

Universidad Autónoma de Baja California
Facultad de Ingeniería
Unidad Ensenada



Maestría en Ingeniería

**Desarrollo de una red neuronal híbrida
para la clasificación de registros sísmicos**

Tesis
Que para obtener el título de
Maestro en Ingeniería
presenta:

Juan Antonio Mendoza Camberos

Ensenada, B. C.

Diciembre del 2005

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIDAD ENSENADA

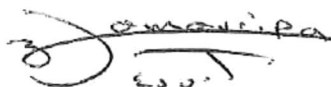
“Desarrollo de una red neuronal híbrida para la clasificación de registros sísmico”

TESIS

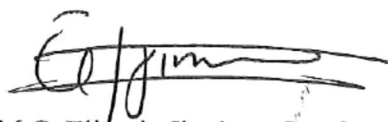
Que para obtener el grado de maestría en ingeniería presenta:

Juan Antonio Mendoza Camberos

Aprobada por:



Dr. José de Jesús Zamarripa Topete
Director de tesis



M.C. Elifania Jiménez García
Miembro del comité



Dr. Mario González Escobar
Miembro del comité

Ensenada Baja California, México. Diciembre 2005

Resumen

Desarrollo de una red neuronal híbrida para la clasificación de registros sísmicos.

En este trabajo se describe el desarrollo de una red neuronal híbrida, la cual se basa en el paradigma ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System), combinando lógica difusa con redes neuronales aplicada a la clasificación de registros sísmicos. El objetivo de este trabajo es automatizar la depuración de registros sísmicos logrando que la red neuronal híbrida, sea capaz de identificar dichos registros clasificándolos como ruido o evento sísmico.

Existen diferentes sistemas de detección automática de registros sísmicos los cuales emplean técnicas que funcionan sobre la base de algoritmos de detección. Los registros sísmicos que se obtienen mediante estos sistemas vienen acompañados de cierto porcentaje de ruido; esto quiere decir que algunos registros no son eventos que representan temblores sino que son disparos en falso, ruido ambiental o ruido provocado por algún elemento ajeno al sistema el cual hace que el algoritmo de detección se active. Generalmente el número de registros sísmicos es elevado, por ello la tarea de depurar dichos registros resulta ser una actividad sumamente tediosa.

El presente trabajo representa un apoyo a la Red Sismológica de la Paz, Baja California Sur, perteneciente al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE).

Abstract

Development of a hybrid neural network to classification of seismic data.

In this work we describe the development of a hybrid neural network, this is based upon the ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) paradigm, combining fuzzy logic with neural networks and apply to classification of seismic data. The main objective of this work is automatize the debugging of seismic data, achieving that the hybrid neural network be able to identify noise or seismic earthquake from data.

They exist different automatic detection systems to record seismic data, this systems use techniques that work based on detection algorithms. The seismic data obtained from this systems come with some noisy records; this mean that some seismic data does not represent earthquake but they are shots falsely, environment noise, or noise from other source, this fact does that the detection algorithms trigger. Usually the amount of seismic data is high, hence the task of debugging be tedious.

This work is support to the Seismic Network of La Paz, Baja California Sur, from the Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE).

Dedicatoria

A mi hijo Marquitos de quien he aprendido tantas cosas.

A mi Rosita a quien siempre la tengo presente.

A mis padres: Marcelino y Julia, por haberme dado la libertad de ser yo mismo.

A mis hermanos: Rubén, Marcela, Ángeles, Chuyito, Manuelito, Herminia y Consuelo con quienes he compartido toda esta vida.

A todos mis sobrinos por su cariño incondicional.

A dios por darme la vida.

Agradecimientos

A mi director de tesis el Dr. José de Jesús Zamarripa por que a pesar de sus múltiples ocupaciones siempre tubo un espacio de tiempo para ayudarme con este proyecto.

A la M.C. Elitania Jiménez por sus aportaciones a este proyecto.

Y muy en especial a mi amigo el Dr. Mario González Escobar por sus valiosos consejos y apoyo a través de todos estos años.

A mis maestros de la Facultad.

A mis compañeros de la Facultad, especialmente a Fabian y Enrique Colorado, con quienes compartí momentos muy gratos y aun seguimos en el camino.

A mi amigo Arturo Perez-Vertti por su apoyo, sugerencias y consejos.

A Mary Carmen por su ayuda y el café en la oficina.

Índice

	Página
Resumen.....	iii
Índice.....	vii
Lista de figuras.....	ix
Lista de tablas.....	x
Capítulo I Introducción.....	1
1.1 Planteamiento del problema.....	6
1.2 Hipótesis.....	9
1.3 Objetivos.....	9
1.4 Importancia de estudio.....	10
1.5 Limitaciones.....	13
Capítulo II Revisión bibliográfica.....	14
2.1 Softcomputing.....	14
2.2 Sistemas híbridos.....	16
2.2.1 Modelo de los sistemas híbridos.....	16
2.3 Redes neuronales.....	18
2.3.1 Neurona artificial.....	19
2.3.2 Clasificación de las redes neuronales.....	22
2.3.3 Características de las redes neuronales.....	26
2.3.4 Arquitectura de una red neuronal.....	27
2.4 Lógica difusa.....	28
2.4.1 Conjuntos difusos.....	30
2.4.2 Funciones de membresía.....	32
2.4.3 Operadores difusos.....	33
2.4.4 Lógica difusa y Probabilidad.....	34
2.4.5 Integración neurodifusa.....	34
2.5 Análisis de espectros.....	35
2.5.1 Formas de la transformada de Fourier.....	36
2.5.2 Los coeficientes de Fourier.....	39
2.5.3 Trampas en la transformada rápida de Fourier	40
2.5.3.1 Formación de aliasés.....	41
2.5.3.2 Fugas.....	43
2.5.3.3 El efecto palizada.....	44
2.6 Sismología.....	45
2.6.1 Fuente sísmica.....	47
2.6.2 Ondas sísmicas.....	49
2.6.3 Riesgo sísmico.....	55
2.7 Sumario.....	56

Índice (continuación)

	Página
Capítulo III Metodología.....	58
3.1 Esquema general del sistema.....	58
3.1.1 Estaciones sismológicas.....	59
3.1.2 Recolección de registros sísmicos.....	60
3.1.3 Registros sísmicos.....	62
3.1.4 Equipo de cómputo.....	62
3.1.5 Software de apoyo.....	63
3.2 La red neuronal híbrida.....	63
3.3 Desarrollo de la red neuronal híbrida.....	65
3.3.1 Preparación de la entrada a la red neuronal híbrida.....	66
3.3.2 Topología de la red neuronal híbrida.....	67
3.3.3 Fase de aprendizaje.....	68
Capítulo IV Resultados.....	71
4.1 Prueba de la red neuronal híbrida.....	72
Capítulo V Conclusiones.....	74
Apéndice A.....	75
Definición de términos.....	75
Referencias bibliográficas.....	81

Lista de figuras

Figura		Página
1	Ubicación geográfica de la región La Paz-Los Cabos donde se encuentra instalada la Red Sismológica de La Paz, B.C.S.....	11
2	Integración de técnicas softcomputing.....	15
3	Esquema de un sistema híbrido.....	17
4	Representación de una neurona artificial tipo McCulloch-Pitts.....	19
5	Función de pertenencia del conjunto difuso "persona mayor".....	31
6	Conjuntos tradicionales y difusos para BAJO y ALTO.....	32
7	Formación de alias.....	42
8	Truncado de datos y la provocación de fugas.....	43
9	El efecto palizada.....	45
10	Ondas senoidales sumadas para obtener un pulso.....	50
11	Ondas P y S, en un sismograma.....	52
12	Esquema general del sistema.....	58
13	Estación sismológica.....	59
14 a)	Grabadora digital K2.....	60
14 b)	Acelerómetro FBA-23.....	60
15 a)	Antena GPS.....	60
15 b)	Equipo de alimentación de energía autónomo.....	60
16	Estación sismológica en una isla del Golfo de California.....	61
17	Procedimiento ANFIS.....	65
18	Topología de la red neuronal híbrida.....	68
19 a)	Ruido.....	69
19 b)	Disparo en falso.....	69
20 a)	Evento sísmico.....	69
20 b)	Evento sísmico ruidoso.....	69
21	Fase de aprendizaje.....	70
22	Algunos datos de prueba.....	71
23	Prueba de la red neuronal híbrida.....	73
24	Algunos conceptos de sismología.....	75
25	Ondas P y ondas S.....	78

Lista de tablas

Tabla		Página
I	Funciones de activación más usuales.....	21

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN.

Las redes neuronales, lógica difusa, algoritmos genéticos y deducción probabilística, por mencionar algunas técnicas; se originaron independientes y con motivos diferentes entre sí. Softcomputing engloba la colección de estas técnicas de tal forma que al combinarlas se obtiene frecuentemente sistemas robustos que pueden operar con datos de entrada ruidosos o imprecisos.

Los paradigmas híbridos son un enfoque novedoso para la construcción de sistemas inteligentes. Se entiende que para resolver problemas reales se requiere de sistemas inteligentes que combinen conocimiento, técnicas y metodologías de varias fuentes. Suponemos que estos sistemas inteligentes poseen la experiencia de un dominio específico tal como los humanos, adaptándose y aprendiendo en ambientes dinámicos, y explicando como hacen sus decisiones o como toman sus acciones (Jang et. Al., 1997).

El paradigma ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) es una técnica que adapta automáticamente inferencias de tipo Sugeno, basándose en modelos de datos entrenados. Una inferencia de tipo Sugeno, es una inferencia difusa, en

la cual la consecuencia de cada regla es una combinación lineal de las entradas y la salida es una combinación lineal ponderada de las consecuencias. (Jang, 1993).

Las redes neuronales artificiales, basadas en el funcionamiento del sistema nervioso, son una familia más de técnicas numéricas de aprendizaje. Consisten de elementos computacionales no lineales los cuales forman los nodos o neuronas de la red, unidos por interconexiones las cuales tienen asociado un factor de peso. Cada una de estas neuronas suma las entradas ponderadas y su resultado pasa a través de una función no lineal conocida como función de activación. Las entradas a una neurona pueden provenir de fuentes externas o de otras neuronas en la red. Así mismo, la salida de una neurona es enviada a otras neuronas o al entorno. Son análogas en su estructura al sistema neurológico animal. Las redes neuronales artificiales son mucho más simples que las biológicas, por lo cual queda fuera de la realidad el esperar que produzcan el sofisticado comportamiento de humanos o animales. No obstante, pueden ejecutar ciertas tareas, particularmente clasificaciones, de una forma eficiente. Parte del atractivo de las redes neuronales es que cuando se encuentran con información o datos incompletos, pueden producir una respuesta aproximada en vez de una incorrecta (Hopgood, 1993).

La simulación de redes neuronales por computadoras u otros dispositivos electrónicos puede ser utilizada para resolver problemas los cuales requieran un enfoque similar al razonamiento humano y de esta forma hacer más eficiente la solución de problemas complejos (Roth et. Al., 1994).

En 1965 Lotfi A. Zadeh publicó su trabajo "Conjuntos difusos" los cuales describen la matemática de la teoría de los sistemas difusos, y por ende la lógica difusa. La noción central de sistemas difusos es que los valores de verdad (en lógica difusa) o valores miembros (en conjuntos difusos) son indicados por un valor en el rango $[0.0, 1.0]$ donde 0.0 representa absoluta falsedad y 1.0 representa absoluta verdad. Las aplicaciones donde puede ser generada o adaptada son muy amplias, y proveen la oportunidad para modelar condiciones en las cuales es inherente la imprecisión. Los sistemas basados en lógica difusa son una alternativa a las nociones tradicionales de membresía en conjuntos y lógica, lo cual provee una significativa y rica adición a la lógica estándar, generando soluciones precisas en base a información incierta o aproximada.

La Red Sismológica de La Paz, Baja California Sur pertenece al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) campus La Paz. Dicha red está compuesta por 10 estaciones sismológicas digitales, es

sustentada y mantenida en operación desde octubre de 1998 a la fecha por un grupo interdisciplinario de investigadores y técnicos.

Uno de los principales objetivos de la red es obtener información respecto a las características sismotectónicas del sur de la Provincia Extensional del Golfo de California. La red sismológica está compuesta por 10 estaciones digitales y 5 estaciones analógicas.

Para obtener los registros sismológicos se realiza una visita al lugar donde han sido instaladas las estaciones digitales, se utiliza una computadora personal portátil la cual se conecta a la grabadora digital por medio de un cable a través del puerto RS-232. Posteriormente se ejecuta un programa proporcionado por el fabricante de los equipos sismológicos, con el cual se entabla la comunicación entre ambos elementos y de esta forma se recuperan los registros que han sido almacenados en la memoria sólida de la grabadora digital.

Los registros sismológicos después de ser recuperados de las estaciones digitales, son llevados al laboratorio de sismología en CICESE La Paz. Los registros están en código binario, contienen una estructura formada por un encabezado y los datos correspondientes a cada traza. El encabezado contiene parámetros de

importancia para procesar el registro, los datos de la traza representan la información enviada a la grabadora digital por su respectivo acelerómetro.

La tarea de procesar y clasificar registros sismológicos se conoce en el ámbito de la sismología como depuración de datos. La depuración de datos consiste en visualizar los registros sismológicos utilizando un programa diseñado para tal fin. El programa despliega en pantalla el registro para que el operador identifique la forma de onda determinando si el registro fue un evento sísmico o ruido.

El procesamiento y clasificación de los registros sismológicos requiere de cierto conocimiento, entrenamiento y experiencia por parte del operador para poder reconocer visualmente formas y patrones en un sismograma, además involucra mucho tiempo (meses), ya que generalmente el número de registros es muy elevado. El análisis de los datos generalmente lo realiza el investigador y en ocasiones lo realiza un técnico especializado, la complejidad del análisis depende del tipo de trabajo o investigación que se esté llevando a cabo.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Hace un par de décadas, los equipos sismológicos con los que se trabajaba tenían características técnicas operativas muy limitadas comparados con los que existen actualmente. El promedio de los modelos de grabadoras digitales que existían contaban con una memoria sólida de tan solo 500 kilobytes de almacenamiento, en donde la cantidad de registros que se podían grabar era muy reducida. La depuración de los registros sismológicos en aquellos tiempos no representaba una tarea tediosa, puesto que la cantidad de registros que se manejaban no era muy grande.

La tecnología en la electrónica de las grabadoras sismológicas digitales ha estado en constante evolución, de tal forma que hoy contamos con grabadoras digitales que tienen una capacidad de almacenamiento de hasta 4 gigabytes de espacio en disco. Actualmente la red sismológica de La Paz, cuenta con 10 estaciones sismológicas digitales; de donde se obtiene aproximadamente 15,000 registros sismológicos mensualmente.

La depuración de los datos es realizada por una persona entrenada para tal efecto, dicha tarea consiste en tomar los registros obtenidos de las estaciones sismológicas y que han sido almacenados como archivos en discos compactos;

posteriormente se ejecuta un programa el cual ha sido proporcionado por el fabricante de las grabadoras digitales. Dicho programa despliega en pantalla el registro donde el operador identifica la forma de onda determinando si el registro fue un evento sísmico o ruido. Si el registro ha sido un evento sísmico se procede a tomar una serie de parámetros que son de importancia para el análisis posterior de los datos, en caso contrario se toma nota de que ha sido ruido y se continua progresivamente hasta terminar con todos los registros que haya que depurar.

Aparentemente esta tarea resulta relativamente fácil, pero considerando el hecho de que un gran número de eventos sísmicos presentan una forma de onda difícil de clasificar nuestra tarea resulta mucho más compleja. Existen eventos sísmicos que son ruidosos y esto dificulta hacer una identificación exacta. Algunos eventos resultan difíciles de clasificar aún para personas experimentadas.

Generalmente el volumen de registros es muy elevado, y esto a la larga lleva al operador a mostrarse cansado y agobiado por la tarea repetitiva que realiza, trayendo como consecuencia el cometer errores en las lecturas y por ende la perdida de exactitud en la clasificación de los registros sísmicos.

Se observa que el problema radica principalmente en la gran cantidad de registros que hay que depurar y debido a la naturaleza de dicha tarea el operador tiene que dedicarle muchas horas de trabajo, además de lo tediosa que resulta realizar una tarea repetitiva, creando la necesidad de automatizar la depuración de los registros sismológicos.

1.2 HIPÓTESIS.

¿La clasificación automática de registros sismológicos por medio de una red neuronal híbrida, será más rápida y factible que los métodos tradicionales que se utilizan actualmente?

1.3 OBJETIVOS.

Los objetivos del presente trabajo son los siguientes:

- 1 Se clasificarán los registros sismológicos obtenidos por estaciones sismológicas digitales, en forma automática.
- 2 Se desarrollará una red neuronal híbrida basándose en el paradigma ANFIS.
- 3 Se aplicará la red neuronal híbrida en los registros sismológicos, se compararán los resultados y el tiempo de ejecución, contra el procedimiento desarrollado manualmente por el operador.

1.4 IMPORTANCIA DE ESTUDIO.

A través de la historia de la humanidad, se ha observado lo destructivos que pueden ser los fenómenos naturales. Con la constante evolución de culturas, y basándose en descubrimientos y observaciones más precisas, se ha podido predecir o definir el comportamiento de algunos fenómenos naturales; como lo es el clima, las mareas, las estaciones del año, etc.

Uno de los fenómenos naturales que aún no se ha podido predecir es el movimiento interno de la tierra, es decir los sismos o temblores, esto se debe en gran parte a la cantidad de variables que involucra este fenómeno.

La red sismológica de La Paz, es parte de un proyecto multidisciplinario que se tiene actualmente en desarrollo y del cual uno de los principales objetivos es obtener información respecto a las características sismotectónicas del sur de la Provincia Extensional del Golfo de California. Por lo tanto, el objetivo de la red es registrar información sísmica que nos permita caracterizar los patrones espaciales de sismicidad en la región de La Paz-Los, Baja California Sur (Figura 1).

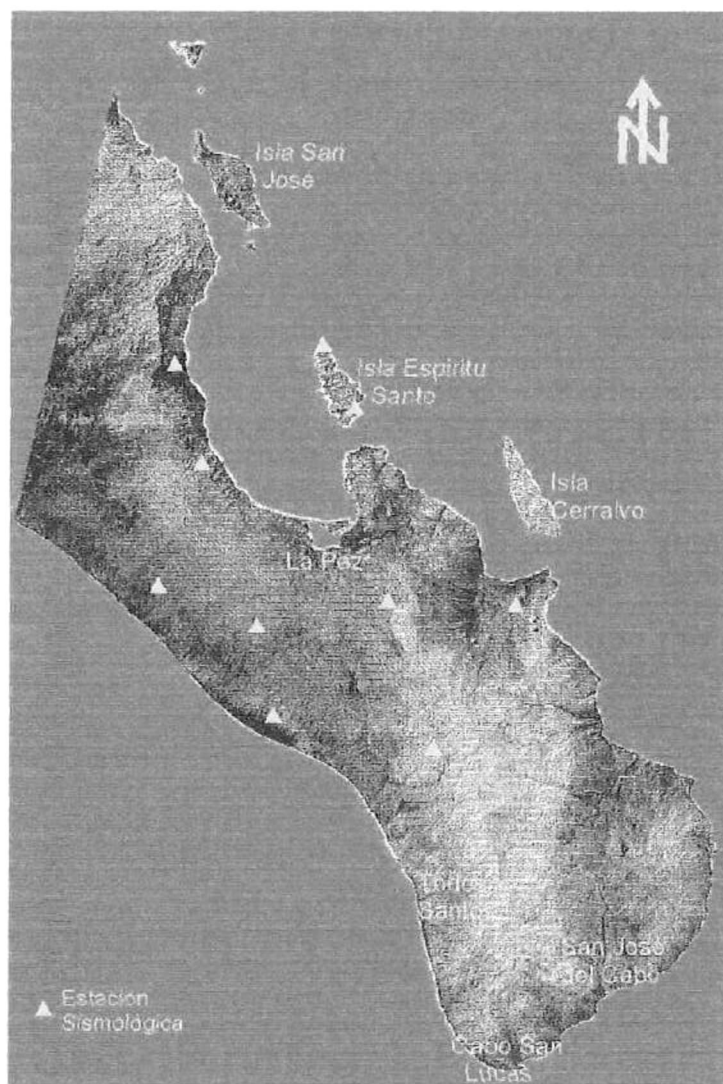


Figura 1.- Ubicación geográfica de la región La Paz-Los Cabos donde se encuentra instalada la Red Sismológica de La Paz, B.C.S.

En la región de La Paz-Los Cabos, la red se instaló en tres configuraciones distintas, con periodos de registros que van de 5 meses a un año, los cuales dependieron de la actividad sísmica observada en las diferentes áreas cubiertas por la red.

Un análisis preliminar de la información registrada en esta región indica que la gran mayoría de los eventos registrados continuaron ocurriendo predominantemente sobre el flanco este de las Islas Espíritu Santo. Los epicentros obtenidos están distribuidos en la zona donde fueron localizadas las réplicas de los fuertes temblores del 30 de junio de 1995, de magnitud 6.2 y 5.4. Aunque también se han registrado un número de micro sismos en los alrededores de la ciudad de La Paz, éstos no son tantos en comparación con lo observado en la zona de las islas mencionadas. (González, et al, 2002).

Como podemos observar la información obtenida por las redes sismológicas nos da una idea del peligro que representa para la población el permitir asentamientos en regiones catalogadas como de alto riesgo sísmico. El software que se desarrollará será con el fin de disminuir el esfuerzo y el tiempo requerido para obtener resultados ante un evento sísmico.

1.5 LIMITACIONES

Uno de los objetivos principales de la red sísmológica de La Paz, es conocer las características sismotectónicas del sur de la Provincia Extensional del Golfo de California, por lo tanto la región geográfica de interés en el presente estudio será el sur de la península de Baja California.

El software que se va a desarrollar clasificará los registros sísmológicos que han sido registrados exclusivamente por la red sísmológica de La Paz, Baja California Sur.

Existen diversas técnicas para clasificar registros o señales sísmológicas. La técnica utilizada en el presente trabajo, es desarrollar una red neuronal híbrida basándose en el paradigma ANFIS.

El software que se va a desarrollar leerá registros generados por las grabadoras digitales modelo K2 de Kinemetrics, estos registros son archivos almacenados en discos compactos.

CAPÍTULO II

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

En el presente capítulo se describen por separado los aspectos teóricos de los tópicos principales que aborda el trabajo de estudio.

2.1 SOFTCOMPUTING.

Softcomputing es una colección de técnicas que abarcan diversos campos que caen en varias categorías en inteligencia computacional. Softcomputing tiene tres ramas principales: Lógica Difusa, Computación Evolutiva (Algoritmos Genéticos) y Redes Neuronales (Figura 2). Algunas otras técnicas de Softcomputing no caen netamente bajo alguna de estas tres ramas. Estas pueden incluir Redes Bayesianas, Máquinas de Soporte Vectorial, Wavelets, Teoría de Fractales, por mencionar algunas.

Las soluciones en Softcomputing no son programadas para todos y cada uno de los posibles resultados. Más bien, el problema o tarea es representado de tal forma que un estado del sistema puede de alguna forma ser medido y comparado con algún otro estado deseado. La calidad de dicho estado en el sistema es la base para adaptar los parámetros del sistema, lo cual hace que el sistema tienda hacia una solución.

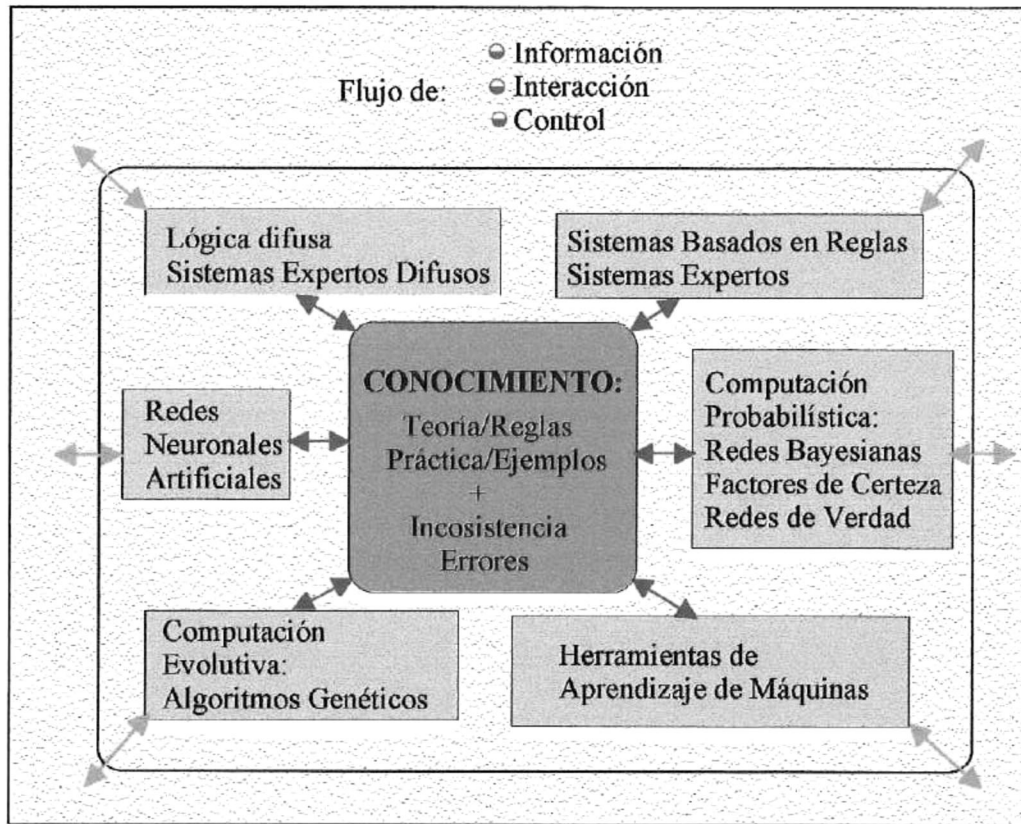


Figura 2.- Integración de técnicas softcomputing (PRIS 2002).

Softcomputing, hasta cierto punto, es inspirada en fenómenos humanos. Las redes neuronales tratan de imitar al cerebro animal, los algoritmos genéticos están fundados en la dinámica de la evolución Darwiniana, mientras que la lógica difusa es altamente motivada por la natural imprecisión del habla humana. Otras técnicas, como la teoría de fractales, se refiere a numerosos objetos o eventos los cuales pueden ser explicados como naturalmente ocurre en fractales tales como los patrones en una hoja, los copos de nieve o patrones del viento.

2.2 SISTEMAS HÍBRIDOS.

Los sistemas híbridos (Kandel 1992, Medsker 19994, Nikolopoulos 1997, Sun 1997, Cloete 2000) son sistemas computacionales los cuales integran principalmente técnicas de softcomputing tales como lógica difusa, neurocomputación, razonamiento probabilístico, algoritmos genéticos , sistemas caóticos y teoría de aprendizaje. Tales técnicas y metodologías son complementarias mas que competitivas y este hecho debe ser utilizado en combinación y no en exclusión, permitiendo tomar ventaja de la robustez de cada una de ellas. Los sistemas híbridos permiten la representación y manipulación de diferentes tipos y formas de datos y conocimiento los cuales pueden provenir de distintas fuentes. Esto permite a los sistemas híbridos manipular la información más eficientemente y desempeñarse mejor en comparación con los sistemas puramente convencionales.

2.2.1 MODELO DE LOS SISTEMAS HÍBRIDOS.

Los sistemas híbridos generalmente integran enfoques simbólicos y conexionistas para codificar y refinar su conocimiento. Los sistemas simbólicos convencionales de Inteligencia Artificial son fuertes en la representación y manipulación de conocimiento presentándonos un resultado comprensible mientras que modelos conexionistas tales como redes neuronales son herramientas poderosas para adquirir conocimiento a partir de datos numéricos.

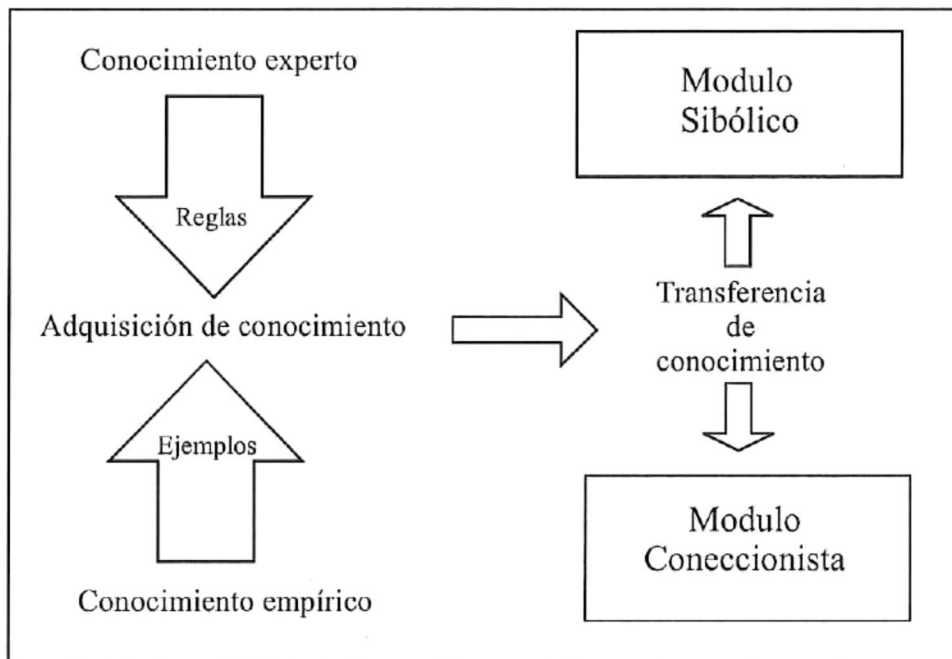


Figura 3.- Esquema de un sistema híbrido.

En la figura 3 se presenta el esquema de un sistema híbrido, en donde podemos observar como se integran el enfoque conexionista y el enfoque simbólico en donde el origen del conocimiento que se maneja proviene de dos fuentes distintas:

- Conocimiento empírico, modelado por medio de ejemplos.
- Conocimiento experto, modelado por medio de reglas.

La esencia de los sistemas híbridos radica en la combinación de métodos que representan conocimiento acerca de un problema específico, asociando técnicas de softcomputing.

2.3 REDES NEURONALES.

Las redes neuronales ofrecen una arquitectura masivamente paralelizada y altamente distribuida equipada con significantes habilidades de aprendizaje, compuestas de múltiples unidades de procesamiento relativamente simples llamadas neuronas, pueden ofrecer interesantes características tales como tolerancia a fallas y habilidades de generalización.

Las redes neuronales nos ayudan a representar relaciones no lineales multivariantes. Rosenblatt (1961), Minsky y Papert (1969) son considerados los pioneros en la investigación sobre redes neuronales. Desde entonces las redes neuronales han sufrido una metamorfosis convirtiéndose ahora en un importante reservorio de varios métodos y arquitecturas de aprendizaje (Rumelhart y McClelland, 1986). Ellos han utilizado exitosamente las redes neuronales en reconocimiento de patrones, robótica, clasificación, modelado de sistemas y aplicaciones en control de procesos.

Las redes neuronales pueden ser definidas como un conjunto de unidades interconectadas las cuales actúan paralelamente para ejecutar una tarea global en común. Estas unidades usualmente experimentan un proceso de aprendizaje el cual automáticamente actualiza los parámetros de la red en respuesta a una posible evolución al ambiente de entrada. Dichas unidades frecuentemente son modelos simplificados de neuronas biológicas del cerebro animal.

2.2.1 NEURONA ARTIFICIAL.

La unidad básica de una red neuronal es la neurona. Aunque hay varios tipos de neuronas diferentes, la más común es la de tipo McCulloch-Pitts. En la figura 4 puede verse una representación de la misma.

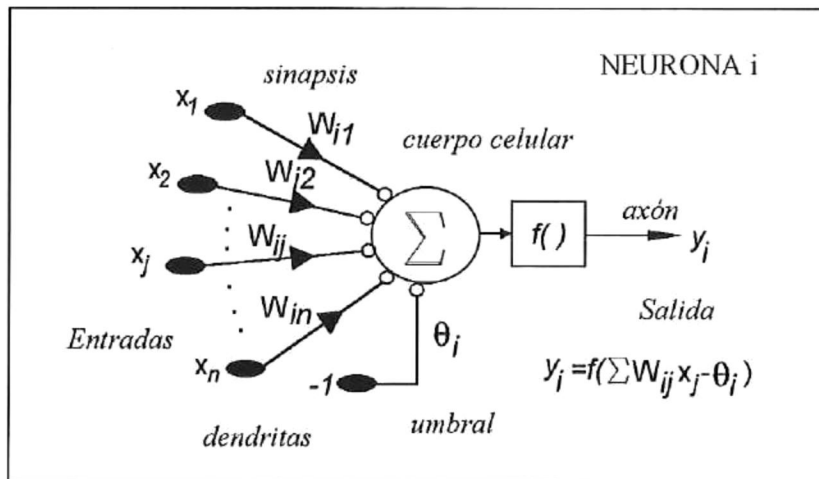


Figura 4.- Representación de una neurona artificial tipo McCulloch-Pitts.

Una neurona artificial es un procesador elemental, en el sentido de que procesa un vector $x(x_1, x_2, \dots, x_n)$ de entradas y produce una respuesta o salida única. Los elementos clave de una neurona artificial los podemos ver en la figura 4 y son los siguientes:

- Las entradas que reciben los datos de otras neuronas. En una neurona biológica corresponderían a las dendritas
- Los pesos sinápticos w_{ij} . Al igual que en una neurona biológica se establecen sinápsis entre las dendritas de una neurona y el axón de otra, en una neurona artificial a las entradas que vienen de otras neuronas se les

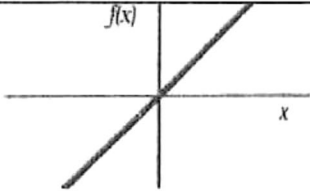
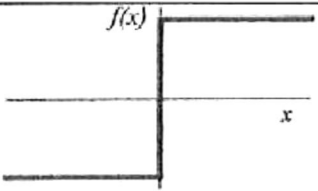
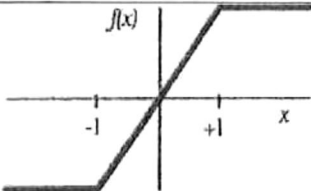
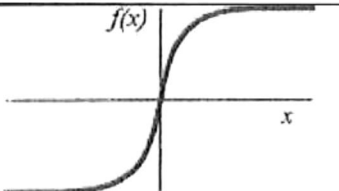
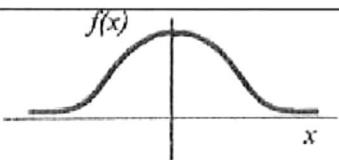
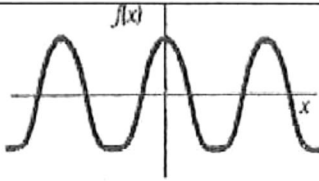
asigna un peso, un factor de importancia. Este peso, que es un número, se modifica durante el entrenamiento de la red neuronal, y es aquí por tanto donde se almacena la información que hará que la red sirva para un propósito u otro.

- Una regla de propagación. Con esas entradas y los pesos sinápticos, se suele hacer algún tipo de operación para obtener el valor del potencial postsináptico (valor que es función de las entradas y los pesos y que es el que se utiliza en último término para realizar el procesamiento). Una de las operaciones más común es sumar las entradas, pero teniendo en cuenta la importancia de cada una (el peso sináptico asociado a cada entrada). Es lo que se llama suma ponderada (Ecuación 1), aunque otras operaciones también son posibles.

$$h_i(t) = \sum_j w_{ij} x_j \quad (1)$$

- La otra regla de propagación más habitual es la distancia euclídea. Este es el tipo de regla que tienen redes como el SOM o las RBF.
- Una función de activación. El valor obtenido con la regla de propagación, se filtra a través de una función conocida como función de activación y es la que nos da la salida de la neurona. Según para lo que se desee entrenar la red neuronal, se suele escoger una función de activación u otra en ciertas neuronas de la red. En la tabla 1 se muestran las funciones de activación más usuales.

Tabla I.- Funciones de activación más usuales.

	Función	Rango	Gráfica
Identidad	$y = x$	$[-\infty, +\infty]$	
Escalón	$y = \text{sign}(x)$ $y = H(x)$	$\{-1, +1\}$ $\{0, +1\}$	
Lineal a tramos	$y = \begin{cases} -1, & \text{si } x < -1 \\ x, & \text{si } -1 \leq x \leq +1 \\ +1, & \text{si } x > +1 \end{cases}$	$[-1, +1]$	
Sigmoidea	$y = \frac{1}{1 + e^{-x}}$ $y = \text{tgh}(x)$	$[0, +1]$ $[-1, +1]$	
Gaussiana	$y = Ae^{-Bx^2}$	$[0, +1]$	
Sinusoidal	$y = A \sin(\omega x + \phi)$	$[-1, +1]$	

En muchas ocasiones la razón para la aplicación de una función de activación distinta de la identidad surge de la necesidad de que las neuronas produzcan una salida acotada. Esto desde un punto de vista de similitud con el sistema biológico, no es tan descabellado, ya que las respuestas de las neuronas biológicas están acotadas en amplitud. Además cada neurona tiene asociado un número denominado bias o umbral, que puede verse como un número que indica a partir de que valor del potencial postsináptico la neurona produce una salida significativa.

2.3.2 CLASIFICACIÓN DE LAS REDES NEURONALES.

Los modelos de redes neuronales pueden ser clasificados bajo distintos criterios. Tomando como base su arquitectura, existen tres tipos principales de redes neuronales:

- **Redes recurrentes**- Las unidades usualmente están tendidas en un arreglo bi-dimensional y están regularmente conectadas. Típicamente, cada unidad envía su salida a cada una de las otras unidades de la red y recibe la entrada de estas mismas unidades. Las redes recurrentes son también llamadas redes de retroalimentación. Dichas redes están sujetas a una configuración inicial fijando los valores de activación de cada una de las unidades. La red entonces pasa por un proceso de estabilización donde las unidades de la red cambian sus valores de activación y lentamente convergen hacia una configuración final de "baja energía". La

configuración final de la red después de la estabilización forma la salida o la respuesta de la red. Esta es la arquitectura del modelo Hopfield.

- **Redes de unidireccional-** Estas redes distinguen tres tipos de unidades : unidades de entrada, unidades ocultas y unidades de salida. La activación de este tipo de redes la realizan propagando hacia delante de una capa a la siguiente, iniciando con la capa de entrada hasta la capa de salida. Algunas veces denominadas redes multicapa, las redes de alimentación hacia delante son muy populares debido a su arquitectura inherente en el modelo de retropropagación.
- **Redes competitivas-** Estas redes se caracterizan por las conexiones laterales inhibitorias de sus unidades con una capa de tal forma que el proceso competitivo entre unidades causa inicialmente la activación de una unidad, la cual permanecerá activa, mientras que las demás unidades del grupo son lentamente desactivadas. Esto es referido como un mecanismo "el ganador toma todo". Teoría de la Resonancia Adaptiva, Mapas Autoasociativos y el Modelo de Aprendizaje Competitivo Rumelhart & Zipser son los mejores ejemplos para este tipo de redes.

La arquitectura de la red puede ser subdividida en dos categorías, tomando como base si la estructura de la red es fija o no:

- **Arquitectura estática-** La mayoría del trabajo seminal en redes neuronales está basado en redes de estructura estática, cuyos patrones de

interconectividad son fijos a priori, aunque los pesos en las conexiones por sí solos aún estén sujetos a entrenamiento. Perceptrones, perceptrones multi-capa, Mapas Autoasociativos y redes tipo Hopfield tienen todos ellos arquitectura estática.

- **Arquitectura dinámica-** Algunas redes neuronales no obligan a la red a fijar su estructura pero permiten que nodos y conexiones sean agregados o removidos como sea necesario durante el proceso de aprendizaje. Algunos ejemplos de esta arquitectura son Fritzke's "Gas Neuronal" y la Teoría de la Resonancia Adaptiva de Grossberg.

Otro criterio habitual para clasificar los modelos de redes neuronales es el tipo de aprendizaje que se utiliza. Hay tres clases de aprendizaje distintos:

- **Aprendizaje supervisado-** En este método se aprende por ejemplos, donde el usuario proporciona información con cada patrón de entrenamiento. Los perceptrones y las redes de retropropagación son ejemplos clásicos de aprendizaje supervisado.
- **Aprendizaje no supervisado-** En este tipo de aprendizaje se presenta a la red una serie de ejemplos pero no se presenta la respuesta deseada. Lo que hace la RNA es reconocer regularidades en el conjunto de entradas, es decir, estimar una función densidad de probabilidad $p(x)$ que describe la distribución de patrones x en el espacio de entrada R^n . Ejemplos clásicos

de estos modelos son los Mapas Autoasociativos y la Teoría de la Resonancia Adaptiva de Grossberg.

- **Aprendizaje híbrido**- Es una mezcla de los anteriores. Unas capas de la red tienen un aprendizaje supervisado y otras capas de la red tienen un aprendizaje de tipo no supervisado. Este tipo de entrenamiento es el que utilizan las redes de función de base radial (RBF, por sus siglas en Inglés).

Tiene sentido clasificar los modelos de redes neuronales basándose en las tareas que realiza:

- **Asociación de Patrones**- La red neuronal sirve como una memoria asociativa recuperando y asociando el patrón de salida en base a un patrón de entrada. La asociación puede ser auto-asociativa o hetero-asociativa, dependiendo si los patrones de entrada y salida pertenecen al mismo conjunto de patrones.
- **Clasificación**- La red neuronal busca dividir el conjunto de patrones de entrenamiento en un número de categorías pre-especificadas. Salidas con valores binarios son generalmente utilizados para clasificación, aunque valores continuos pueden funcionar también. Para salidas binarias, cada categoría es representada por un vector de ceros con un único uno cuya posición en el vector denotará la categoría.

- **Función de Aproximación-** La red neuronal asume la evaluación de alguna función matemática. La salida de la red representa el valor aproximado de la función dando el patrón de entrada como parámetro.

2.3.3 CARACTERÍSTICAS DE LAS REDES NEURONALES.

Como podemos observar, las redes neuronales tiene diferentes arquitecturas, diferentes esquemas de aprendizaje, varían los modelos para actualización de pesos y se aplican a una gran variedad de tareas. Partiendo de este hecho podemos mencionar algunas características que presentan la mayoría de los modelos de redes neuronales:

- **Paralelismo Inherente-** Prácticamente todos los modelos de redes neuronales tienen algún elemento de paralelismo en la ejecución de sus numerosos componentes, aunque algún grado de secuencialidad es observado en su operación.
- **Acceso a Información Local-** Las redes neuronales están compuestas de nodos interconectado unos con otros. Cualquier nivel de activación y salida eventual depende exclusivamente de su estado actual y las salidas de otros nodos a los cuales se está conectado.
- **Aprendizaje Evolutivo-** Las redes neuronales no aprenden de facto, en cambio experimentan los pequeños cambios en los parámetros, los cuales eventualmente establecen su estado final.

2.3.4 ARQUITECTURA DE UNA RED NEURONAL.

Desde un punto de vista matemático, se puede ver una red neuronal como un grafo dirigido y ponderado donde cada uno de los nodos es una neurona artificial y los arcos que unen los nodos son las conexiones sinápticas. Al ser dirigido, los arcos son unidireccionales. En el lenguaje de neuronas y conexiones significa que la información se propaga en un único sentido, desde una neurona presináptica (neurona origen) a una neurona postsináptica (neurona destino) .

Por otra parte es ponderado, lo que significa que las conexiones tienen asociado un número real, un peso, que indica la importancia de esa conexión con respecto al resto de las conexiones. Si dicho peso es positivo la conexión se dice que es excitadora, mientras que si es negativa se dice que es inhibidora.

Lo usual es que las neuronas se agrupen en capas de manera que una RNA esta formada por varias capas de neuronas. Aunque todas las capas son conjuntos de neuronas, según la función que desempeñan, suelen recibir un nombre específico. Las más comunes son las siguientes:

- Capa de entrada: las neuronas de la capa de entrada, reciben los datos que se proporcionan a la RNA para que los procese.
- Capas ocultas: estas capas introducen grados de libertad adicionales en la RNA. El número de ellas puede depender del tipo de red que estemos considerando. Este tipo de capas realiza gran parte del procesamiento.

- Capa de salida: Esta capa proporciona la respuesta de la red neuronal.

Normalmente también realiza parte del procesamiento.

2.4 LÓGICA DIFUSA.

La lógica difusa forma una metodología clave para representar y procesar información lingüística o, en general información no numérica. Soporta una diversidad de mecanismos para representar el conocimiento enfocándose en la selección de información relevante. Los conjuntos difusos explotan la imprecisión y la vaguedad intentando de esta forma hacer manejables sistemas complejos.

La lógica difusa ha cobrado una fama grande por la variedad de sus aplicaciones, las cuales van desde el control de complejos procesos industriales, hasta el diseño de dispositivos artificiales de deducción automática, pasando por la construcción de artefactos electrónicos de uso doméstico y de entretenimiento, así como también de sistemas de diagnóstico. La expedición de patentes industriales de mecanismos basados en la lógica difusa tiene un crecimiento sumamente rápido en todas las naciones industrializadas del orbe.

Las lógicas difusas, pues de hecho hay que hablar de ellas en plural, son esencialmente lógicas multivaluadas que extienden a las lógicas clásicas las cuales deben su nombre a que imponen a sus enunciados únicamente valores

falso o verdadero. Bien que las lógicas clásicas han modelado satisfactoriamente a una gran parte del razonamiento "natural", es cierto que el razonamiento humano utiliza valores de verdad que no necesariamente son "deterministas". Por ejemplo, al calificar que "el cielo es azul" uno está tentado a graduar qué tan "azul", en efecto, es el cielo, e igualmente, si "un vehículo se mueve rápido", también se está obligado a considerar qué tan rápido es el vehículo, aunque esto último no implique necesariamente cuantificar la velocidad del vehículo con toda precisión. Las lógicas difusas tratan de crear aproximaciones matemáticas en la resolución de ciertos tipos de problemas. Pretenden producir resultados exactos a partir de datos imprecisos, por lo cual son particularmente útiles en aplicaciones electrónicas o computacionales.

El adjetivo *difuso* aplicado a estas lógicas se debe a que en ellas los valores de verdad no-deterministas utilizados tienen, por lo general, una connotación de incertidumbre. Un vaso medio lleno, independientemente de que también esté medio vacío, no está lleno completamente ni está vacío completamente. Qué tan lleno puede estar es un elemento de incertidumbre, es decir, de impreciso, entendida esta última como una propiedad de indeterminismo. Ahora bien, los valores de verdad asumidos por enunciados aunque no son deterministas, no necesariamente son desconocidos. Por otra parte, desde un punto de vista optimista, lo difuso puede entenderse como la posibilidad de asignar más valores de verdad a los enunciados que los clásicos "falso" o "verdadero".

Consecuentemente, las lógicas difusas son tipos especiales de lógicas multivaluadas. Se ha considerado de manera general que la lógica difusa se inició en 1965, en la Universidad de California en Berkeley por el profesor Lotfi A. Zadeh.

2.4.1 CONJUNTOS DIFUSOS.

La principal motivación de la teoría de conjuntos difusos (Zadeh, 1965) es la construcción de un marco formal que permita el tratamiento y la manipulación de la incertidumbre presentes en numerosos ámbitos del conocimiento humano. Todos conocemos que la teoría clásica de conjuntos establece que los distintos elementos de un universo pueden pertenecer a un conjunto o no. Así, por ejemplo, si consideramos el universo de los números naturales positivos

$$U=\{1, 2, 3, 4, 5, \dots\}$$

podríamos decir que 3 pertenece al conjunto de los números impares, mientras que 8 no. Igualmente, 9 pertenece al conjunto de los números mayores que 5, mientras que 3 no. La pertenencia a un conjunto de diferentes elementos suele representarse gráficamente mediante la denominada función de pertenencia, como la que se muestra en la figura 5. En la función de pertenencia toman valor 1 aquellos elementos que pertenecen al conjunto, mientras que toman valor 0 aquellos que no pertenecen.

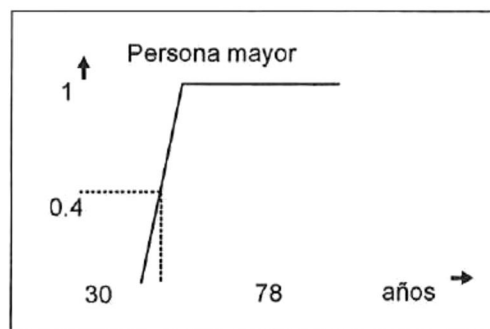


Figura 5.- Función de pertenencia del conjunto difuso "persona mayor".

La teoría de conjuntos difusos propone la extensión del concepto de pertenencia para que admita graduación entre la no-pertenencia y la pertenencia total al conjunto. Así, si hablamos del conjunto de las personas mayores, podría decirse que una persona de 30 años pertenece a dicho conjunto con grado 0 (es decir, no pertenece), una de 50 pertenece con algún grado (ejemplo 0,4) y una persona de 78 años pertenecería con grado 1 (es decir, pertenece completamente). Utilizando la idea de función de pertenencia de este conjunto difuso tendríamos, para este ejemplo, la representación que se indica en la figura 5.

Los conjuntos difusos proporcionan una manera de definir conjuntos para los que la pertenencia sea una cuestión de grado, o no esté completamente definida. Establecen una frontera gradual entre la no-pertenencia y la pertenencia, y por tanto conforman una herramienta para el modelado de la imprecisión o la incertidumbre.

El modelado de la imprecisión mediante conjuntos difusos ha permitido tratar numerosos problemas cuya resolución según esquemas y/o técnicas clásicas no es completamente satisfactoria. Algunos de los dominios donde la imprecisión o la vaguedad son parte intrínseca del conocimiento son los siguientes:

- Problemas de clasificación
- Reconocimiento de patrones
- Procesado de señales.
- Bases de datos.
- Sistemas basados en conocimiento (Sistemas expertos).
- Razonamiento temporal.

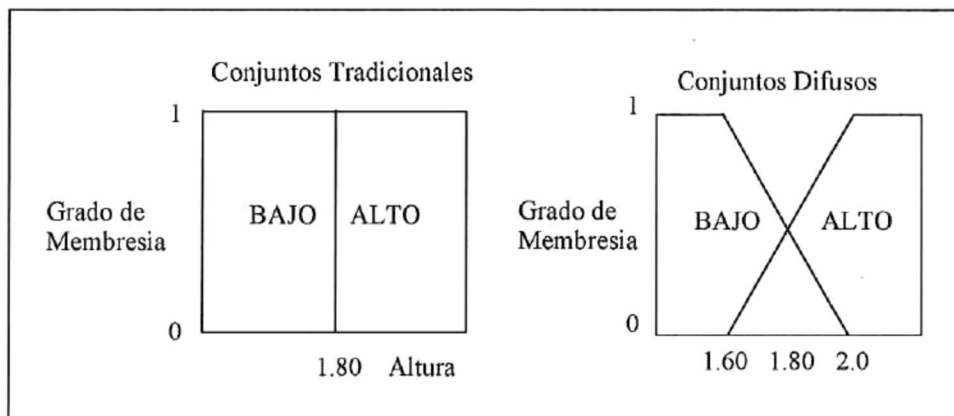


Figura 6.- Conjuntos tradicionales y difusos para BAJO y ALTO.

2.4.2 FUNCIONES DE MEMBRESÍA.

Cada conjunto difuso tiene una correspondiente función de membresía que regresa el grado de membresía de un valor numérico preciso. Si definimos una

variable, *Altura*, entonces la notación que utilizamos para obtener el grado de membresía de *Altura* en el conjunto ALTO es:

Altura ES ALTO.

Por ejemplo, si *Altura* tiene un valor de 1.80m, entonces *Altura* ES ALTO regresa un grado de membresía de .5. (Figura 6) La cláusula "*Altura* ES ALTO" es también llamada un antecedente.

2.4.3 OPERADORES DIFUSOS.

Los operadores difusos permiten combinar antecedentes en premisas. Los operadores de la lógica difusa son AND OR y NOT. Dados dos antecedentes a y b, los operadores son definidos como sigue:

a AND b	significa $\min(a,b)$	[toma el mínimo de a y b]
a OR b	significa $\max(a,b)$	[toma el máximo de a y b]
NOT a	significa $1.0-a$	

Por ejemplo la expresión (*Altura* ES ALTO) OR (*Altura* ES BAJO) podría evaluarse como $\max((\text{Altura ES ALTO}), (\text{Altura ES BAJO}))$, donde la función de membresía para ALTO y BAJO nos dan el grado de membresía de *Altura* en cada conjunto.

2.4.4 LÓGICA DIFUSA Y PROBABILIDAD.

Es importante destacar la distinción entre sistemas difusos y probabilidad. Ambos operan sobre el mismo rango numérico, a primera vista ambos tienen valores similares: 0.0 representa falso (o no-miembro), y 1.0 representa verdad (o miembro). Sin embargo existe diferencia que se hace entre los dos estatutos: El enfoque probabilístico produce el estatuto en lenguaje natural, "Existe un 80% de probabilidades que Maria sea vieja" mientras que en terminología difusa correspondería a "El grado de membresía de Maria en el conjunto de la gente vieja es de 0.80". La diferencia semántica es significativa: a primera vista suponemos que Maria es o no es vieja; es solo que tenemos un 80% de probabilidades de conocimiento. En contraste, la terminología difusa supone que Maria es "mas o menos" vieja, o algún otro término correspondiente al valor de 0.80.

2.4.5 INTEGRACIÓN NEURODIFUSA.

Los paradigmas híbridos neurodifusos combinan las ventajas de los sistemas difusos, los cuales tratan con conocimiento explícito el cual puede ser explicado y entendido, y de las redes neuronales las cuales tratan con conocimiento implícito el cual puede ser adquirido por aprendizaje. El aprendizaje de redes neuronales nos ofrecen una forma de ajustar el conocimiento adquirido generando reglas difusas adicionales y funciones de membresía, para encontrar ciertas especificaciones y reducir el tiempo de diseño. Por otro lado, la lógica difusa

enriquece la capacidad de generalización de redes neuronales dándonos salidas más confiables cuando la extrapolación es necesaria más allá de los límites de entrenamiento (Nibs, 1998)

El campo de aplicación donde pueden ser empleados estos paradigmas es muy amplio, así mismo, proveen la oportunidad para modelar condiciones en las cuales es inherente la impresión y la vaguedad.

2.5 ANÁLISIS DE ESPECTROS.

El análisis de espectros que se define como la transformación de una señal de la representación en el dominio del tiempo hacia la representación en el dominio de la frecuencia, tiene sus raíces a principio del siglo XIX, cuando varios matemáticos lo investigaron desde una base teórica.

Pero fue un hombre práctico, un ingeniero con una educación matemática , que desarrolló la teoría en que están basadas casi todas nuestras técnicas modernas de análisis de espectro. Este ingeniero era Jean Baptiste Fourier. Él estaba trabajando para Napoleón, durante la invasión de Egipto en un problema de sobrecalentamiento de cañones, cuando dedujo la famosa Serie de Fourier, para la solución de la conducción de calor.

Puede parecer que hay una gran distancia entre cañones sobrecalentados y análisis de frecuencia, pero resulta que las mismas ecuaciones son aplicables en los dos casos.

Fourier más tarde generalizó la Serie de Fourier en la Transformada Integral de Fourier. La llegada del análisis de las señales digitales naturalmente llevó a la llamada Transformada Discrecional de Fourier y la Transformada Rápida de Fourier o TRF.

2.5.1 FORMAS DE LA TRANSFORMADA DE FOURIER.

A continuación mencionamos las cuatro formas de la transformada de Fourier:

- **La Serie de Fourier.** La serie de Fourier transforma una señal infinita periódica en un espectro de frecuencia infinito discrecional. La Serie de Fourier es ideal para realizar un análisis de frecuencia de señales periódicas (deterministas) pero no funciona bien en señales aleatorias o continuas. La operación de la Serie de Fourier esta basada en una señal de tiempo que es periódica. Esto es una señal de tiempo cuya forma se repite en una cantidad infinita de veces. Fourier demostró que una señal de este tipo es equivalente a una colección de funciones senos y cosenos cuyas frecuencias son múltiplos del recíproco del periodo de la señal de tiempo. El resultado un poco inesperado es que cualquier forma de onda, siempre y cuando no sea infinita en longitud se puede representar como la suma de una serie de componentes armónicos, y la frecuencia fundamental de la

serie de armónicos es 1 entre la longitud de la forma de onda. Las amplitudes de los varios armónicos se llaman los coeficientes Fourier, y sus valores se pueden calcular fácilmente si se conoce la ecuación para la forma de onda. También se puede calcular gráficamente la forma de onda.

- **La transformada integral de Fourier.** La transformada integral de Fourier transforma una señal continua de tiempo infinito en un espectro de frecuencias continuo infinito. La Transformada Integral de Fourier o más sencillo la Transformada de Fourier es la extensión natural de la Serie de Fourier para abarcar señales de tiempo de una longitud infinita , estas son señales no repetitivas continuas. Esta integración transformará cualquiera señal continua de tiempo de forma arbitraria en un espectro continuo con una extensión de frecuencias infinita. Una característica interesante de la Transformada de Fourier es el hecho que un evento que abarca un periodo de tiempo corto se extenderá sobre un largo rango de frecuencias o viceversa.
- **La Transformada Discreta de Fourier (TDF).** La TDF Transforma una señal discreta periódica de tiempo en un espectro de frecuencias discrecional periódico. La TDF era conocida en teoría desde hace muchos años, pero solamente con la llegada de la computadora digital fue llevada a la práctica. Ni la Serie de Fourier, ni la Transformada de Fourier se prestan fácilmente para cálculos en computadoras digitales por lo tanto la TDF fue desarrollada para vencer este impedimento. Probablemente la

primera persona que concibió la TDF fue Wilhelm Friedrich Gauss, el famoso matemático alemán, del siglo XIX, aunque por cierto él no tenía una computadora digital en la que podría implementarla. La TDF opera con una señal de muestras-o discreta- en el dominio del tiempo. A partir de esta se genera un espectro de muestras -o discreto- en el dominio de la frecuencia. El espectro que resulta es una aproximación de la Serie de Fourier, una aproximación en el sentido que se perdió la información entre las muestras de la forma de onda. La clave hacia la TDF es la existencia de una forma de onda de la que se tomaron muestras, esto es la posibilidad de representar la forma de onda en una serie de números. Para generar esta serie de números desde una señal análoga, se requiere un procedimiento de muestreo, y de conversión de análogo a digital. La señal de la que se tomaron muestras es una representación matemática del nivel de la señal instantánea a intervalos definidos con precisión. No contiene información acerca de la señal entre los tiempos en que se tomaron muestras. Si la proporción de muestreo es lo suficientemente alta como para asegurar una representación razonable de la forma de la señal, la TDF si produce un espectro que es muy similar a un espectro teóricamente verdadero. Este espectro también es discreto, y no hay información entre las muestras o "líneas" de espectro. En teoría, no hay límite al número de muestras que se puedan usar, o a la velocidad del muestreo, pero hay limitaciones prácticas que debemos observar. La mayoría de esas

limitaciones son el resultado de usar una computadora digital como agente calculador.

- **La transformada rápida de Fourier (TRF).** Es un algoritmo computacional para calcular la Transformada Discreta de Fourier en computadoras digitales de manera rápida y eficaz. Los señores Cooley y Tuckey fueron acreditados con el descubrimiento de la TRF en 1967 , pero ya existía desde antes, aunque sin las computadoras que se necesitaban para explotarla. El algoritmo pone algunas limitaciones en la señal y en el espectro resultante. Por ejemplo, la señal de donde tomamos las muestras y que se va a transformar debe consistir de un número de muestras igual a un poder de dos. La mayoría de los analizadores TRF permiten la transformación de 512, 1024, 2048 o 4096 muestras. El rango de frecuencias cubierto por el análisis TRF depende de la cantidad de muestras recogidas y de la proporción de muestreo

2.5.2 LOS COEFICIENTES DE FOURIER

El cálculo de los coeficientes de Fourier se define como una transformada matemática del dominio de tiempo hacia el dominio de frecuencia.

Un hecho importante que se puede ver de la Serie de Fourier es que la forma de onda original se puede reconstruir a partir de los coeficientes de frecuencia. En otras palabras, es posible transformar del dominio de frecuencia y regresar hacia

el dominio de tiempo sin que se pierda la información. La Serie de Fourier está perfectamente adaptada para realizar el análisis de frecuencia en formas de ondas periódicas , esto es en señales deterministas.

2.5.3 TRAMPAS EN LA TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER.

Probablemente, el error que se comete con más frecuencia, es cuando se usa el analizador TRF es la selección de la ventana incorrecta, para la tarea que nos espera . El siguiente error más común es la selección de una resolución.

A continuación enumeramos un resumen de las trampas, asociadas a la técnica del análisis TRF. Esto no quiere decir que el análisis TRF no es bueno, al contrario, esta técnica ha revolucionado el análisis de datos. El hecho importante es que los problemas con el análisis TRF se pueden solucionar usando una técnica adecuada, y que los efectos residuales se pueden reducir a niveles insignificantes.

Las siguientes son trampas en las que se podría incurrir cuando se utiliza la TRF:

- El muestreo provoca la generación de alias.
- Limitación de tiempo provoca fugas.
- Frecuencias discretas en el espectro calculado provocan el efecto de palizada.

2.5.3.1 FORMACIÓN DE ALIASES.

En base a la figura 7 la señal actual está representada en negro y su representación según las muestras en anaranjado. La frecuencia de muestreo está representada por las líneas verticales. Nótese que si la frecuencia de muestreo es la misma que la frecuencia de las muestras, cada muestra tendrá el mismo tamaño , y la salida del circuito de muestreo será un voltaje directo constante, obviamente sin relación con la frecuencia de la señal de entrada.

Ahora noten lo que pasa si la señal es más alta en frecuencia que la frecuencia de muestreo. La salida de la toma de muestras se parece a una frecuencia muy baja, y otra vez no es una representación correcta de la señal. Este fenómeno se llama formación de alias y puede causar serios errores a menos que se evite. La mejor manera de evitar la formación de alias es de llevar la señal de entrada a través de un filtro análogo de paso bajo, cuyo límite de frecuencia es menor de la mitad de la frecuencia de muestreo. En la mayoría de los analizadores TRF modernos, la frecuencia de muestreo esta puesta a 2. 56 veces la frecuencia límite del filtro. El filtro deberá tener una característica de límite muy aguda y esto también quiere decir que tendrá un desplazamiento de fase, lo que puede afectar a los datos si uno requiere información acerca del lado superior del rango de frecuencias del analizador. Para evitar eso, habrá que seleccionar el rango de frecuencias de manera que la frecuencia en cuestión este en la mitad inferior del rango de frecuencias.

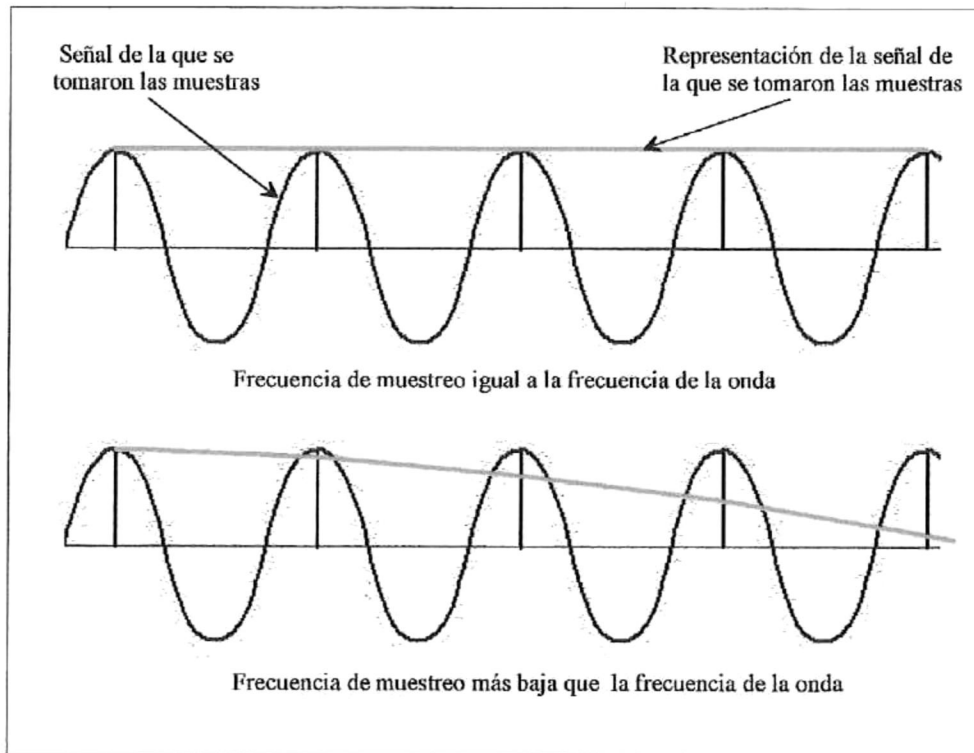


Figura 7.- Formación de alias.

La formación de alias también ocurre en otros medios como en películas de cine. Por ejemplo, a veces en las películas del Oeste puede pasar que los rayos de una rueda parecen parados o parece que giran en el sentido contrario. Esto es la formación de alias ópticos, ya que la película es una representación de muestras del movimiento original.

Algunas reglas de muestreo para análisis digital que hay que tomar en consideración para evitar alias son las siguientes:

- La ruta de los datos debe incluir un filtro análogo de paso bajo.

- Se tiene que tomar muestras por lo menos dos veces tan rápido que la frecuencia más alta que se va analizar.
- La Respuesta de Frecuencia del Análisis dependerá de la frecuencia con que se tomó muestras.

2.5.3.2 FUGAS.

El analizador TRF es un aparato que procesa por lotes, esto es que toma muestras de la señal de entrada durante un tiempo específico recopilando las muestras en un buffer. Después de eso, el aparato lleva a cabo el cálculo en este "lote" y enseña el espectro resultante.

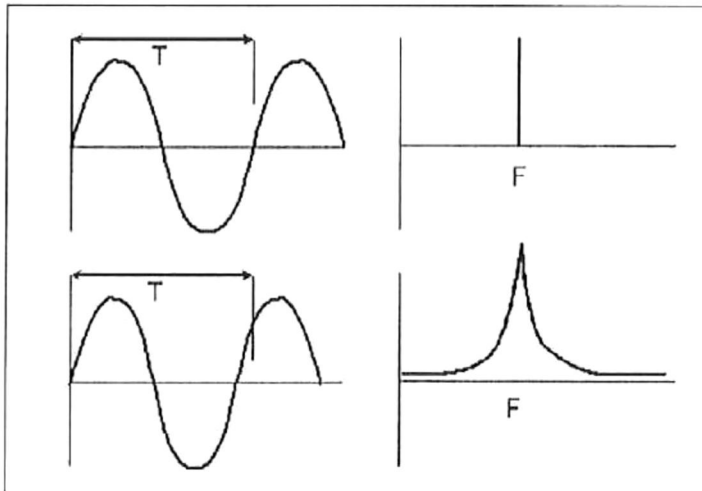


Figura 8.- Truncado de datos y la provocación de fugas.

Si una forma de onda senoidal esta pasando a través del nivel cero, al principio y al final de la grabación de tiempo, eso es si la grabación de tiempo abarca

exactamente un número entero de ciclos de la forma de onda, el espectro TRF resultante consistirá de una sola línea con la amplitud y la frecuencia correcta. Si por otro lado, el nivel de la señal no está en cero, en ambas partes de la grabación de tiempo, la forma de onda será truncada y eso provocará una discontinuidad en la señal de la que se tomó muestras (Figura 8). Esta discontinuidad no está bien manejada por el proceso TRF y el resultado es que el espectro está ungido desde una sola línea en las líneas vecinas. A este fenómeno se le dió el nombre de fugas. Es como si la energía en la señal se "fuga" desde su ubicación correcta hacia las líneas vecinas.

La forma de un espectro presentando fugas depende de la cantidad con que la señal fue truncada, y generalmente no es predecible para señales verdaderas.

2.5.3.3 EL EFECTO PALIZADA.

Como lo mencionado con anterioridad, el espectro TRF es un espectro discreto, y consiste de estimaciones de lo que es el nivel espectral en frecuencias específicas. Esas frecuencias se determinan por los parámetros del análisis que se está llevando a cabo en el analizador y no tienen nada que ver con la señal que se analiza. Esto quiere decir que puede haber y que probablemente hay picos reales en el espectro real de la señal que se encuentran entre las líneas del análisis TRF. Esto también quiere decir que por lo general, los picos en un espectro TRF se miden en niveles muy bajos, y los valles se miden demasiado alto. Lo que es más,

las frecuencias reales en las que se encuentran los picos y los valles no serán las que indica el espectro TRF.

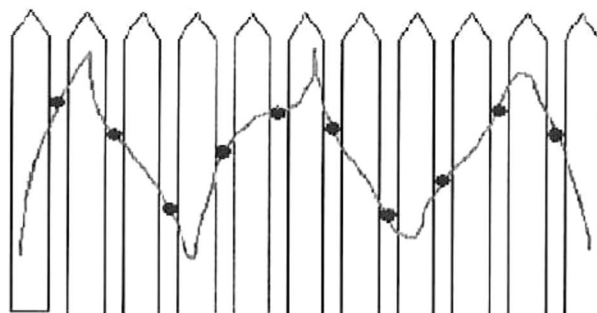


Figura 9.- El efecto palizada.

Este fenómeno se llama error de prejuicio en la resolución o más comúnmente efecto palizada. En otras palabras, el ver un espectro TRF es análogo a observar una cordillera a través de una palizada (Figura 9).

2.6 SISMOLOGÍA.

La sismología es la ciencia que estudia el fenómeno de los sismos, para entender un poco más sobre este tema empezaremos por describir algunos aspectos importantes de la sismología basándonos principalmente en el libro de Alejandro Nava titulado "Terremotos".

Los sismos constituyen una de las catástrofes naturales más destructoras que existen. En unos cuantos momentos, miles de personas pueden perder bienes, salud, seres queridos y, tal vez, la vida. Algunos sismos han llegado a causar

cientos de miles de muertes y graves daños en áreas de miles de kilómetros cuadrados, y se recuerdan como fechas dolorosas de la historia de la humanidad. Desde tiempos históricos se guarda la memoria de un gran número de sismos destructivos; sin embargo, la sismología, que es la ciencia que se dedica al estudio sistemático de éstos es bastante reciente.

México es un país donde ocurren un gran número de sismos. Su geología refleja que gran parte de su territorio esté sometido a enormes esfuerzos que causan, entre otros efectos, grandes sismos.

La sismología es la ciencia que estudia todo lo referente a los sismos: la fuente que los produce (localización, orientación, mecanismo, tamaño, etc.), las ondas elásticas que generan (modo de propagación, dispersión, amplitudes, etc.) y el medio físico que atraviesan dichas ondas.

El estudio de la fuente sísmica incluye el estudio de las causas, así como el de los procesos que se presentan en ella, y es importante para elaborar modelos realistas que ayuden a la predicción de terremotos.

Por su parte, el estudio de las ondas sísmicas es importante porque además de que de ellas depende el tipo de daños que causa un sismo, nos dan información acerca de lo que está ocurriendo en la fuente y del medio material que han atravesado.

El estudio del medio es importante porque nos permite conocer cómo está constituido el planeta sobre cuya superficie vivimos, tanto a pequeñas profundidades (lo que tiene aplicaciones en minería, petróleo, etc.), como a grandes profundidades. Conocer el medio permite localizar correctamente los sismos y estudiar las ondas que generan.

Cada aspecto de la sismología está relacionado con otros aspectos de esta ciencia y de otras ciencias complementarias. En su estudio se aplican técnicas de muchas otras disciplinas: física, matemáticas, geología, computación, química, etcétera.

2.6.1 FUENTE SÍSMICA.

Cuando las fuerzas que actúan sobre la roca se incrementan rápidamente que ésta puede comportarse plásticamente; y si son tan grandes que la roca no puede soportarlas deformándose elásticamente, hacen que falle, es decir, que se rompa súbitamente.

Dependiendo de los esfuerzos que actúen sobre un cuerpo, éste puede fallar en alguna de las tres formas siguientes. La primera forma, es de falla normal o de deslizamiento, que resulta de esfuerzos de tensión. El segundo tipo, que es de falla reversa o de cabalgadura. Este tipo de falla ocurre cuando los esfuerzos son compresionales. El tercer tipo de falla, es el de falla transcurrente o de rumbo,

que se produce cuando los esfuerzos son cortantes sin componente vertical. En este caso el corrimiento es horizontal. Cuando los esfuerzos que actúan sobre el terreno son una combinación de esfuerzos de tensión o compresión con esfuerzos de corte, el terreno puede fallar en una forma mixta.

Parte de la energía elástica que estaba almacenada en forma de esfuerzo en la roca deformada (como la que se almacena en un resorte comprimido) se gasta en crear la falla, i. e., romper la roca y vencer la fricción entre ambas caras de la fractura, que trata de frenar el movimiento (Husseini et. al., 1975); otra parte puede permanecer en las rocas (esfuerzo residual) y el resto se libera en forma de ondas sísmicas; esta energía liberada, llamada energía sísmica. Es, es la que viaja, a veces atravesando la Tierra entera y causando daños aun en lugares alejados de la zona de la ruptura, y se conoce como terremoto.

La energía liberada por los sismos más grandes es enorme (del orden de 10^{25} ergs); es 100 000 veces mayor que la bomba atómica de 20 kilotones que destruyó Hiroshima, y mayor que la de las grandes bombas nucleares de varios megatones ($1 \text{ kilotón} = 4.2 \times 10^{19} \text{ ergs}$) (Burridge et. al., 1979).

Es posible, por medio del estudio de la forma de las ondas sísmicas, complementado con otros estudios y observaciones de campo, obtener estimaciones de los valores de M_0 (Momento sísmico), de las dimensiones de la

falla y de la caída de esfuerzo (esfuerzo antes del sismo menos esfuerzo remanente) en la fuente.

2.6.2 ONDAS SÍSMICAS.

Una deformación que viaja a través de un medio elástico se llama onda elástica; y cuando el medio a través del cual se desplaza es la Tierra, se llama onda sísmica. Al conjunto de todos los puntos en el espacio que son alcanzados simultáneamente por una onda se le llama frente de onda. Un ejemplo familiar es el de las ondas formadas en la superficie de un lago al dejar caer en ella algún objeto. Los frentes de onda son los círculos concéntricos que viajan alejándose de la fuente, es decir, del lugar donde se originó el disturbio.

Si trazamos líneas imaginarias perpendiculares a los frentes de onda, veremos que indican la dirección en la que viajan las ondas. Estas líneas son llamadas rayos, y son muy útiles para describir las trayectorias de la energía sísmica.

La onda sísmica deforma el terreno a través del cual pasa, lo cual indica que puede hacer trabajo, y, por lo tanto, corresponde a energía elástica que se desplaza. En el caso de ondas generadas por explosiones, la energía es producto de las reacciones químicas o nucleares que causaron la explosión; en el caso de

ondas generadas por sismos, es la que estaba almacenada como energía de deformación en las rocas.

Las ondas más sencillas son las senoidales (aquéllas cuyos valores varían en el tiempo y/o en el espacio como senos o cosenos trigonométricos). Cada una se caracteriza por su *frecuencia* f (el número de veces que el movimiento se repite en cierto tiempo), expresada en Hertz (ciclos/segundo, abreviado Hz), o por su *periodo* $T = 1 / f$ (el tiempo que tarda en repetirse), expresado en segundos, su *amplitud* A (el máximo valor que puede tomar), expresada en unidades de longitud (usualmente micras o centímetros) y su *fase* (qué valor tiene la onda, es decir, en qué punto de su ciclo está, para un tiempo o lugar de referencia). Si una onda senoidal viaja con una velocidad V , al cabo de un periodo habrá recorrido una distancia $\lambda = V \times T$, llamada su *longitud de onda*.

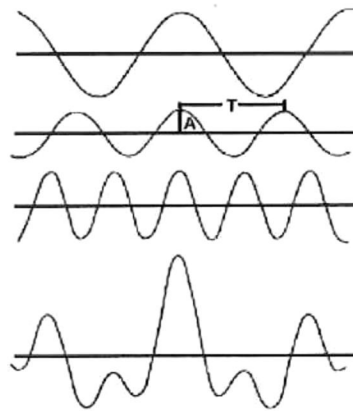


Figura 10.- Ondas senoidales sumadas para obtener un pulso.

Si sumamos las tres ondas senoidales de la figura 10, obtenemos la traza situada bajo ellas, la cual es menos regular que éstas y presenta un máximo donde los valores de las trazas componentes se suman (interferencia constructiva) y valores menores donde se anulan (interferencia destructiva).

De esta manera podemos construir una onda de cualquier forma, mediante la suma (a veces infinita) de ondas senoidales con diferentes amplitudes y frecuencias (teorema de Fourier) (Bracewell, 1965). La amplitud de cada onda senoidal componente nos indica qué tanto de ella contiene la onda sísmica en cuestión. Se llama espectro de la señal sísmica al conjunto de sus componentes senoidales. Se dice que una onda sísmica es de alta o baja frecuencia (o de periodo corto o largo) según predominen en su espectro unas u otras componentes.

La teoría de la elasticidad nos dice que son posibles dos tipos de ondas elásticas que viajan a través de la Tierra, y que son conocidas como ondas de cuerpo u ondas internas, las cuales pueden ser compresionales o de cizalla.

Las ondas compresionales u ondas P son las que se transmiten cuando las partículas del medio se desplazan en la dirección de propagación, produciendo compresiones y dilataciones en el medio. Esto es fácil de visualizar si pensamos en un resorte. Si comprimimos un extremo del resorte y luego lo soltamos, el material comprimido se extiende, comprimiendo al material que está junto a él.

Esa compresión y la dilatación (extensión) correspondiente viajan en la misma dirección (aunque puede variar el sentido) del desplazamiento de las partículas.

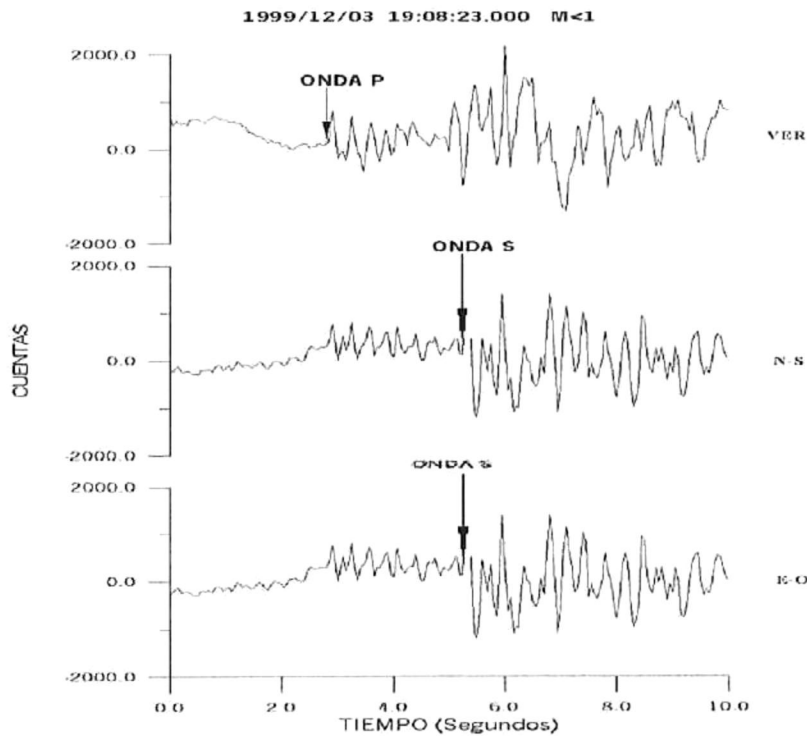


Figura 11.- Ondas P y S, en un sismograma.

Ésta es la más veloz de todas las ondas sísmicas (más de 5 km/s en las rocas graníticas cercanas a la superficie, y alcanza más de 11 km/s en el interior de la Tierra) y, por lo tanto, es la primera en llegar a cualquier punto, en ser sentida y en ser registrada en los sismogramas, por lo que se llamó onda Primera o Primaria y de allí el nombre de P (en inglés se asocia también con push que significa empujón o empujar).

Las ondas de corte o de cizalla, llamadas ondas S, son aquéllas en las cuales las partículas del medio se desplazan perpendicularmente a la dirección de propagación, por lo que están asociadas con deformaciones del terreno de tipo de cizalla. Podemos visualizarlas si pensamos en las ondas que viajan por una cuerda tensa y movemos uno de sus extremos perpendicularmente a ella. Cada partícula de la cuerda se mueve, hacia arriba o hacia abajo, jalando a sus vecinas; de manera que la onda viaja en la dirección de la cuerda perpendicularmente a la dirección del desplazamiento de cada pedazo de cuerda.

La onda S es más lenta que la onda P. En una amplia gama de rocas su velocidad, V_s , es aproximadamente igual a la velocidad de la onda P, V_p , dividida entre $\sqrt{3}$ (esto es conocido como condición de Poisson). Como la onda S es la segunda en llegar se le llamó Secundaria, y de allí su nombre (en inglés se asocia con shake, que significa sacudir).

Como los líquidos no pueden soportar esfuerzos cortantes, las ondas S no se propagan a través de ellos. El desplazamiento de las partículas en el terreno durante el paso de la onda puede ser en cualquier dirección perpendicular a la de propagación; pero, a veces, pueden desplazarse en una sola dirección, en cuyo caso se dice que las ondas están polarizadas. La componente vertical de la onda S se denota a menudo por SV, mientras que la componente horizontal se denota por SH

Además de las ondas que viajan a través del terreno, existen otras que lo hacen por la superficie, esto es, su amplitud es máxima en ésta y nula en las grandes profundidades. Estas ondas pueden explicarse como causadas por la interferencia de las ondas de cuerpo (interacción de muchas de estas ondas que viajan en diferentes direcciones), y son más lentas que éstas. En el caso de los telesismos (los que ocurren a más de 1000 km. de distancia del observador), las ondas superficiales llegan mucho después que las de cuerpo, y podemos apreciar que presentan dispersión; esto es, las ondas de diferentes frecuencias viajan con diferentes velocidades.

Cuando una capa o nivel de roca se encuentra rodeada de otras rocas con velocidades sísmicas superiores, algunas de las ondas que se encuentren dentro de ella no podrán escapar a los medios circundantes y serán transmitidas a lo largo de la capa con muy poca pérdida de energía. Este tipo de estructura es conocido como guía de ondas. En el océano existe una capa de agua de baja velocidad, conocida como canal sofar, que transmite ondas hasta grandes distancias; si un sismo genera ondas que se transmitan por este canal (a la velocidad del sonido en el agua), al alcanzar la tierra firme serán registradas después de la llegada de las ondas P y S, por lo que son conocidas como ondas T (de "Terceras").

Cuando un arribo es súbito, es decir comienza con un movimiento grande y empinado, que permite distinguirlo claramente a pesar del ruido, se llama

impulsivo. Los arribos impulsivos son típicos de sismos cercanos. El caso contrario, cuando el arribo es gradual y resulta difícil determinar su comienzo, se llama emergente. Estos arribos son típicos de telesismos, o de fases que tengan relativamente poca energía y se pierdan en el ruido.

2.6.3 RIESGO SÍSMICO.

Se llama riesgo sísmico a la probabilidad de ocurrencia, dentro de un plazo dado, de un sismo que cause, en un lugar determinado, cierto efecto definido como pérdidas o daños determinados.

En el riesgo influyen el peligro potencial sísmico, los posibles efectos locales de amplificación, directividad, etc., la vulnerabilidad de las construcciones (e instituciones) y las pérdidas posibles (en vidas y bienes) (Mayer-Rosa, 1986).

El riesgo sísmico depende fuertemente de la cantidad y tipo de asentamientos humanos localizados en el lugar. Aunque el peligro potencial sísmico es muy alto en Yakutat, el riesgo sísmico es pequeño porque es una región con relativamente pocos habitantes; por otro lado, el potencial sísmico no es tan grande en Managua (porque allí los sismos no son tan grandes) pero la cantidad de personas que viven allí, la cercanía a las fallas (Langer et. al., 1974), y el tipo de construcción, hacen que el riesgo sísmico sea muy grande; esto es claro al

comparar el número de víctimas, para uno y otro lugar, mostrados en la introducción.

La zonificación consiste en determinar en un país o en una región las zonas de alto y bajo riesgo sísmico según las condiciones locales (cercanía a fallas activas, peligro sísmico en ellas, efectos de la estructura local del suelo, etc.) que afectarían a una construcción tipo (lo que permite definir el riesgo a partir de una aceleración, en general horizontal, llamada aceleración de diseño), (Gaus et. al.,1972), y es de gran utilidad para la elaboración y aplicación de códigos de construcción.

Cuando la zonificación se hace con gran detalle, como el necesario para describir el riesgo sísmico de las distintas partes de la ciudad de México, se llama microzonificación. Generalmente los valores de peligro potencial y riesgo sísmicos, reflejados en la zonificación, se consideran invariantes en el tiempo; por lo que son apropiados como base para tomar medidas preventivas permanentes, como códigos de construcción (Evison, 1982).

2.7 SUMARIO.

Se observa que las redes neuronales dirigidas a aplicaciones específicas están en general poco ligadas a las redes neuronales biológicas. Ya que el conocimiento que se posee sobre el sistema nervioso en general no es completo, se han de definir otras funcionalidades y estructuras de conexión distintas a las vistas

desde la perspectiva biológica. Las características principales de este tipo de redes neuronales son los siguientes:

1. *Auto Organización y Adaptatividad:* utilizan algoritmos de aprendizaje adaptativo y auto organización, por lo que ofrecen posibilidades de procesamiento robusto y adaptativo.
2. *Procesado No Lineal:* aumenta la capacidad de la red de aproximar, clasificar y su inmunidad frente al ruido.
3. *Procesado paralelo:* normalmente se usa un gran número de células de procesamiento por el alto nivel de interconectividad.

Estas características juegan un importante papel en las redes neuronales aplicadas al procesamiento de señal e imagen. Una red para una determinada aplicación presenta una arquitectura muy concreta, que comprende elementos de procesamiento adaptativo masivo paralelo combinados con estructuras de interconexión de red jerárquica.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA.

3.1 ESQUEMA GENERAL DEL SISTEMA.

La figura 12 muestra el esquema general del sistema, donde se observan los registros sísmicos sujetos de estudio. El esquema inicia con una estación sismológica, y al conjunto de estos elementos se les conoce como red sismológica.

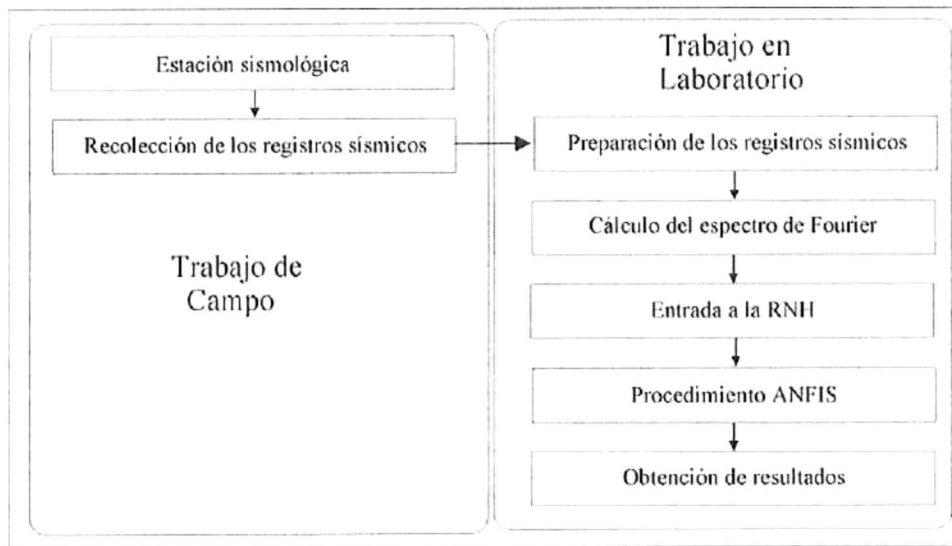


Figura 12.- Esquema general del sistema.

Aparentemente una red sismológica se ve como algo sin mayor trascendencia pero es importante recalcar el esfuerzo requerido tanto de investigadores como de personal técnico par mantener en operación una red sismológica, ya que todo

ello involucra un trabajo de equipo, que va desde la planeación, instalación y mantenimiento hasta el análisis e interpretación de los datos obtenidos por la red y finalmente la publicación de resultados.

3.1.1 ESTACIONES SISMOLÓGICAS.

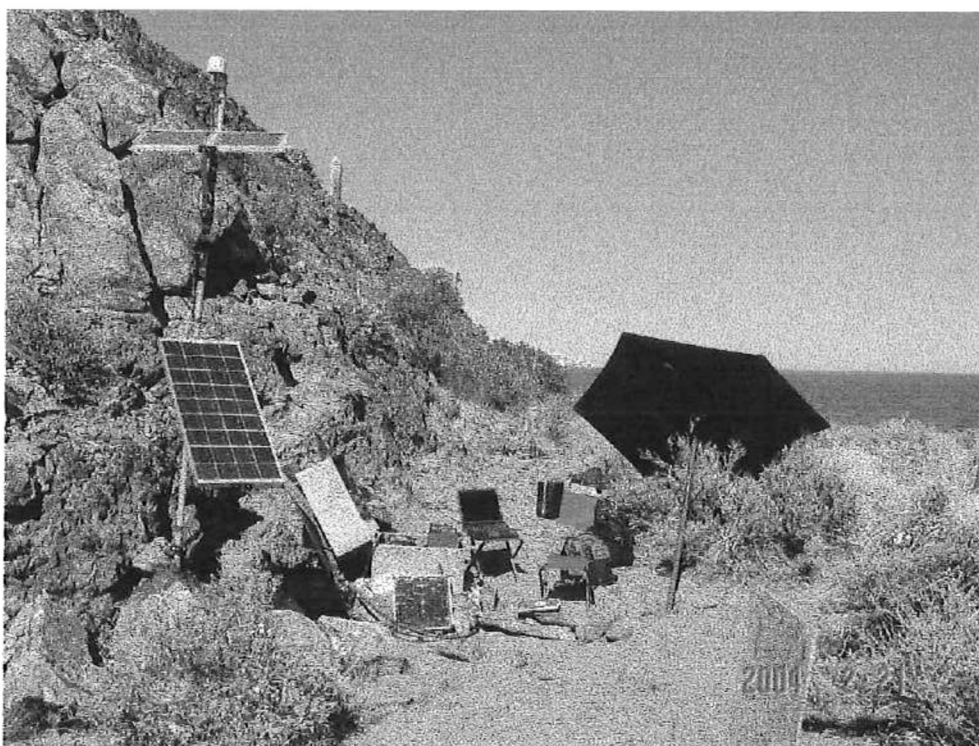


Figura 13.- Estación sismológica.

Las estaciones sismológicas digitales (Figura 13) que componen la red sismológica de La Paz Baja California Sur, están equipadas con grabadoras digitales K2 (Figura 14a), acopladas a acelerómetros tri-axiales del tipo FBA-23 (Figura 14b). Estos equipos de alta resolución (18 a 24 bits de resolución) son fabricados por la compañía Kinemetrics.

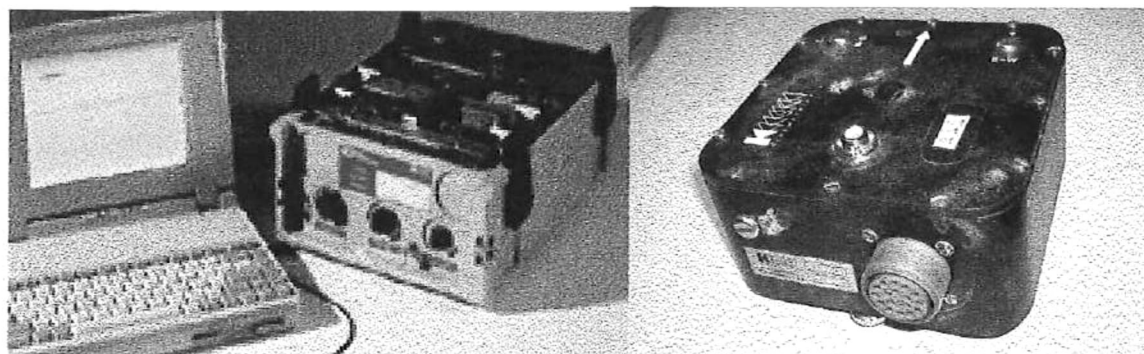


Figura 14.- a) Grabadora digital K2, b) Acelerómetro FBA-23.

Para su operación, los aparatos de cada estación requieren de un sistema GPS (Figura 15a) para control absoluto del tiempo, un equipo de alimentación de energía eléctrica autónomo el cual consta de una batería de tipo automotriz, un panel solar y un controlador de carga (Figura 15b).

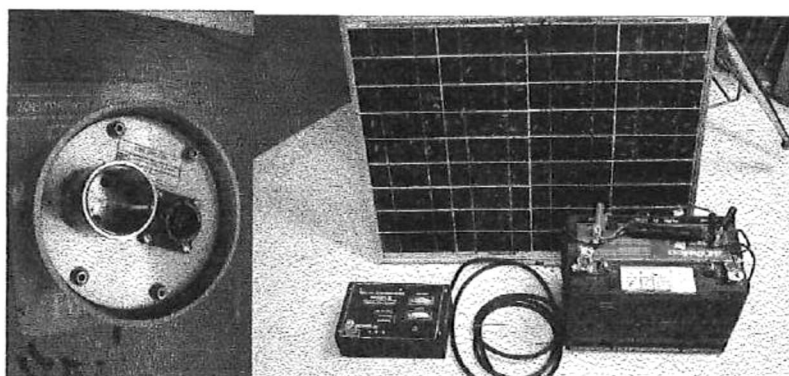


Figura 15.- a) Antena GPS, b) Equipo de alimentación de energía autónomo.

3.1.2 RECOLECCIÓN DE REGISTROS SÍSMICOS.

La recolección de registros sísmicos se efectúa haciendo una visita física al sitio donde se encuentra instalada cada una de las estaciones sismológicas (Figura 1).

Las visitas se realizan periódicamente tomando en consideración que la memoria sólida de la grabadora digital no se sature por el número de registros grabados. Programar las visitas no es una tarea fácil ya que se debe de optimizar el recurso económico que generalmente es reducido, así mismo el tiempo dedicado a dicha actividad ya que como podemos observar en la figura 1 la distribución de las estaciones en toda la red es aproximadamente de 300 Km. cuadrados, considerando que algunas estaciones están situadas en islas (Figura 16) y el acceso a ellas es restringido tanto por el aspecto de logística como meteorológico.

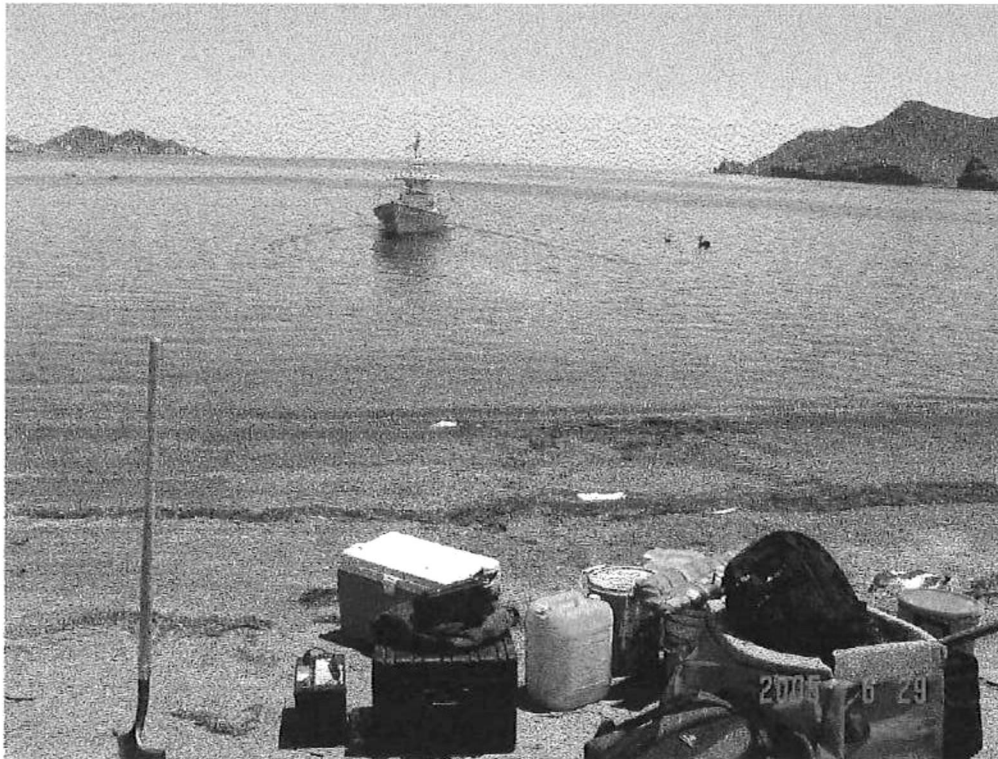


Figura 16.- Estación sismológica en una isla del Golfo de California.

3.1.3 REGISTROS SÍSMICOS.

Los registros sísmicos obtenidos al realizar las vistas a las estaciones sismológicas digitales, son grabados desde la memoria sólida de la grabadora digital K2 a una computadora portátil, el formato de dichos registros esta en crudo, como se les conoce técnicamente, una vez que son llevados al laboratorio se procesan para su depuración y análisis.

Existen distintos tipos de formatos para que los registros sean transformados dependiendo del tipo de análisis que determine el investigador que se les tenga que aplicar, para el presente trabajo el formato más conveniente es ASCII (American Standard Code for Information Interchange). Esto se hace utilizando una serie de programas, dichos programas son proporcionados algunas veces por el fabricante de las grabadoras digitales y otras veces son desarrollados por el personal técnico e investigadores.

3.1.4 EQUIPO DE CÓMPUTO.

El equipo de computo con el cual se procesan los registros sísmicos en el laboratorio está compuesta por:

- Computadora marca COMPAQ con procesador PENTIUM III, de 500Mz de velocidad, tiene memoria RAM de 512 Mb y 2discos duros de 80Gb cada uno.
- Computadora AMD Athlon de 2.4GHz de velocidad, tiene memoria RAM de 512 Mb y disco duro de 80Gb.

- Computadora LAPTOP PENTIUM 4, de 1.6GHz de velocidad, tiene memoria RAM de 128 Mb y disco duro de 8Gb.

3.1.5 SOFTWARE DE APOYO.

Actualmente existe una variedad de sistemas operativos, los cuales ayudan en gran medida a optimizar el desempeño de aplicaciones de computo, sin embargo el sistema operativo bajo el cual se desarrollo el presente trabajo es el Windows 98, esto es debido a que algunos fabricantes de grabadoras digitales toman como requisito indispensable dicho sistema operativo, esto quiere decir que ciertas aplicaciones que corran bajo otro sistema operativo distinto al que se requiere no será compatible con el hardware y podrían existir conflictos entre dichos componentes. Por otro lado, el software utilizado para el desarrollo de la red neuronal híbrida es el MATLAB versión 6.5 release 13.

3.2. LA RED NEURONAL HÍBRIDA.

La red neuronal híbrida está diseñada con la herramienta ANFIS (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System) de MATLAB, esta herramienta nos ayuda a modelar una red neuronal difusa a partir de un conjunto de datos de entrada, construyendo un sistema de inferencia cuyos parámetros a la función de membresía de dicho sistema son ajustados utilizando el algoritmo de retropropagación ó combinándolo con mínimos cuadrados. Esto permite al sistema difuso aprender a partir de los datos que se están modelando.

La topología de la RNH consiste de varias capas, el vector de entrada para la primer capa debe tener un numero fijo de elementos, para este trabajo es de 2,048. Esto se debe a que la entrada a la red tanto para su etapa de entrenamiento, como para su validación corresponde al espectro de Fourier de los registros sísmicos, recordando que para el cálculo del espectro de Fourier es conveniente hacerlo bajo una potencia de dos. En base a la experiencia adquirida con los registros sísmicos que se están manejando, la resolución de 2,048 es conveniente, tanto para la manipulación de los mismos, como para la RNH.

Una de las etapas en el desarrollo de la RNH es definir su tipo de aprendizaje o entrenamiento, para el presente trabajo se utiliza el aprendizaje supervisado. Esto es llevado a cabo proporcionando a la red tanto la entrada como la salida correcta, de esta forma la red ajusta sus pesos tratando de minimizar el error de su salida calculada.

Posteriormente validamos la red utilizando datos independientes, esto consiste en utilizar los registros sismológicos que se han obtenido por las estaciones sismológicas alimentando la red para que sean clasificados.

Cabe señalar que la red neuronal híbrida no es un programa ejecutable, por lo tanto para su ejecución se requiere que en la computadora donde se vaya a

trabajar exista instalada alguna versión posterior a la 5.3 de MATLAB junto con la caja de herramientas ANFIS.

3.2. DESARROLLO DE LA RED NEURONAL HÍBRIDA.

Para desarrollar la red neuronal híbrida, se inicia con la selección de registros sísmicos, los cuales deben de representar los cuatro casos típicos que se podrían tener con dichos registros; Evento sísmico, evento sísmico ruidoso, disparo en falso y ruido. Puesto que con estos registros se va a entrenar la red, es de suma importancia tomar ejemplos adecuados.



Figura 17.- Procedimiento ANFIS.

Posteriormente se propondrá la arquitectura de la red, lo cual consiste en definir su topología y el método de aprendizaje, esta es la parte medular del presente trabajo, aquí es donde se aplica el paradigma ANFIS (figura 17). Una vez concluida satisfactoriamente la etapa de entrenamiento considerando que se ha

alcanzado las condiciones óptimas de la red, se continúa con la prueba o validación de la misma utilizando los registros sísmicos.

3.2.1 PREPARACIÓN DE LA ENTRADA A LA RED NEURONAL HÍBRIDA.

La grabadora digital K2 internamente tiene un algoritmo de detección el cual se activa cuando se cumplen ciertos parámetros, estos parámetros son ajustados dependiendo del tipo de suelo donde se halla instalado la estación sismológica, lo cual sirve para que se optimice el espacio en la memoria sólida de la grabadora digital. Debido a que el tiempo de duración de los eventos sísmicos es variable, el algoritmo de detección de la grabadora digital inicia el registro tomando una ventana de tiempo antes y después de haber grabado el registro y se las agrega al registro sísmico por consecuencia el número de muestras que componen la traza no es fijo.

Es indispensable que el número de elementos del vector de entrada para la primer capa de la RNH sea fijo, recordando que la cantidad de muestras en los registros sísmicos es variable, es necesario de alguna manera estandarizar el número de muestras de todos los registros que serán procesados por la RNH, y tomando en consideración que es casi imposible que la forma de onda de los registros sísmicos sea igual, se procedió a resolver este problema calculando el espectro de Fourier a todos los registros sísmicos que vayan a procesar. De esta manera definimos que el número elementos para el vector de entrada sea de

2,048 ya que este número es conveniente tanto para los cálculos de los espectros como para la topología de la RNH.

3.3.2 TOPOLOGÍA DE LA RED NEURONAL HÍBRIDA.

A continuación se describe el modelo propuesto para la topología de la RNH basado en el tipo de reglas que se implementan. En este modelo ANFIS el consecuente es una ecuación lineal de primer orden, básicamente es una implementación de una inferencia de tipo Sugeno de primer orden. Recordando que una inferencia de tipo Sugeno, es una inferencia difusa, en la cual la consecuencia de cada regla es una combinación lineal de las entradas y la salida es una combinación lineal ponderada de las consecuencias. (Jang, 1993). Para este tipo de sistema, las reglas se presentan en la fórmula número 2:

$$\text{Si } x_1 \text{ es } A_1 \text{ y } x_2 \text{ es } A_2, \text{ entonces } y = px_1 + qx_2 + r \quad (2)$$

donde x_1 y x_2 son entradas, A_1 y A_2 son los correspondientes conjuntos de términos, y representa la salida, p, q y r son constantes.

La figura 18 muestra gráficamente la topología de RNH propuesta, la cual consta de cinco capas. En la Capa 1 existen dos unidades por cada valor de entrada, esto es debido a que hay dos conjuntos difusos para cada valor de entrada {bajo, alto}. En la Capa 2 el número de unidades es igual al número de reglas para el sistema de inferencia difuso. En la Capa 3 se calcula la fuerza de disparo de todas las reglas. En la capa 4 cada nodo es un nodo adaptivo y es aquí donde se ejecuta el

consecuente de las reglas. En la Capa 5 existe un solo nodo el cual produce la salida como la suma de las señales de entrada.

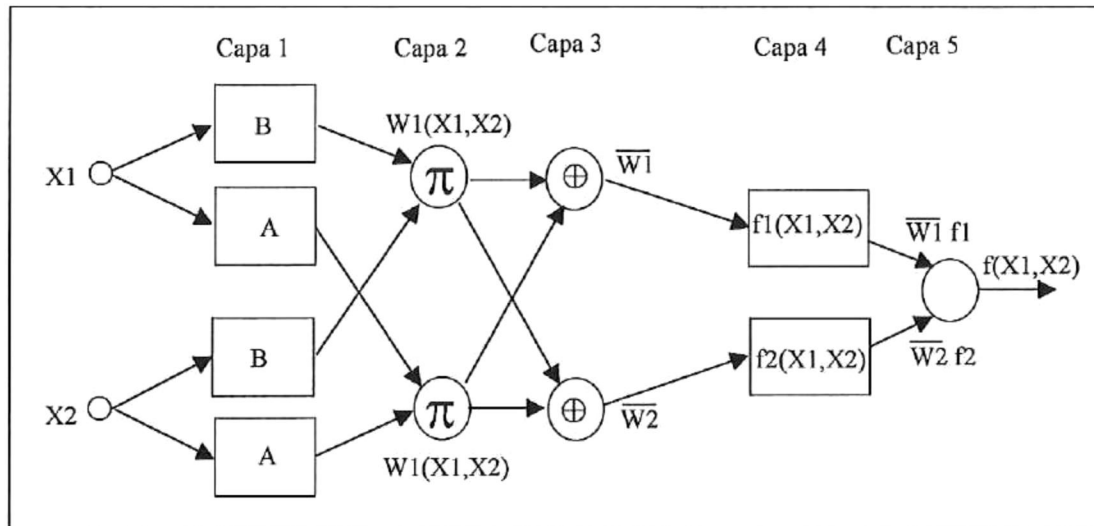


Figura 18.- Topología de la red neuronal híbrida.

3.3.3 FASE DE APRENDIZAJE.

Inicialmente para entrenar la RNH se seleccionó un conjunto de registros sísmicos, los cuales representan ejemplos típicos de ruido (Figura 19a), disparo en falso (Figura 19b), evento sísmico (Figura 20a) y evento sísmico ruidoso (Figura 20b). Estos registros fueron elegidos ya que previamente se conoce su clasificación, la cual forma parte del entrenamiento supervisado de la RNH. Posteriormente se generó el sistema de inferencia difuso tipo Sugeno utilizando la función *genfis1*, es en esta etapa donde se proporcionan los datos previamente seleccionados para entrenar la red, el número de funciones de membresía y el tipo de función de membresía ya que estos parámetros forman las condiciones iniciales para el entrenamiento.

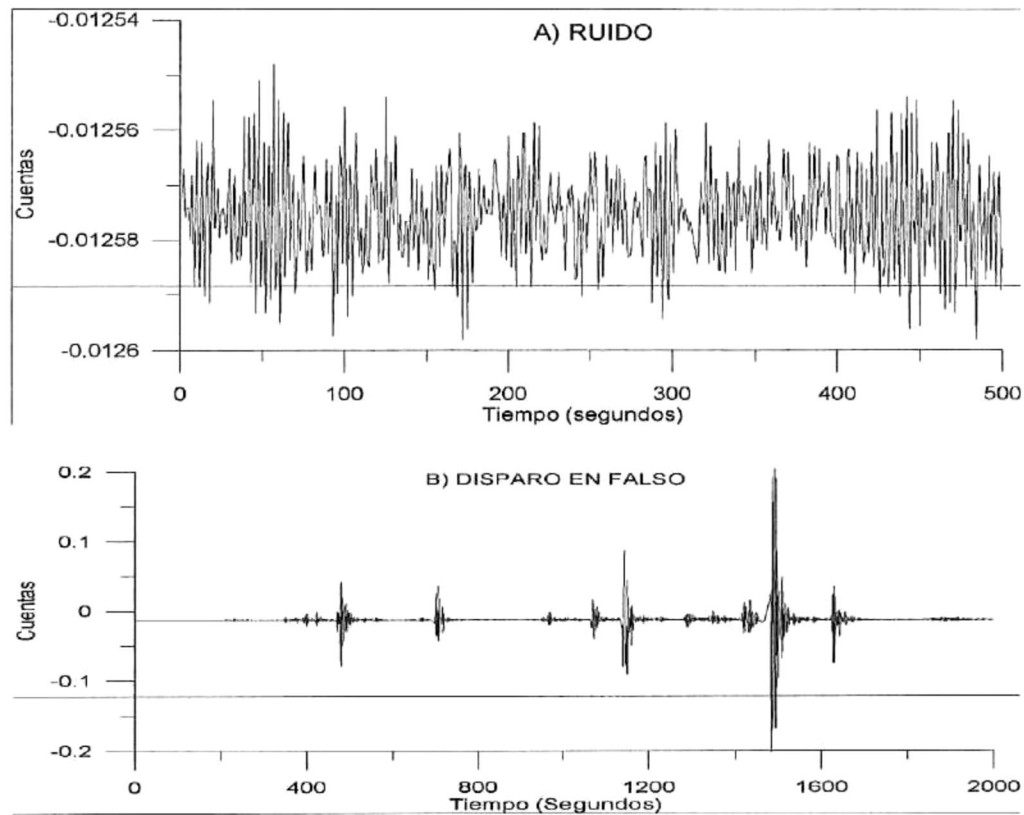


Figura 19.- a) Ruido, b) Disparo en falso.

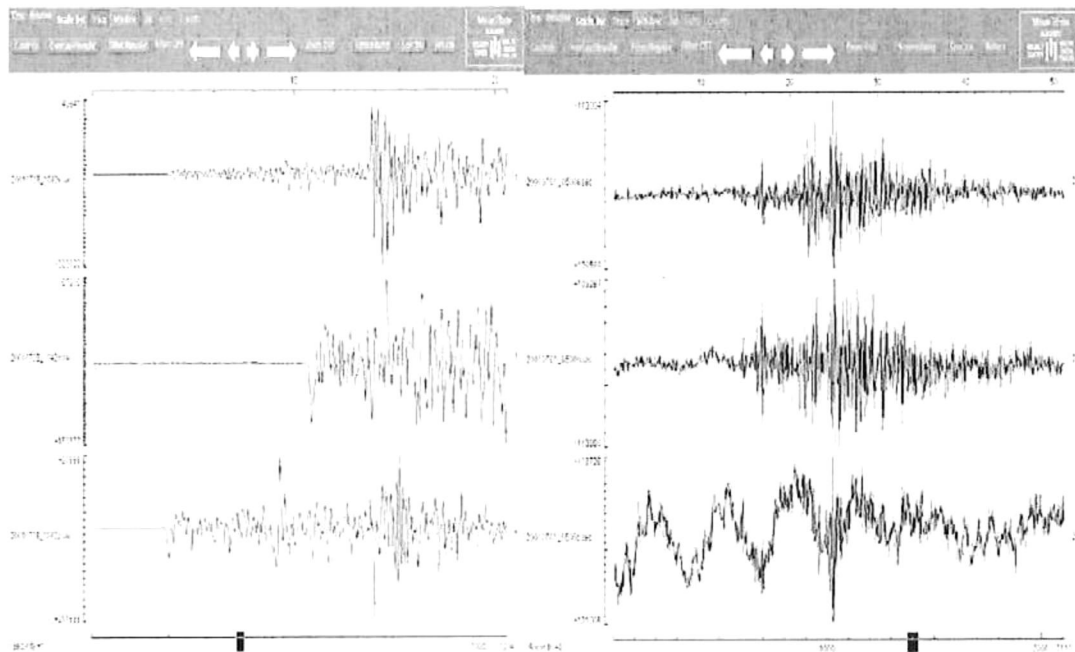


Figura 20.- a) Evento sísmico, b) Evento sísmico ruidoso.

La función *anfis* aplica el método de mínimos cuadrados y retropropagación para identificar parámetros lineales y no lineales, respectivamente para el sistema de inferencia difuso tipo Sugeno generado en la etapa anterior. Una vez hecho esto se dieron junto con los parámetros de aprendizaje el número de iteraciones que fue de 100 y una tolerancia de 0.001 (Figura 21) y es en esta forma como se efectuó el entrenamiento.

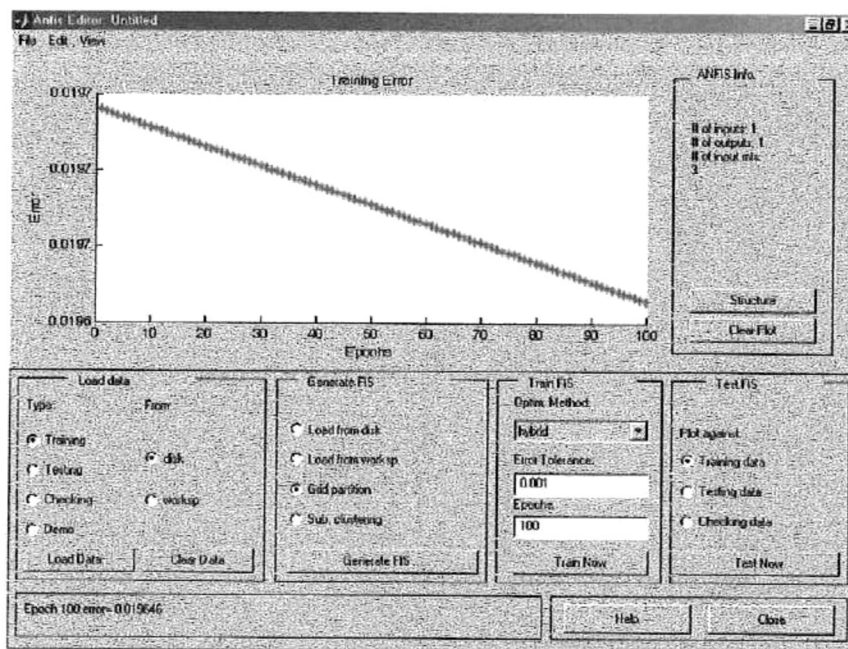


Figura 21.- Fase de aprendizaje.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

En el presente capítulo se describe las pruebas que se realizaron a la RNH y los resultados que se obtuvieron al utilizar la red neuronal híbrida, la cual fue diseñada bajo el paradigma ANFIS, y entrenada como se describió en el capítulo anterior.

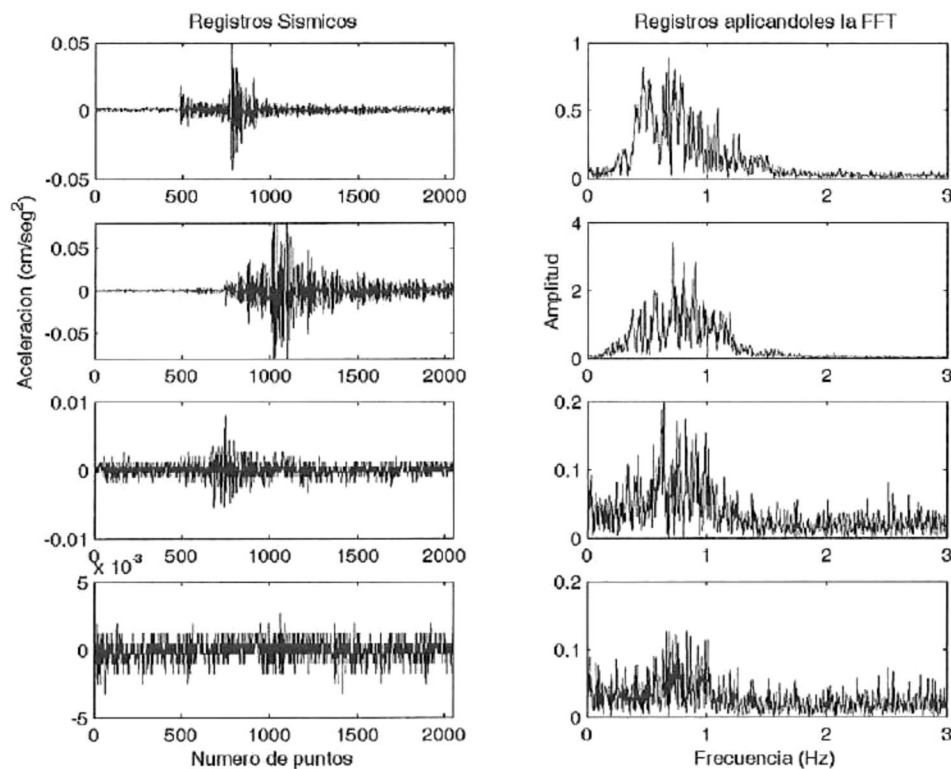


Figura 22.- Algunos datos de prueba.

Los registros sísmicos utilizados en la prueba fueron obtenidos por la red sismológica de la Paz Baja California Sur y fueron grabados durante un periodo

de un año, cabe mencionar que existen mucho más datos, pero para realizar la prueba solamente se utilizaron aproximadamente mil trazas, es por ello que en la figura 22 solo se muestran algunos de los datos utilizados. En la misma figura se muestra la gráfica correspondiente a los espectros de Fourier que constituyen la entrada a la RNH.

4.1 PRUEBA DE LA RED NEURONAL HÍBRIDA.

Inicialmente se tomaron los registros en formato crudo y se transformaron a formato ASCII utilizando un programa proporcionado por el fabricante de las grabadoras digitales, posteriormente por medio de un programa desarrollado por personal técnico de CICESE, se le hicieron algunas transformaciones necesarias para tomar parámetros importantes y actualizar la base de datos de la red sismológica de La Paz. A continuación se les calculó el espectro de Fourier lo cual constituye la entrada a la RNH. Las pruebas que se realizaron a la RNH fueron hechas en el ambiente de MATLAB, utilizando el sistema neurodifuso desarrollado.

En la figura 23 se muestra la interfase que presenta la RNH al estar clasificando los registros sísmicos, las cruces azules representan la información de entrada, al aplicarle el espectro de Fourier y los puntos rojos representan la clasificación efectuada por la RNH. Como podemos observar la clasificación hecha por la red se aproxima en gran medida a los datos que se están analizando, esto es debido a

que la red compara las entradas con lo que ha aprendido y selecciona un resultado, dicho resultado es la aproximación más cercana ya sea ruido, evento sísmico, sísmico ruidoso o disparo en falso.

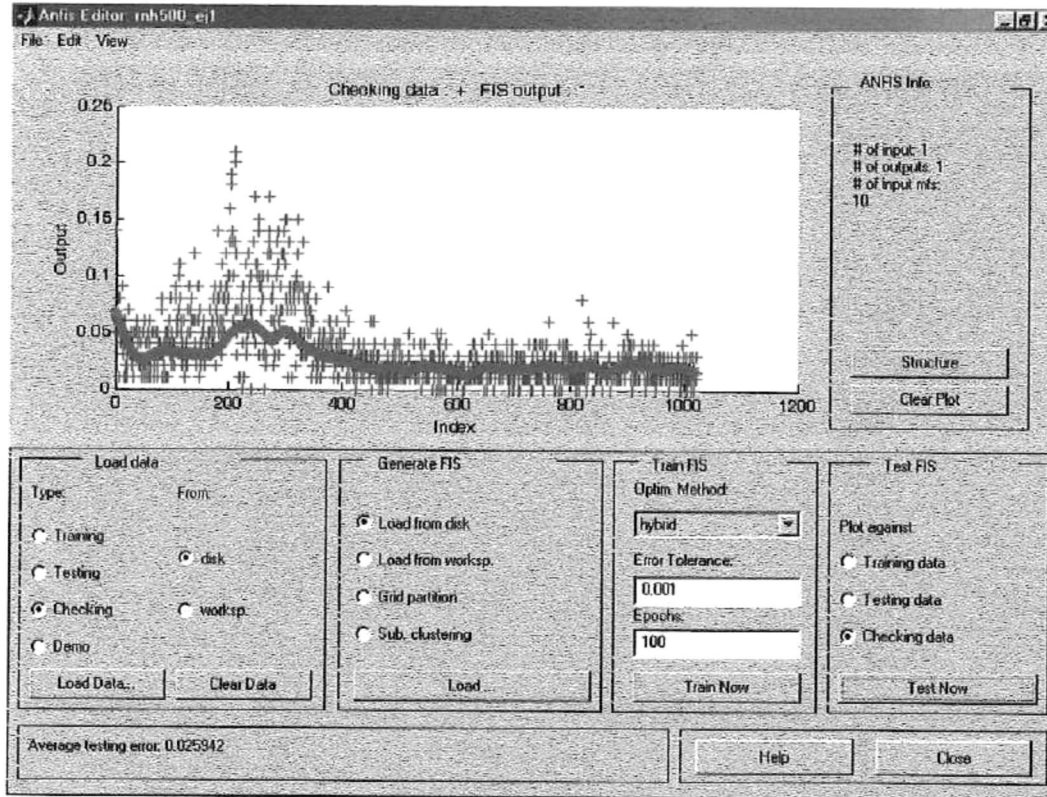


Figura 23.- Prueba de la red neuronal híbrida.

El tiempo que se tomo en haber clasificado las mil trazas fue aproximadamente de tres días. Un operador haciendo manualmente la misma tarea con un número similar de registros, tarda aproximadamente 2 semanas. Comparando lo anterior se observa que la diferencia en tiempos es bastante significativa.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES.

La evolución de tecnologías ha propiciado crear nuevas metodologías para resolver problemas inherentes a dicha evolución, el emplear paradigmas híbridos en el ámbito de la Inteligencia Artificial; como en este caso particular donde se combinaron las redes neuronales con lógica difusa, utilizando el paradigma ANFIS aplicándolo a la sismología, ofrecen una perspectiva distinta a la solución de problemas dentro del campo científico y tecnológico.

Al realizar la clasificación a registros sísmicos que se generaron a lo largo de un año, se pudo observar la robustez de un sistema híbrido, ya que comparando el tiempo empleado por la RNH en la depuración de esa gran cantidad de registros con el tiempo utilizado por una persona redujo en un 70%, y cabe mencionar que la confiabilidad de los resultados es muy similar a la del humano.

APÉNDICE A

DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

Aceleración. Es la proporción a la cual la velocidad cambia, ya sea incrementándose o decrementándose.

Acelerograma. Es una gráfica que muestra la aceleración del suelo durante un sismo.

Acelerómetro. Es un instrumento que graba la aceleración del suelo durante un sismo.

Amplitud. Es el tamaño de las oscilaciones de un registro sísmico.

Atenuación. Es el decremento en tamaño o amplitud de las ondas.

Enjambre. Consisten en un gran número de eventos. Los eventos que lo constituyen raramente son muy grandes y es característico de zonas donde la corteza terrestre puede alcanzar altas temperaturas, como las volcánicas, geotérmicas y de creación de nueva corteza terrestre.

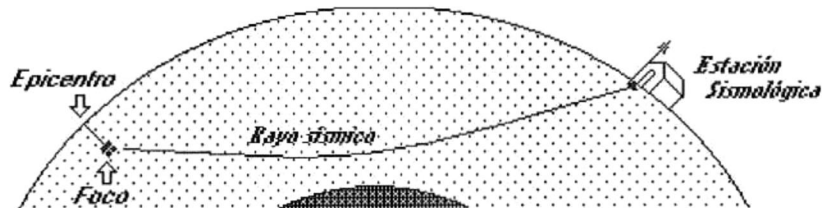


Figura 24 Algunos conceptos de sismología

Epicentro. Es la proyección del hipocentro (foco) sobre la superficie terrestre (Figura 2).

Escala de Richter. Para cuantificar o medir el tamaño de un temblor se utilizan las escalas de magnitud e intensidad. La escala de Magnitud o Richter esta relacionada con la energía que se libera durante un temblor y se obtiene en forma numérica a partir de los registros obtenidos con los sismógrafos.

Escala de Mercalli. La escala de Intensidad o Mercalli está asociada a un lugar determinado y se asigna en función a los daños o efectos causados al hombre y sus construcciones.

Estación sismológica. Se refiere al lugar donde un instrumento geofísico es instalado.

Falla. Es una fractura en la corteza terrestre y manto superior donde el material rocoso presenta rupturas y deslizamientos. Las fallas son causadas por terremotos y estos, a su vez ocurren en fallas preexistentes.

Fallamiento. Consiste en la liberación repentina de los esfuerzos impuestos al terreno.

Frecuencia. Es el número de veces que sucede algo en un cierto periodo de tiempo, tales como el movimiento de la tierra durante un sismo.

GPS (Global Positioning System). Es una constelación de 24 satélites artificiales uniformemente distribuidos en un total de 6 órbitas, de forma que hay 4 satélites por órbita. Esta configuración asegura que siempre puedan "verse" al menos 8 satélites desde casi cualquier punto de la superficie terrestre. Cada satélite

transmite señales de radio a la Tierra con información acerca de su posición y el momento en que se emite la señal. Podemos recibir esta información con receptores GPS, que decodifican las señales enviadas por varios satélites simultáneamente y combinan sus informaciones para calcular su propia posición en la Tierra, es decir sus coordenadas de latitud y longitud con una precisión de unos 10 metros. Hay receptores más sofisticados que pueden determinar la posición con una precisión de unos pocos milímetros.

Hertz (Hz). Es una unidad de medida llamada así en honor de Heinrich Hertz, físico Alemán que en 1887 produjo por primera vez ondas electromagnéticas. La frecuencia es expresada en ciclos por segundo; $1 \text{ Hz} = 1 \text{ ciclo por segundo}$.

Hipocentro (Foco). Lugar donde comienza el fallamiento que produce un temblor (Figura 2).

Latitud. Es la localización de un punto al norte o al sur del Ecuador. La latitud se muestra en un mapa como líneas con dirección Este-Oeste y paralelas al Ecuador.

Longitud. Es la localización de un punto al este o al oeste según el meridiano de Greenwich. La longitud es mostrada en un mapa como líneas con dirección Norte-Sur .

Magnitud. Los sismólogos usan la escala de magnitud para representar la energía sísmica liberada por cada terremoto.

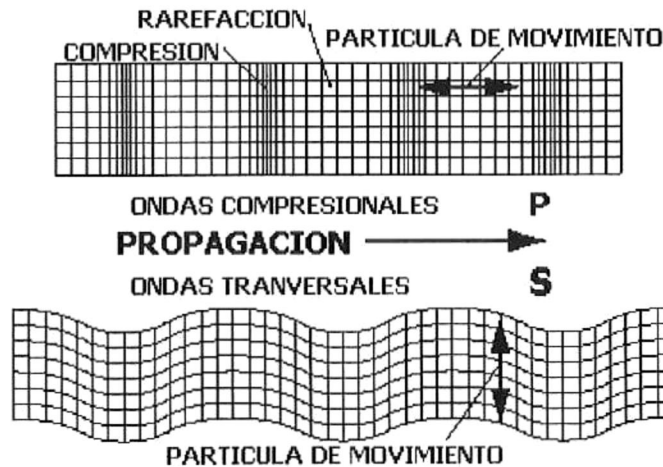


Figura 25.- Ondas P y Ondas S.

Onda P. Son las ondas primarias o compresionales, esto quiere decir que cuando a un sólido se le transmiten compresiones y rarefacciones (como en el caso de la transmisión del sonido), las partículas del medio se mueven en el mismo sentido en que se propaga la onda. De las ondas sísmicas, la onda P es la más rápida (Figura 3).

Onda S. Son las ondas secundarias también llamadas transversales o de cizallamiento; las partículas se mueven ahora en dirección perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Las ondas S son más lentas que las ondas P y no pueden viajar a través de un líquido (Figura 3).

Periodo natural. Es la frecuencia a la cual un objeto o sistema en particular vibra cuando es movido por una fuerza o impulso y no está influenciado por alguna fuerza externa o amortiguamiento. Preevento. Son los temblores que ocurren antes (de segundos a meses) de un temblor grande (llamado evento principal) y que

tienen el efecto de concentrar los esfuerzos que darán lugar a éste, se llaman sismos premonitores o preeventos.

Provincia extensional. La provincia extensional del Golfo de California comprende la región al oeste de la Sierra Madre Occidental hasta el escarpe principal del golfo en la península de Baja California.

Rarefacción. Es la contaminación o enrarecimiento de un medio.

Red sismológica. Conjunto de instrumentos electrónicos de precisión, compuestos principalmente por la grabadora digital, sismómetro o acelerómetro y antena GPS.

Réplica. Sismo que ocurre posterior y su epicentro es muy cercano a otro de mayor intensidad.

Sismo. Es un rompimiento repentino de las rocas en el interior de la Tierra. Esta liberación repentina de energía se propaga en forma de ondas que provocan el movimiento del terreno.

Sismograma. Es una gráfica donde se traza el movimiento de la tierra.

Sismología. Es la rama de la geofísica que estudia el fenómeno de los temblores que ocurren en nuestro planeta Tierra. Sus principales objetivos son:

- I) El estudio de la propagación de las ondas sísmicas en el interior de la tierra a fin de conocer su estructura interna.
- II) El estudio de las causas que dan origen a los temblores.
- III) La prevención de daños.

Sismómetro. Es un instrumento que registra las ondas sísmicas.

Sismo trepidatorio u oscilatorio. Al generarse un temblor las ondas sísmicas se propagan en todas direcciones, provocando el movimiento del suelo tanto en forma horizontal como vertical. En los lugares cercanos al epicentro, la componente vertical del movimiento es mayor que las horizontales y se dice que el movimiento es trepidatorio. Por el otro lado al ir viajando las ondas sísmicas, las componentes se atenúan y al llegar a un suelo blando, las componentes horizontales se amplifican y se dice que el movimiento es oscilatorio.

Telesismo. Es un sismo muy distante (más de 20 grados) desde la estación donde se graba.

Triaxial. Equipo que cuenta con tres ejes: vertical, norte-sur y este-oeste.

Velocidad. Es que tan rápido un punto en la tierra es sacudido como resultado de un sismo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [●] Abe, K. (1979), "Magnitudes of major volcanic earthquakes of Japan 1901 to 1925".
J. Fac. Sc., Hokkaido Univ., Ser. VII, vol. 6, pp. 201-212.
- [●] Andina, de la Fuente Diego.(2001), "Tutorial de redes neuronales". *Universidad Politécnica de Madrid*.
- [●] Bard, P., y M. Bouchon (1985), "The two dimensional resonance of sediment filled valleys". *Bull. Seism. Soc. Amér.*, vol. 75, pp. 519-541.
- [●] Bullen, K (1963), *An Introduction to the Theory of Seismology*. Tercera edición, Cambridge University Press, G. B.
- [●] Benioff, H. (1951), "Earthquakes and rock creep", Primera parte. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, vol. 41, pp. 31-62.
- [●] Brune, J. (1976), "The physics of earthquake strong motion, en *Seismic Risk and Engineering Decisions*, C. Lomnitz y E. Rosenblueth (comps.), Elsevier Scientific. Publ. Co., Países Bajos, pp. 141-177.
- [●] Burridge, R., G. Conn y L. Freund (1979), "The stability of a rapid mode II shear crack". *J. Geophys. Res.*, vol. 84, pp. 2210-2222.
- [●] Espíndola, J., y Z. Jiménez (1984), *Terremotos y ondas sísmicas*, Cuadernos del Inst. Geofis. / 1, UNAM, México.
- [●] Evison, E (1982), "Earthquake forecasting and countermeasures planning". *Earthquake. Pred. Res.*, vol. 1, pp. 115-124.

-
- [●] Faccioli, E., y D. Reséndiz (1976), "Soil dynamics: behaviour including liquefaction", en *Seismic Risk and Engineering Decisions*, C. Lomnitz y E. Rosenblueth (comps.), Elsevier Scientific Publish. Co., Países Bajos, pp. 71-139.
- [●] Friedman, Alan "Introduction To Machine Vibration", September 2003 issue of Maintenance Technology Magazine
- [●] Gaus, M., y M. Sherif (1972), "Zonation and microzonation", en *Proceeds. Int. Conf. Microzonation*, Seattle, EUA, oct.-nov. 1972, pp. 3-11.
- [●] González, M. y Munguía L. Seismicity in the region of La Paz – Los Cabos, Baja California Sur. MARGINS "Rupturing of Continental Lithosphere" Workshop: The Gulf of California Salton Trough, 27-29 October, 2000, Puerto Vallarta, México.
- [●] Hopgood, Adrian A., *Knowledge-based systems for engineers and scientists*, CRC Press, 1993.
- [●] Hussein, M., D. Jovanovich, M. Randall y L. Freund (1975), "The fracture energy of earthquakes". *Geophys. J. R. astr. Soc.*, vol. 43, pp. 367-385.
- [●] II, UNAM (1985), *El temblor del 19 de septiembre de 1985 y sus efectos en las construcciones de la ciudad de México*. Informe preliminar, Instituto de Ingeniería, UNAM, México.
- [●] Jang, J.-S. R., "ANFIS: Adaptive-Network-based Fuzzy Inference Systems," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 23, No. 3, pp. 665-685, May 1993.
- [●] Jang, Jyh-Shing Roger, Sun Chuen-Tsai, Mizutani Eiji, *Neuro-fuzzy and soft computing: A computational approach to learning and machine intelligence*, Prentice Hall, 1997.

-
- [●] Kovacs, W., y J. Yao (1972), "Microzonation in design of seismic structures", en *Proceeds. Int. Conf. Microzonation*, Seattle, EUA, oct.-nov. 1972, pp. 665-670.
 - [●] Kulkarni, Arun D., *Computer vision and fuzzy-neural systems*, Prentice Hall, 2001.
 - [●] Langer, C., M. Hopper, S. Algermissen y J. Dewey (1974), "Aftershocks of the Managua, Nicaragua, earthquake of December 23, 1972". *Bull. Seism. Soc. Amér.*, vol. 64, pp. 1005-1016.
 - [●] Lee, W., y D. Brillinger (1979), "On Chinese earthquake history An attempt to model an incomplete data set by point process analysis". *Pageoph*, vol. 117, pp. 1229-1257.
 - [●] Lefteri H. Tsoukalas, Robert E. Uhrig, *Fuzzy and neural approaches in engineering*, John Wiley & Sons, Inc., 1997.
 - [●] Lomnitz, C. (1956), "Creep measurements in igneous rocks". *Jour. Geology*, vol. 25, pp. 437-479.
 - [●] Lomnitz, C. (1974), *Global Tectonics and Earthquake Risk*. Elsevier Publish. Co.
 - [●] Mayer-Rosa, D. (1986), *Tremblements de terre. Origine, risque et aide*. Comisión Nacional Suiza de la UNESCO y Comisión Nacional Suiza de Geofísica.
 - [●] McNutt, S. (1986), "Observations and analysis of B-type earthquakes, explosions, and volcanic tremor at Pavlov volcano, Alaska". *Bull Seism. Soc. Amer.*, vol. 76, pp. 153-175.
 - [●] Minakami, T. (1974), "Seismology of volcanoes in Japan", en *Physical Volcanology*, L. Civetta, Gasparini, P., Luongo, G. y Rapolla, A. (comps.), Elsevier Scientific Publish. Co., Países Bajos, pp. 1-27.
 - [●] Minsky, M. Pappert, S. "Perceptrons: An introduction to Computational Geometry", MIT Press, Cambridge, MA, 1969.

-
- [●] Morales-Luna, G., "Elementos de lógica difusa", Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN (CINVESTAV-IPN), 2002.
- [●] Munguía, L., y J. Brune (1984), "Local magnitude and sediment amplification observations from earthquakes in Northern Baja California-Southern California region". *Bull. Seism. Soc. Amer.*, vol. 74, pp. 107-119.
- [●] NIBS Pte Ltd, *NeuroFuzzy Computing*, Technical report TR-960308, 1998.
- [●] Pedrycz, Witold, "*Computational Intelligence, An Introduction*". CRC Press, 1998.
- [●] Reid, H. F. (1910), *The Mechanism of the Earthquake, The California Earthquake of April 18, 1906*. Informe de la Comisión Senatorial de Investigación, vol. 2, Carnegie Institution, Washington, D. C.
- [●] Richter, C. (1958), *Elementary Seismology*. W. H. Freeman Co., EUA.
- [●] Rikitake, T. (1976), "Recurrence of great earthquakes at subduction zones". *Tectonophysics*, vol. 35, pp. 355-362.
- [●] Rosenblatt, F., "Principles of Neurocodynamics: Perceptrons and the theory of Brain Mechanisms", Spartan Press, Washington, 1961.
- [●] Roth, G., Tarantola, A., 1994, *Neural networks and inversion of seismic data*: Journal of Geophysical Research, B, v. 99, no 4, p. 6753-6768.
- [●] Roussel Stuart, Norving Peter, *Inteligencia artificial un enfoque moderno*, Prentice Hall, 1996.
- [●] Rumelhart, D.E., McClelland J.J., "Parallel Distributed Processing". MIT Press, Cambridge, MA, 1986.
- [●] Torsun, I. S., "Foundation of Intelligent Knowledge-Based Systems". Academic Press, 1995.

-
- [●] Tucker, B., y J. King (1984), "Dependence of sedimentfilled valley response on input amplitude and valley properties". *Bull. Seism. Soc. Amér.*, vol. 74, pp. 153-165.
- [●] Viacelli, J. (1973), "Spallation and the generation of surface waves by and underground nuclear explosion". *J. Geophys. Res.*, vol. 78, pp. 2475 ss.
- [●] Wallace, T., D. HeImberger y G. Engen (1983), "Evidence of tectonic release for underground nuclear explosions in long-period P waves". *Bull. Seism. Soc. Amer.*, vol. 73, pp. 593-613.

Ligas en INTERNET

[●] CICESE

URL: <http://www.cicese.mx/>

[●] Servicio Sismológico Nacional

URL: <http://www.ssn.unam.mx/>

[●] U.S. Department of the Interior Earthquake Hazards Program - Southern California

URL: <http://pasadena.wr.usgs.gov/>

[●] Department of Earth & Atmospheric Sciences 3507 Laclede Avenue St. Louis, MO
63103

URL: <http://www.eas.slu.edu>.

[●] Baja Satellite Images

URL: <http://www.timsbaja.com/spacephotos.html>