el de entrenamiento y el de prueba, en el primero se debe contar con suficientes registros para obtener un

entrenamiento adecuado. En la tabla IV.4 se presenta el desglose de los registros sísmicos utilizados.

Tabla IV.4 Relación de eventos sísmicos utilizados en el modelo

| Estación | Número de sismos | Entrenamiento | Prueba |
|-----------------|-------------------------|----------------------|---------------|
| LANE | 46 | 41 | 5 |
| RIOG | 40 | 34 | 6 |
| SCRU | 37 | 32 | 5 |

Los arreglos completos se presentan a continuación, cabe mencionar que se respetó el mismo número de evento asignado en las tablas IV.1 a IV.3.

Tabla IV.5 Grupo de entrenamiento y prueba estación LANE

| LANE ENTRENAMIENTO | | | | | LANE ENTRENAMIENTO | | | | |
|--------------------|------------|-------|--------|-------|--------------------|------------|--------|-------|--------|
| No. | Sismo | aMax | | | No. | Sismo | aMax | | |
| | | EO | NS | V | | | EO | NS | V |
| 1 | 19980303.1 | 5.89 | 4.89 | 2.04 | 27 | 20040210.1 | 8.27 | 10.91 | 3.4 |
| 2 | 19981121.1 | 4.94 | 4.05 | 2.59 | 28 | 20040303.1 | 4.49 | 7.64 | 3.32 |
| 3 | 19990113.1 | 10.47 | 10.1 | 7.43 | 29 | 20040614.1 | 3.87 | 4.72 | 2.21 |
| 4 | 19990615.1 | 5.81 | 6.09 | 3.22 | 30 | 20040801.1 | 28.96 | 39.83 | 11.26 |
| 5 | 19990828.1 | 11.27 | 10.53 | 6.59 | 31 | 20050218.1 | 23.54 | 23.88 | 5.41 |
| 7 | 19990930.3 | 7.65 | 4.44 | 2.26 | 32 | 20051121.1 | 9.76 | 8.29 | 2.84 |
| 8 | 19990930.4 | 16.7 | 8.7 | 5.5 | 33 | 20060819.1 | 22.15 | 24.78 | 10.87 |
| 9 | 19991001.1 | 6.35 | 5.51 | 2.2 | 34 | 20061020.1 | 7.17 | 9.29 | 2.59 |
| 10 | 19991001.2 | 37.23 | 19.35 | 10 | 35 | 20061108.1 | 5.84 | 5.18 | 3.43 |
| 11 | 19991001.3 | 23.77 | 18.99 | 18.8 | 36 | 20061110.1 | 4.71 | 2.99 | 2.23 |
| 12 | 19991002.1 | 5.96 | 4.06 | 3.5 | 38 | 20070627.1 | 3.54 | 6.92 | 2.33 |
| 14 | 20000102.1 | 6.41 | 5.02 | 2.45 | 39 | 20071121.1 | 3.43 | 4 | 1.67 |
| 15 | 20000301.1 | 27.25 | 19.33 | 20.04 | 40 | 20071211.1 | 6.3 | 6.4 | 2.49 |
| 16 | 20000510.1 | 31.93 | 25.1 | 7.69 | 42 | 20080504.1 | 2.44 | 2.38 | 1 |
| 17 | 20020511.1 | 16.21 | 15.63 | 7.75 | 43 | 20081209.1 | 2.78 | 1.48 | 0.79 |
| 18 | 20020607.1 | 20 | 19.08 | 9.01 | 44 | 20081231.1 | 2.53 | 3.38 | 1 |
| 19 | 20020607.2 | 5.04 | 3.98 | 1.77 | 46 | 20090523.1 | 4.82 | 3.78 | 3.15 |
| 20 | 20020827.1 | 13.44 | 11.32 | 6.33 | LANE PRUEBA | | | | |
| 21 | 20021202.1 | 6.37 | 6.75 | 3.22 | | | | | |
| 22 | 20030419.1 | 4.56 | 6.06 | 2.2 | 6 | 19990930.1 | 251.84 | 238.9 | 209.13 |
| 23 | 20040113.1 | 31.9 | 39.78 | 14.56 | 13 | 19991214.1 | 8.68 | 7.62 | 6.41 |
| 24 | 20040113.2 | 3.6 | 5.08 | 2.08 | 37 | 20070315.1 | 37.88 | 40 | 22.26 |
| 25 | 20040113.3 | 90.43 | 142.43 | 29.94 | 41 | 20080212.1 | 3.11 | 2.71 | 1.86 |
| 26 | 20040114.1 | 11.61 | 19.21 | 8.61 | 45 | 20090407.1 | 6.4 | 7.87 | 4.01 |

Tabla IV.6 Grupo de entrenamiento y prueba estación RIOG

| RIOG ENTRENAMIENTO | | | | | RIOG ENTRENAMIENTO | | | | |
|--------------------|------------|-------|-------|-------|--------------------|------------|--------|--------|--------|
| No. | Sismo | aMax | | | No. | Sismo | aMax | | |
| | | EO | NS | V | | | EO | NS | V |
| 1 | 19980203.1 | 9.33 | 9.9 | 9.43 | 27 | 20040614.2 | 7.32 | 7.36 | 3.18 |
| 2 | 19990113.1 | 8.36 | 8.18 | 3.72 | 28 | 20040801.1 | 14.56 | 9.7 | 4.06 |
| 4 | 19990828.1 | 19.3 | 10.19 | 7.72 | 29 | 20040807.1 | 3.64 | 3.6 | 2.23 |
| 6 | 19990930.3 | 8.67 | 9.13 | 3.45 | 30 | 20041210.1 | 7.5 | 3.26 | 2.08 |
| 7 | 19990930.4 | 25.22 | 19.53 | 9.89 | 31 | 20050218.1 | 5.28 | 7.12 | 2.88 |
| 8 | 19991001.1 | 15.61 | 13.11 | 5.95 | 32 | 20051121.1 | 30.32 | 38.51 | 10.12 |
| 9 | 19991001.2 | 9.79 | 8.3 | 2.13 | 34 | 20061020.1 | 1.61 | 3.32 | 1.43 |
| 10 | 19991001.3 | 5.72 | 5.57 | 2.47 | 35 | 20061108.1 | 3.48 | 3.88 | 1.65 |
| 12 | 20000102.1 | 15.51 | 18.75 | 10.61 | 36 | 20061110.1 | 4.82 | 7.68 | 3.76 |
| 13 | 20000510.1 | 12.01 | 10.53 | 5.45 | 37 | 20070315.1 | 26.12 | 20.66 | 13.01 |
| 14 | 20000606.1 | 10.31 | 11.91 | 2.95 | 38 | 20070627.1 | 11.6 | 9.24 | 3.9 |
| 15 | 20020511.1 | 16.23 | 15.83 | 11.48 | 39 | 20071211.1 | 2.5 | 1.94 | 1.27 |
| 16 | 20020607.1 | 7 | 6.92 | 3.37 | 40 | 20090407.1 | 4.03 | 2.25 | 1.74 |
| 17 | 20020607.2 | 7.65 | 8.05 | 3.17 | RIOG PRUEBA | | | | |
| 19 | 20030419.1 | 5.1 | 6.06 | 2.65 | | | | | |
| 20 | 20040113.1 | 19.62 | 23.04 | 12.2 | 3 | 19990615.1 | 5.08 | 6.41 | 3.17 |
| 22 | 20040113.3 | 6.4 | 5.27 | 1.59 | 5 | 19990930.1 | 290.59 | 307.47 | 230.99 |
| 23 | 20040114.1 | 8.67 | 6.52 | 3.46 | 11 | 19991002.1 | 55.46 | 46.27 | 12.61 |
| 24 | 20040210.1 | 8.08 | 7 | 3.9 | 18 | 20020827.1 | 42.11 | 31.62 | 23.46 |
| 25 | 20040303.1 | 3.24 | 5.07 | 1.87 | 21 | 20040113.2 | 62.28 | 50.16 | 29.55 |
| 26 | 20040614.1 | 9.71 | 8.1 | 5.2 | 33 | 20060819.1 | 59.3 | 47.74 | 26.93 |

Tabla IV.7 Grupo de entrenamiento y prueba estación SCRU

| SCRU ENTRENAMIENTO | | | | | SCRU ENTRENAMIENTO | | | | |
|--------------------|------------|-------|-------|-------|--------------------|------------|-------|-------|-------|
| No. | Sismo | aMax | | | No. | Sismo | aMax | | |
| | | EO | NS | V | | | EO | NS | V |
| 1 | 20000312.1 | 6.29 | 6.47 | 4.1 | 24 | 20071126.1 | 4.03 | 4.23 | 2.81 |
| 2 | 20000929.1 | 6.19 | 5.35 | 3.83 | 25 | 20080211.1 | 5.21 | 5.71 | 5.42 |
| 3 | 20010109.1 | 6.29 | 4.8 | 3.11 | 27 | 20080730.1 | 9.29 | 6.41 | 5.04 |
| 4 | 20010119.1 | 5.83 | 3.12 | 3.25 | 28 | 20081204.1 | 1.34 | 1.39 | 0.95 |
| 5 | 20020116.1 | 20.51 | 15.02 | 12.6 | 29 | 20090117.1 | 4.42 | 2.66 | 3.12 |
| 7 | 20020413.1 | 16.83 | 20.18 | 10.62 | 30 | 20090218.1 | 2.62 | 2.61 | 4.99 |
| 8 | 20020805.1 | 7.53 | 7.75 | 5.21 | 31 | 0090302.1 | 8.73 | 6.68 | 8.03 |
| 10 | 20040420.1 | 8.58 | 8.28 | 4.05 | 32 | 20090310.1 | 1.99 | 1.36 | 3.14 |
| 13 | 20041215.1 | 13.49 | 11.59 | 9.83 | 33 | 20090407.1 | 1.63 | 0.84 | 0.57 |
| 14 | 20050521.1 | 10.78 | 14.2 | 6.26 | 34 | 20090408.1 | 2.34 | 2.74 | 1.06 |
| 15 | 20060707.1 | 4.61 | 6.09 | 3.54 | 35 | 20090526.1 | 7.57 | 7.16 | 4.82 |
| 16 | 20061001.1 | 9.35 | 3.92 | 8.57 | 36 | 20090607.1 | 1.78 | 1.72 | 1.07 |
| 17 | 20070115.1 | 8.97 | 8.99 | 6.63 | 37 | 20090620.1 | 4.87 | 4.1 | 2.12 |
| 18 | 20070706.1 | 8.81 | 7.21 | 11.12 | SCRU PRUEBA | | | | |
| 19 | 20070911.1 | 3.55 | 2.8 | 3.17 | 6 | 20020130.1 | 10.75 | 9.57 | 6.01 |
| 20 | 20070915.1 | 3.33 | 3.07 | 2.39 | 9 | 20030802.1 | 7.98 | 5.19 | 4.13 |
| 21 | 20071001.1 | 3.2 | 3 | 2.28 | 11 | 20040807.1 | 23.64 | 20.59 | 11.59 |
| 22 | 20071020.1 | 8.19 | 7.57 | 4.88 | 12 | 20040818.1 | 49.39 | 44.14 | 22.81 |
| 23 | 20071024.1 | 2.37 | 2.22 | 1.61 | 26 | 20080212.1 | 80.3 | 53.06 | 55.38 |

Durante el proceso de entrenamiento se observó que las RNA's presentaban limitaciones para representar valores máximos, específicamente los valores de aceleración asociados a los sismos 199909.301 con magnitud de 7.6 en las estaciones LANE y RIOG y el 200802.121 en la estación SCRU. Como solución a esta dificultad se decidió integrar un sismo mas a los conjuntos de entrenamiento de las tres estaciones, el cual se obtuvo utilizando las leyes de atenuación de Esteva y Villaverde (ref 47) y Esteva (ref 48) para obtener una aceleración en función de una magnitud de 8 para

LANE y RIOG y con magnitud 7 para SCRUI, la distancia epicentral y el azimut permanecieron constantes a los valores originales de los sismos base que causaron este impedimento en la red. Enseguida se presentan las leyes de atenuación utilizadas así como los parámetros de los sismos obtenidos mediante ellas.

$$a = 1230e^{0.8M}(R + 25)^{-2} \quad \dots 4.1$$

Donde M es la magnitud y R es la distancia hipocentral

$$a = 2000 e^{0.8M} R^{-2} \quad \dots 4.2$$

Donde M es la magnitud y R es la distancia focal efectiva

Tabla IV.8 Sismos obtenidos mediante leyes de atenuación

| Sismo | M | De (km) | Az (°) | Amax por componente (cm/s ²) | | |
|---------------|-----|---------|--------|--|--------|--------|
| | | | | EO | NS | V |
| LANE9909.301 | 7.6 | 16 | 89.27 | 251.84 | 238.90 | 209.13 |
| Ec. 4.1 | 8 | 16 | 89.27 | 326.34 | | |
| RIOG9909.301 | 7.6 | 44 | 98.89 | 290.59 | 307.50 | 230.99 |
| Ec. 4.2 | 8 | 44 | 98.89 | 389.29 | | |
| SCRUI0802.121 | 6.6 | 71 | 89.79 | 80.3 | 53.06 | 55.38 |
| Ec. 4.1 | 7 | 71 | 89.79 | 63.33 | | |

Al integrar estos sismos a los conjuntos de entrenamiento se observó que la red pudo aprender a relacionar los valores de manera aceptable.

En este trabajo se optó por utilizar una función sigmoïdal, como función de transferencia para todas las capas ocultas y como función de transferencia en la capa de salida una función lineal.

Las arquitecturas empleadas en el entrenamiento del modelo se realizaron mediante el software de redes neuronales para Windows, *Thinks Pro* (ref 49), el cual se basa en procesos iterativos. Dicho programa grafica la superficie de error en tiempo real, y por experiencia se fija un mínimo, el cual se decide que es el mínimo global, en general

este proceso depende del conocimiento del fenómeno a modelar y de la habilidad de quien diseñe la RNA.

La regla que dio mejores resultados en el entrenamiento de las redes fue el algoritmo de *Levenberg Marquardt* que minimiza el cuadrado de las diferencias entre la respuesta o salida deseada y la salida de la red.

La tabla IV.9 muestran las arquitecturas empleadas en las redes de la siguiente forma: nodos entradas X nodos primera capa oculta X nodos segunda capa oculta X nodos salida.

Tabla IV.9 Arreglos empleadas en el modelo

| RED | ARQUITECTURA | No. ITERACIÓN |
|------------|--------------|---------------|
| EW LANE | 3X20X10X5X1 | 57 |
| NS LANE | 3X100X1 | 30 |
| VERT LANE | 3X100X1 | 67 |
| EW RIOG | 3X20X10X1 | 57 |
| NS RIOG | 3X40X10X1 | 54 |
| VERT RIOG | 3X20X10X1 | 37 |
| EW SCRUI | 3X100X1 | 49 |
| NS SCRUI | 3X100X1 | 48 |
| VERT SCRUI | 3X9X6X3X1 | 49 |

IV.4 RESULTADOS

La selección de los parámetros de entrenamiento así como el diseño de las RNA, se realizaron con la idea fundamental de que la red tuviera capacidad predictiva, con eventos no utilizados en el entrenamiento, así como ante otros que todavía no ocurren pero que, debida a la zona de la República Mexicana, para la cual se realizó el modelo, tienen gran probabilidad de presentarse en un futuro. En el proceso de

prueba se utilizaron datos reales (sin utilizar leyes de atenuación) que no se incluyeron durante la etapa de entrenamiento.

La figura IV.4 muestra los resultados del proceso de prueba de las tres estaciones, en donde para interpretarlos se parte de que, si una red tiene una perfecta etapa de prueba los resultados obtenidos de esta deberán ajustarse a una recta de 45°, ya que en el eje de las abscisas se encuentran las aceleraciones reales, y en el eje de las ordenadas los valores estimados por la RNA.

La primer gráfica es la correspondiente a la estación LANE, debajo se encuentran los resultados de la estación RIOG, en ambas gráficas se aprecia una mayor dispersión cuando la aceleración es superior a 200 cm/s². En la estación LANE el punto que se encuentra más separado de la recta es el del sismo 19990930.1 en la componente este-oeste, donde la red sobre estimó en un 27% el valor real de la aceleración. Para la estación RIOG el punto que mayor dispersión presenta, corresponde al mismo sismo sólo que un su componente vertical, donde se presenta una sobre estimación de 30%. Al final de esta figura se presentan los resultados obtenidos para la estación SCRJ, los cinco sismos que integraron esta etapa son sismos que no rebasan los 85 cm/s², es por ello que esta gráfica tiene una escala diferente a las anteriores. El error más grande que se obtuvo fue para el sismo 20080212.1 en la componente este-oeste, la red sub estimó el valor de la aceleración en un 45%.

En la figura IV.5 se presenta de manera global, los resultados del proceso de prueba del modelo, las tres estaciones con sus tres componentes.

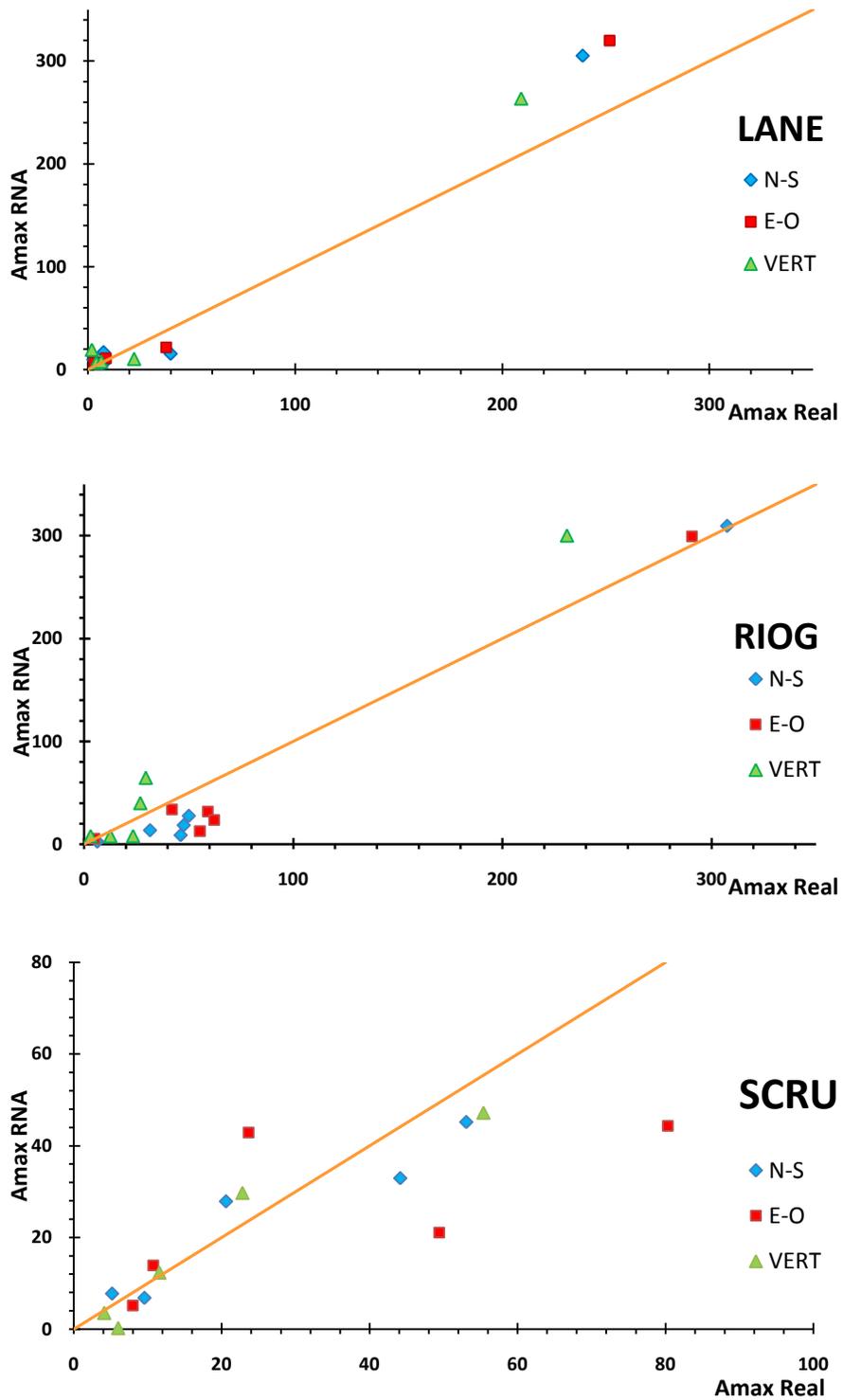


Figura IV.4 Resultados de las tres estaciones

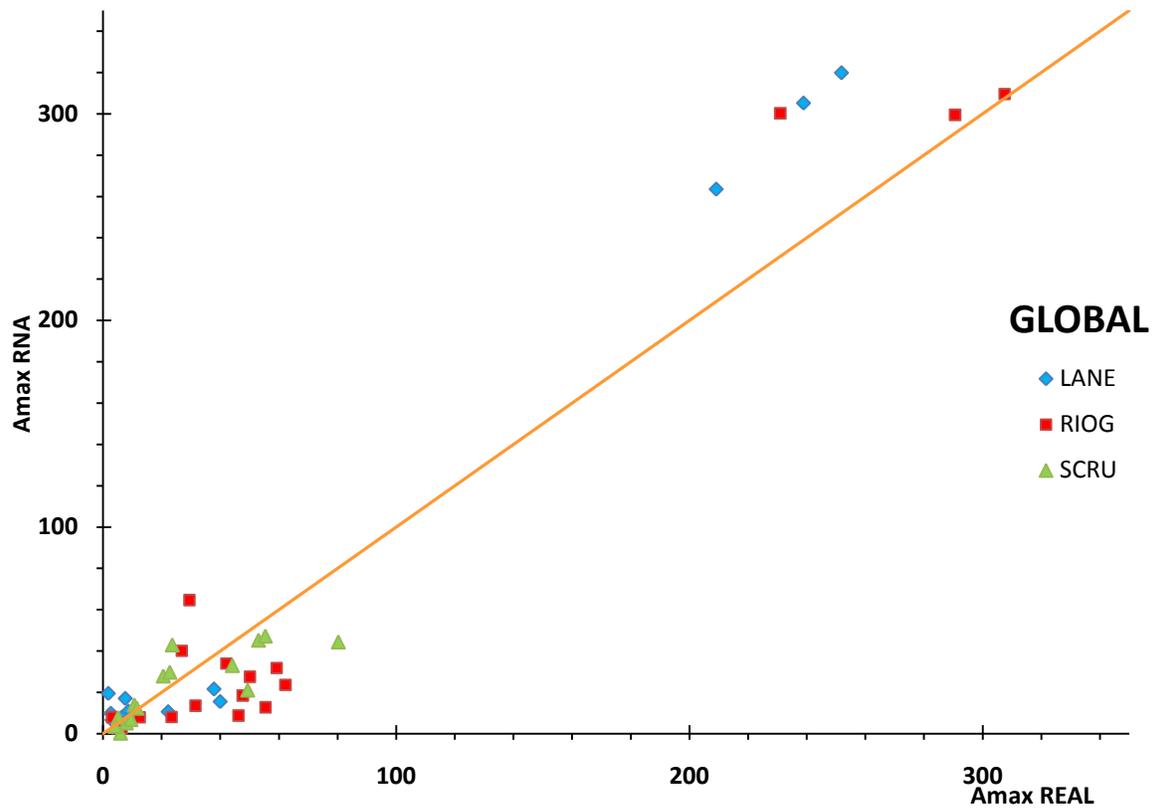


Figura IV.5 Resultados de las tres estaciones con sus tres componentes

V. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

V. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

CONCLUSIONES

Se propone un modelo basado en las redes neuronales artificiales, para la estimación de la aceleración máxima del terreno producida por sismos en la costa de Oaxaca y considerando los registros obtenidos en las estaciones LANE, RIOG y SCRU, desde 1998 a 2009. Se consideró que los parámetros fundamentales que definen el fenómeno son la magnitud del sismo (M), la distancia epicentral (De) y el azimut (Az).

El banco de datos con los que se realizó el modelo constó de 123 registros de las tres estaciones de la Red Acelerografica de la Costa de Oaxaca (RACO) instalada y operada por el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Los principales motivos para la elección de estas estaciones fueron su ubicación cercana a la costa, el número de registros con los que cuenta cada una y por último, que las tres se encuentran desplantadas sobre roca, por lo que los registros obtenidos no están afectados por ningún efecto de sitio.

Una limitante que se presentó al momento de entrenar la red, es que si no se cuenta con un sismo de magnitud similar en la etapa de entrenamiento a la etapa de prueba, la red no cuenta con suficiente capacidad para encontrar la relación

existente entre la información recibida y la información que da como salida, es por ello que se optó por la integración de un sismo sintético, obtenido mediante el uso de una ecuación de atenuación, al conjunto de entrenamiento. Las ecuaciones con las que se obtuvo una mejor estimación fueron las que realizó Esteva y Villaverde en 1974 y Esteva en 1968. Aquí se debe recalcar que el sismo sintético se incorporó únicamente al conjunto de entrenamiento de las RNA's, en tanto que en el conjunto de prueba está integrado en su totalidad por sismos con información original y que nunca fue presentada en el conjunto de entrenamiento.

Los resultados obtenidos en la estación LANE y RIOG son aceptables salvo para el caso de la estimación del sismo 19990930.1 donde las redes sobre estimaron los valores reales. Para la estación SCRUI se cuenta con una mejor estimación, debido a las redes muestran una dispersión menor en los sismos de aceleraciones pequeñas, ya que se cuenta con mayor cantidad de registros sísmicos.

COMENTARIOS

Es de vital importancia que se cuente con un número suficientemente representativo del fenómeno para integrar el conjunto de entrenamiento de las RNA's, de lo contrario se presentarían problemas en cuanto se entre a la fase de aprendizaje. Debido que este es un proceso de prueba y error, es difícil determinar el número de registros con los que debe contar el conjunto de entrenamiento, la única herramienta con la que se cuenta son los resultados de entrenamiento y las pruebas hechas.

Una cuestión más que se presenta con el entrenamiento de una RNA, es que aún con una experiencia sobrada por parte del diseñador de la red, nunca se tendrá la seguridad absoluta de que se alcanzó el error mínimo global. Sin embargo si el error encontrado se mantiene constante o disminuye muy poco y los resultados que se obtienen del conjunto de prueba presentan alta relación con los reales se puede tener confianza en que la red está bien entrenada y con posibilidades de generalización a partir de los patrones de entrenamiento.

Anexo

FALLAS GEOLÓGICAS

En función de los esfuerzos que las originan y los movimientos relativos de los bloques, las fallas geológicas se clasifican en tres tipos principalmente:

- Fallas Normales: se generan por esfuerzos de tensión que provocan que el bloque que se desliza hacia abajo también llamado bloque de techo, descienda y el bloque de piso ascienda, otra característica de este tipo de falla es que el movimiento predominantemente es vertical respecto al plano de falla, el cual generalmente tiene un ángulo de 60 grados respecto a la horizontal. Una forma más de diferenciar estas fallas es considerando fijo al bloque de piso, que es el que se encuentra por debajo del plano de la falla, da la impresión que el bloque de techo cae con respecto a este.

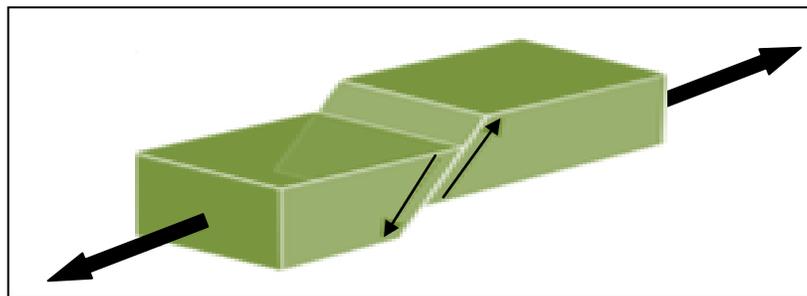


Figura A.1 Falla Normal

- Fallas Inversas: estos tipos de fallas son provocadas por esfuerzos de compresión, ocasionando que el bloque de techo ascienda sobre el bloque de piso. El movimiento que se presenta es preferentemente horizontal y el plano de falla presenta típicamente un ángulo de 30 grados respecto a la horizontal, en caso que las fallas inversas presentan un ángulo inferior a 45° estas fallas se denominan de cabalgamiento.

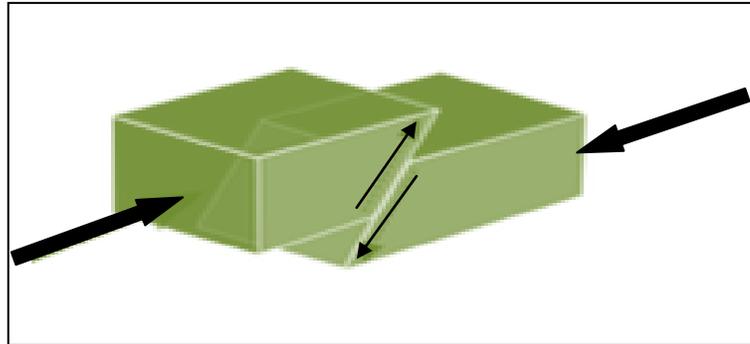


Figura A.2 Falla Inversa

- Falla transcurrente o de desgarre: el plano de falla que presenta es vertical y el movimiento de los bloques es horizontal, se distinguen dos tipos de fallas de desgarre derechas e izquierdas, en donde las derechas son aquellas donde el movimiento relativo de los bloques es hacia la derecha, en tanto que en las izquierdas es el opuesto.

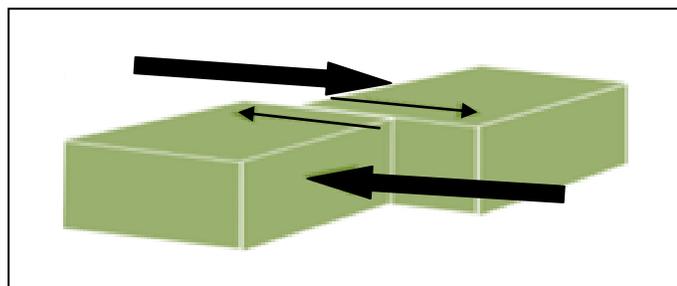


Figura A.3 Falla Transcurrente

INTENSIDAD

La Intensidad sísmica es una medida de los efectos de un temblor en el hombre, en las obras artificiales y en la naturaleza, en un lugar determinado. Los primeros trabajos datan desde 1873 (ref 50), donde el italiano Michelle Stefano Conte de Rossi y el suizo François Alphonse Forel basados en datos empíricos, propusieron escalas de intensidades sísmicas independientes, que posteriormente unificaron, donde por conveniencia asignaron 10 grados, formando la escala Rossi-Forel para intensidades.

En 1902 Mercalli perfeccionó dicha escala introduciendo 12 grados, en 1931 fue corregida por Harry O. Wood y Frank Neumann y desde entonces se llamo "Escala Modificada de Mercalli" (MM), los grados de intensidad se representan por números romanos del I al XII. En 1956 la escala MM fue enriquecida aun mas, ya que se le incorporó una clasificación de distintos tipos de estructuras, esta es muy utilizada en América, aunque no es la única.

La clasificación de las estructuras, según su capacidad de resistir temblores, es la siguiente (ref 51):

- Tipo A: Estructuras de concreto armado o acero, calculadas para resistir fuerzas horizontales y muy bien detalladas en los planos. Mano de obra y supervisión de la construcción excelentes. Materiales de primera calidad.

- Tipo B: Estructuras convencionales de concreto armado, mampostería reforzada o acero, no diseñadas en detalle para resistir fuerzas laterales. Mano de obra, supervisión y materiales, buenos.
- Tipo C: Construcciones no muy débiles, aun con estructura interna de concreto armado, mampostería reforzada o acero, pero no diseñadas ni construidas para resistir fuerzas horizontales. Mano de obra, supervisión y materiales ordinarios.
- Tipo D: Construcciones sin estructura alguna y muy débiles para resistir fuerzas horizontales. Mano de obra de baja calidad y materiales como el adobe.

Para tener una mejor comprensión de la escala de intensidades hay que considerar independientemente los efectos de los temblores en la naturaleza, el hombre y en sus obras, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla A.1 Escala de Intensidades de Mercalli Modificada (ref 52)

| GRADO | DESCRIPCIÓN | NATURALEZA | HOMBRE | CONSTRUCCIONES (ESTRUCTURAS) |
|-------|---|------------|--------------------------|------------------------------|
| I | El movimiento es tan leve que no es sentido por las personas, registrado por instrumentos sísmicos. | No sentido | | |
| II | El movimiento es sentido sólo por pocas personas en reposo, especialmente aquellas que se encuentran en los niveles superiores de un edificio, objetos suspendidos pueden oscilar. | No sentido | Sentido excepcionalmente | No sentido |
| III | Es sentido en el interior de las edificaciones, especialmente en los pisos superiores de los edificios, pero muchos pueden no reconocerlo como sismo ya que la vibración es semejante a la producida por el paso de un vehículo liviano. | No sentido | Sentido dentro | No sentido |
| IV | Objetos suspendidos oscilan libremente, la vibración es semejante a la producida por el paso de un vehículo pesado, los vehículos estacionados se bambolean, cristalería y vidrios suena, puertas y paredes de madera crujen. | No sentido | Sentido dentro | No sentido |
| V | Sentido aún en el exterior de los edificios, permite estimar la dirección de las ondas, personas dormidas se despiertan, el contenido líquido en recipientes y tanques es perturbado, objetos inestables son desplazados, relojes de péndulo se detienen. | No sentido | Sentido afuera | No sentido |

Tabla 2.1 (Continuación)

| GRADO | DESCRIPCIÓN | NATURALEZA | HOMBRE | CONSTRUCCIONES (ESTRUCTURAS) |
|-------|--|---|--|---|
| VI | Sentido por todas las personas, muchos sufren pánico y corren hacia el exterior, se tiene dificultad en caminar establemente, vidrios se quiebran, libros y objetos son lanzados de los anaqueles y estantes, los muebles son desplazados o volcados, el repello de mortero de baja calidad se fisura. | No sentido | Sentido por todos | Grietas en las estructuras tipo D |
| VII | Se tiene dificultad en mantenerse en pie, es percibido por conductores de vehículos en marcha, las chimeneas se fracturan a nivel de techo, caída del aplanado de mortero, algunas grietas en mampostería de calidad media, ondas en embalses y depósitos de agua. | Pequeños derrumbes, hundimientos en bancos de arena y grava | Difícil mantenerse en pie. Percibido por los choferes | En las estructuras tipo D se presenta daño moderado y en tipo C Grietas |
| VIII | La conducción de vehículos se dificulta, caída de chimeneas de fábrica, monumentos y tanques elevados, algunas ramas de árboles se quiebran, cambio de flujo o temperatura de pozos de agua, grietas en terreno húmedo y en taludes inclinados. | Ramas de los árboles desgajadas. Cambio en el flujo y temperatura de fuentes, grietas en tierra húmeda | Conducción de vehículos afectada | Grave daño en estructuras tipo D y daño moderado en tipo C |
| IX | Pánico general, daños de embalses y depósitos de agua, ruptura de tuberías enterradas, grietas significativas visibles en el terreno. | Grandes grietas en el suelo, cráteres de arena | Pánico general | Estructuras tipo D destruidas, daño severo en tipo C y B, daño leve en tipo A |
| X | La mayoría de las construcciones de mampostería destruidas, algunas construcciones de madera de buena calidad dañadas, puentes destruidos, daño severo a represas, diques y terraplenes, grandes deslizamientos de tierra, el agua se rebalsa en los bordes de los ríos, lagos y embalses, rieles de ferrocarril deformados ligeramente. | Grandes derrumbes desplazamiento horizontal de tierra plana y en playas | Pánico general | Destrucción en estructuras tipo D, destrucción moderada en tipo C, destrucción leve en tipo B y daño moderado en tipo A |
| XI | Los rieles del ferrocarril deformados severamente, ruptura de tuberías enterradas que quedan fuera de servicio. | Grandes grietas en la tierra y deslizamientos. Grandes cantidades de agua son inyectadas, mezcladas con lodo y arena, posibles tsunamis | Pánico general | Las tuberías subterráneas de agua, gas, luz y teléfono quedan fuera de servicio |
| XII | Destrucción total, grandes masas de roca desplazadas, las líneas de visión óptica distorsionadas, objetos lanzados al aire. | Desplazamientos de grandes masas de roca. Objetos lanzados al aire | Pánico general | Catástrofe |

MAGNITUD

La escala de intensidades solo nos da una idea somera e incompleta de lo que es un sismo, ya que si un temblor muy fuerte se presenta en un lugar remoto, sin testigos que pudieran verificar sus efectos, dicho temblor pasaría inadvertido, por el contrario si un sismo superficial pequeño, cuyo epicentro sea una ciudad, podría generar una situación de desastre, cuando en realidad es mucho menor que el que se presentó en el lugar apartado. La escala de magnitudes está asociada a la energía de un temblor basada en el registro sísmico.

En 1935 Charles F. Richter y Beno Gutenberg, desarrollaron una escala para medir la magnitud de los terremotos, la cual lleva el nombre del primer autor, quien hizo la siguiente reflexión (ref 53):

“Si dos temblores suceden en el mismo sitio, el más fuerte dejará un trazo mayor en el papel de registro de una estación sismológica. Se puede, por lo tanto, tener una apreciación de la fuerza y energía de los temblores comparando los trazos de las amplitudes de las ondas registradas.”

La magnitud no mide directamente la energía liberada de un temblor, pero es evidente que un trazo mayor en un mismo sismógrafo fue escrito por un temblor mayor a igual distancia. Existen ecuaciones empíricas que involucran a la magnitud con las que se puede obtener dicha energía.

Aunque cada sismo tiene una magnitud única, su efecto variará grandemente según la distancia, las características del terreno, los estándares de construcción y otros factores. Si se dispone de muchas estaciones diseminadas en una vasta región, con instrumentos idénticos que respondan de la misma manera a las distintas clases de ondas generadas por los sismos, se podrá hacer una comparación entre los trazos registrados en cada una de ellas. Todas, aún las más alejadas, registrarán proporcionalmente una onda de mayor amplitud con un temblor más fuerte que con uno débil.

Teóricamente la magnitud no tiene límite superior, pero está limitada por la resistencia de las rocas de la corteza terrestre y la longitud de ruptura probable de la falla, aunque nunca se ha observado un terremoto de magnitud superior a 10, este límite representa una condición natural del comportamiento de las rocas.

Para poder determinar la magnitud se han creado diferentes escalas, dependiendo del tipo de onda en que se basa la medición, algunas de ellas son:

- Magnitud Local (ML): escala introducida por Richter en 1935 (ref 54), con el objetivo de clasificar los temblores del sur de California en E.U., para un radio de 600 km a partir de la máxima amplitud registrada por un sismógrafo Wood Anderson. Como Richter definió esta magnitud utilizando información de la red sísmica de California y la utilizó para sismos de esta región es una escala local, de ahí su nombre. El uso de esta escala es apropiado para temblores cuyo foco no sea mayor a los 20 km de profundidad y distancias no mayores a los 600 km de una estación dada. La ecuación es la siguiente:

$$ML = \log A - \log A_0 \quad \dots A.1$$

Donde A es la máxima amplitud en el sismograma de un temblor y A_0 es la máxima amplitud del temblor patrón. El temblor patrón de magnitud cero se define como aquel que teniendo su epicentro a 100 km de distancia, deja una traza de una micra en el registro o sismograma producido por un sismógrafo Wood-Anderson.

- Magnitud ondas superficiales (M_s): esta escala fue diseñada por Richter y Gutenberg en 1936 (ref 55), cuya aplicación es para temblores lejanos registrados con otro tipo de sismógrafos. Para esta magnitud se utilizan las ondas superficiales Rayleigh con periodo de 20 segundos. La ecuación para determinar la magnitud por este criterio es:

$$M_s = \log A - \log B + C + D \quad \dots A.2$$

En esta ecuación A es la máxima amplitud de la onda superficial con periodo aproximado de 20 segundos (medida en micrómetros), B es el valor de la máxima amplitud horizontal calculada para un evento de magnitud cero (en micrómetros) a la misma distancia focal, por último C y D son constantes dependientes de cada estación ya que dependen del tipo de suelo en donde está construida la misma, el instrumento, la profundidad focal, atenuación, etc.

- Magnitud de ondas de cuerpo (m_b): entre 1945 y 1956 Gutenberg (ref 56) desarrolló una nueva escala aplicable a temblores profundos (ya que generan menos ondas superficiales) utilizando la amplitud de las ondas internas. La ecuación es la siguiente:

$$m_b = \log \frac{A}{T} + B + C \quad \dots A.3$$

Donde A es la amplitud de la onda de cuerpo (en micrómetros), T es el periodo de la onda (en segundos), B y C son constantes dependientes de las características del sismo y la estación sismológica.

- Magnitud de momento sísmico (M_w): escala desarrollada por Hiroo Kanamori (ref 57), basada en el valor de la energía liberada en el foco o momento sísmico, que se determina a partir del espectro de amplitudes para bajas frecuencias. Para determinarla se utiliza la siguiente ecuación:

$$M_w = \frac{2}{3} \log M_0 - 10.7 \quad \dots A.4$$

Donde M_0 es el momento sísmico medido en dinas-cm. Con esta ecuación las magnitudes de los sismos grandes fueron recalculadas, para algunos eventos, el cambio fue muy notorio, como ejemplo está el sismo de Chile de 1960, que

tenía una magnitud $M_s=8.3$ y que al calcularle la magnitud de momento fue de 9.5, convirtiéndose en el sismo de mayor magnitud hasta hoy registrado.

Existen más tipos de escalas para poder medir la magnitud de un temblor sin embargo, sólo se presentan estas, debido que son las que se utilizan en esta tesis.

ONDAS SÍSMICAS

Al ocurrir un sismo la energía es liberada en forma de ondas sísmicas, clasificadas como de cuerpo y superficiales. Las de cuerpo viajan por el interior de la Tierra y se dividen en dos tipos, P o primarias y S o secundarias, denominadas así por la llegada de estas a las estaciones donde es registrado el sismo.

Las ondas P producen compresiones y dilataciones en el medio, se propagan longitudinalmente, su amplitud es pequeña y su periodo corto. Son capaces de viajar a través de materiales sólidos y líquidos, con una velocidad de propagación del orden de 5 km/s en las rocas graníticas cercanas a la superficie y de 11 km/s en el interior de la Tierra (ref 58). Esta es la más veloz de todas las ondas sísmicas ya que es la primera en llegar a cualquier punto, en ser sentida y registrada en los sismogramas.

En las ondas S, las partículas del medio se desplazan perpendicularmente a la dirección de propagación, son de mayor amplitud y de periodos más largos que las primarias. Atraviesan las capas del interior de la Tierra con velocidades que oscilan entre 0.5 y 4.4 km/s, debido a que su trayectoria no es recta y su propagación produce un esfuerzo cortante en el medio, de ahí que también se les conozca como

de corte o cizalla. Las ondas de corte no se propagan dentro de los líquidos, debido a que los esfuerzos cortantes que pueden soportar estos, son muy pequeños. En la figura A.1 se aprecia un esquema de ambas ondas.

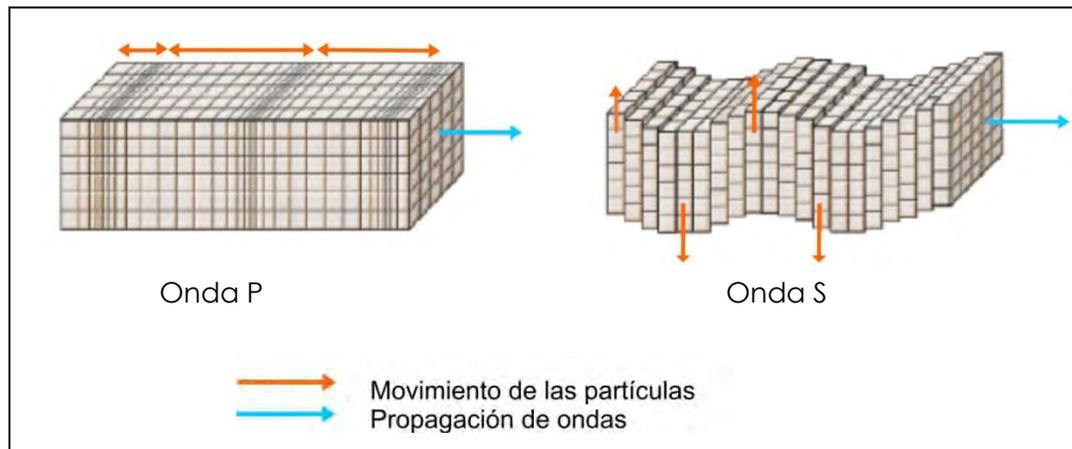


Figura A.4 Esquema ondas P y ondas S (ref 59)

Por otra parte las ondas superficiales, como su nombre lo indica, se propagan superficialmente en la corteza terrestre, donde alcanzan su máxima amplitud, que va disminuyendo, conforme va aumentando la profundidad. Los dos tipos de ondas superficiales más conocidos son las Love y Rayleigh, las primeras deforman al medio, en forma similar a las S, aunque solamente en dirección horizontal, son más lentas que las de cuerpo con velocidades de 1 a 4.5 km/s. Las segundas producen un movimiento vertical en forma de elipse retrograda, similar al de las olas marinas, son las más lentas con velocidades que van de 1 a 4 km/s. En la figura A.2 se presenta un esquema de estas ondas.

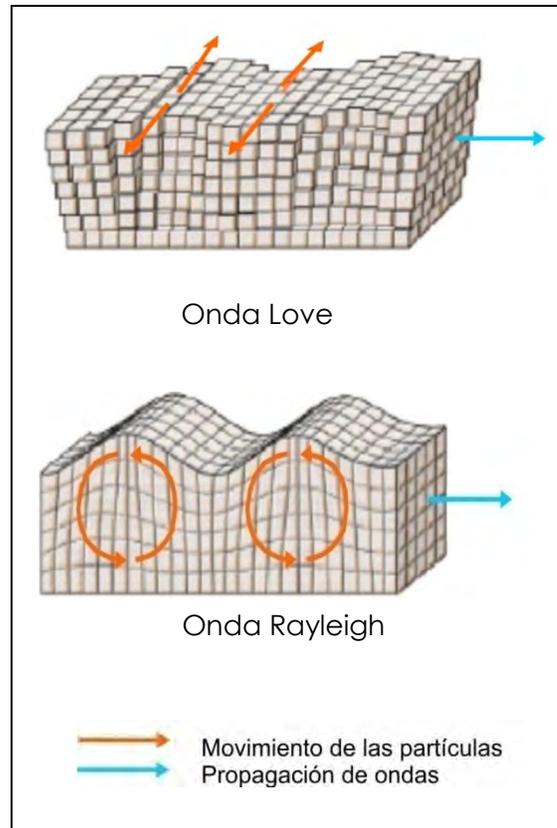


Figura A.5 Esquema onda Love y onda Rayleigh (ref 60)

REFERENCIAS

REFERENCIAS

1. Fraga G, (1986, 17 de septiembre), "El terremoto de 1985 hizo aflorar muchos de los desequilibrios estructurales de México", El País.com.
2. Bermeo M y Tapia M, (2010, 26 de marzo),"Terremoto será el segundo de mayor costo a nivel mundial para compañías de seguros", La Tercera, p.25.
3. Lobe J, (2010, 12 de marzo), "Recuperación necesita mucho más que efectivo", IPS noticias.
4. Bermeo M y Tapia M, (2010, 26 de marzo), *op cit*.
5. Global CMT Catalog,<<http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>>
6. Zúñiga Dávila F, "Notas introductorias Sismología", Posgrado en Ciencias de la Tierra, Centro de Geociencias, UNAM, México (2005)
7. Yamamoto J, "Terremotos una rendija al apocalipsis", Geografía Universal, SSN, Vol. 20, Núm. 5, México (1985)
8. <<http://www.kalipedia.com/geografia-mexico/tema/tectonica-placas.html>>
9. Gutiérrez C, et al, "Sismos", Serie Fascículos, CENAPRED, México (2001)
10. Protección Civil Oaxaca, "Sismicidad en el estado de Oaxaca 1990-2000", Gobierno del estado de Oaxaca, México (2000)
11. Ídem.
12. Ídem.

13. Lermo J, et al, "Microzonificación Sísmica y Análisis de amplificación relativa en la ciudad de Oaxaca", Informe elaborado para el CENAPRED (Primera Parte), México (1991)
14. Alcántara L, Ovando E, Macías M, "An Artificial Neural Tool To Estimate Response Spectra", 14^o European Conference on Earthquake Engineering, 30 de agosto al 3 de septiembre, Ohrid, República de Macedonia (2010)
15. Núñez F y Ponce L, "Zonas sísmicas de Oaxaca, México: sismos máximos y tiempos de recurrencia para el periodo 542-1988", Geofísica Internacional, Vol 28, Núm.4 , México (1989)
16. Ídem.
17. Ídem.
18. Singh S, Ordaz M, Pacheco J, Quaas R, Alcántara L, Alcocer S, Gutiérrez C, Meli R, Ovando E, et al, "A preliminary report on the Tehuacán, México Earthquake of June 15, 1999 (Mw=7.0)", *Seismological Research Letters*, (1999)
19. León J, "Información General acerca del subsuelo de 17 ciudades de México", VIII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Tomo II, Oaxaca, México (1976)
20. Protección Civil Oaxaca, (2000), *op cit*.
21. Servicio Sismológico Nacional, México
22. <www.library.thinkquest.org>
23. Servicio Sismológico Nacional, "Cien años de la instrumentación en México", Instituto de Geofísica, UNAM, <<http://secre.ssn.unam.mx/SSN/instrumentacion1>>
24. Alcántara L, Alcocer S, Almora D, Torres M, Sandoval H, Macías M, Vázquez R, Ayala M, Velasco J, Castro G, "Instalación y puesta en marcha de 35 estaciones acelerográficas con equipo sísmico especializado de la Red Sísmica Mexicana (Informe final etapa 3)", Instituto de Ingeniería, UNAM, México (2007)
25. Ídem.
26. Protección Civil Oaxaca,(2000), *op cit*.
27. Ídem.
28. Ídem.
29. Ídem.
30. Alcántara L, Ovando E, Almora D, Singh S, González G, Macías M, Posada A, Romo M, Sandoval H, Torres M, Vázquez R, Velasco J, Ayala M, Castro G, Pérez

-
- C, Ylizaliturri J, Vázquez E, Ruíz A, "Propagación de las ondas sísmicas de temblores generados en la costa de Oaxaca y los efectos locales producidos en la ciudad de Puebla, Informe final elaborado para CONACYT", Instituto de Ingeniería, UNAM, México (2002)
31. Baidyk T, Kussul E, "Redes neuronales, visión computacional y micromecánica", Itaca, México (2009)
 32. Russell S, Norvig P, "Inteligencia Artificial Un enfoque moderno" Pearson Prentice Hall , (2004)
 33. Ídem.
 34. Hilera J, Martínez V, "Redes neuronales artificiales. Fundamentos, modelos y aplicaciones", Addison-Wesley Iberoamericana, E.U.A (1995)
 35. Alcántara L, Ovando E, Macías M, "Estimación de espectros de respuesta utilizando redes neuronales artificiales ", 3º Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Asociación Española de Ingeniería Sísmica, Girona España (2007)
 36. Hilera J, Martínez V, (1995), op cit.
 37. Ídem.
 38. García S, Romo M, "Atenuación sísmica: una aproximación con redes neuronales artificiales", XIV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Guanajuato, México (2003)
 39. González C, Valdés J, "Aplicación de un modelo de redes neuronales en la identificación del daño estructural en un puente vehicular", Ciencia Ergo Sum, Año/Vol. 15,Núm. 002, Universidad Autónoma del Estado de México, México (2008)
 40. Lizarazo J, Gómez J, "Desarrollo de un modelo de redes neuronales artificiales para predecir la resistencia a la compresión y la resistividad eléctrica del concreto", Ingeniería e Investigación, Año/Vol. 27, Núm. 001, Universidad Nacional de Colombia, Colombia (2007)
 41. García S, Romo M," *Sand Behavior modeling using static and dynamic artificial neural networks*", Serie de investigación y desarrollo del Instituto de Ingeniería, UNAM, México (2002)
 42. Rangel J, Romo M, "Estimación de asentamientos superficiales por tuneleo en los suelos blandos de la ciudad de México mediante Redes Neuronales

- Artificiales", XX Reunión Nacional de Mecánica de Suelos , Oaxaca México (2000)
43. García S, Romo M, (2002) *op cit*.
 44. Alcántara L, Ovando E, Macías M, (2007) *op cit*.
 45. Alcántara L, Ovando E, Macías M, R A, "*Strong ground motion duration and response spectra using artificial neural networks*", 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing China (2008)
 46. Ruiz A, "Sistema Espectra versión 1.1", Software desarrollado por el Instituto de Ingeniería, UNAM, México (2008)
 47. Esteva L y Villaverde R, "*Seismic risk, design spectra and structural reliability*", Memorias del 4º Congreso Mundial de Ingeniería Sísmica, Roma, Italia (1974) p.2586-2597.
 48. Esteva L, "Bases para la formulación de decisiones de diseño sísmico", Publicación No. 182, Instituto de Ingeniería, UNAM, México (1968)
 49. Logical Designs, "Thinks Pro, Neural Networks for Windows", User's guide, E.U.A (1996)
 50. Comisión de Geofísica del Instituto Geográfico Militar de Chile, "Temblores de Tierra" , Instituto Panamericano de Geografía e Historia, Publicación 363, México (1977)
 51. Ídem.
 52. Ídem.
 53. Ídem.
 54. Servicio Nacional de Estudios Territoriales, <www.snet.gob.sv/ver/sismologia/>
 55. Zúñiga Dávila F, (2005) *op cit*.
 56. Ídem.
 57. Servicio Nacional de Estudios Territoriales, *op cit*.
 58. Nava A, "Terremotos", Fondo de Cultura Económica, Tercera edición, México (1998)
 59. <www.kalipedia.com/kalipediamedia/cienciasnaturales>
 60. Ídem.