

Metodología para la clasificación de disartrias

E. Castillo y D. F. Lovely

Centro de Estudios de Electrónica y Tecnologías de la Información (CEETI), Universidad Central de Las Villas, Santa Clara, Cuba.
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de New Brunswick, Canadá.

RESUMEN / ABSTRACT

En el presente trabajo se aborda el tema de la clasificación de enfermedades neuronales conocidas como disartrias usando un novedoso enfoque basado en rasgos extraídos de voces patológicas mediante valoraciones objetivas y subjetivas. La metodología para la clasificación se basa en el uso de algoritmos de procesamiento digital de señales para apreciar la severidad de las perturbaciones menos confiablemente percibidas por los especialistas, mientras que las otras son tomadas directamente de las valoraciones subjetivas. El proceso de clasificación evalúa dos clasificadores, uno lineal y otro no lineal, y compara su efectividad con el sistema tradicional de diagnóstico diferencial de disartrias. El objetivo fundamental del proceso de clasificación es no solo proporcionar un elevado porcentaje de clasificación correcta, sino suministrar información precisa acerca de la contribución de los rasgos a la decisión del clasificador. El clasificador no lineal, basado en mapas auto-organizados de Kohonen, proporciona una mayor efectividad en la clasificación que los clasificadores restantes, permitiendo correlacionar los rasgos de la voz con la localización de la lesión dentro del sistema nervioso central o periférico (SNCP). El sistema experto que incluye la metodología y el clasificador no lineal proporciona a los especialistas una herramienta potente para el estudio y el diagnóstico de este tipo de enfermedad.

Palabras clave: sistemas expertos, procesamiento digital del habla, disartria, mapas autoorganizados.

This work deals with the assessment of neurological diseases known as dysarthrias, using a novel approach based on features extracted from pathological speech signals in a combined mode through perceptual and objective measures. The assessment process evaluates the performance of two different classifiers and compares them with the traditional assessment system. The first approach is based on the linear discriminant analysis technique and the second is based on non linear approach based on self-organizing maps artificial neural networks. The methodology relies on the use of digital signal processing algorithms to appraise the severity of those features less reliably judged by the clinicians, while the others are taken directly from perceptual judgments or medical records. The main objective of the classification process is not only to provide a good percent of correct differentiation of the dysarthric groups but also provide accurate information on the contribution of the features to the decision of the classifier. The non-linear classifier outperformed the other two classifiers and provided a clearer picture of the prominence of the features to the group selection. This allows correlating the speech deviations with the location of the damage in the peripheral or central nervous system. An expert system including the methodology and the classifier provides a powerful tool for the speech language pathologist to diagnose and study this group of diseases.

Key words: expert system, digital speech processing, dysarthria, self-organizing maps.

Recibido: enero 2002

Aprobado: febrero 2002

INTRODUCCIÓN

Disartria es un término relacionado con un grupo de enfermedades neuronales que se diferencian entre sí por la localización de la lesión en el SNCP. En correspondencia con el tipo y posición de la lesión, se asocian diferentes tipos de perturbaciones en la voz que están correlacionadas con el tipo de disartria. Sin embargo, las diferencias entre estas enfermedades pueden ser muy sutiles, produciendo frecuentemente errores en

la clasificación, fundamentalmente en etapas tempranas. La voz es uno de los mecanismos más susceptibles a lesiones en el SNCP y por consiguiente es un medio muy deseado para el diagnóstico y estudio de este tipo de enfermedad.

Los métodos tradicionales para la clasificación de disartrias basados en las perturbaciones de la voz se apoyan fundamentalmente en las valoraciones subjetivas realizadas por especialistas en lenguaje patológicos como descriptores fundamentales. Las valoraciones subjetivas suelen ser imprecisas

e inconsistentes en algunos de los rasgos de la voz, especialmente cuando son realizadas por diferentes especialistas que frecuentemente tienen puntos de referencia diferentes debido a que vienen de diferentes escuelas. Esto hace que la confiabilidad y repetitibilidad del proceso de descripción de las perturbaciones sea baja, lográndose en ocasiones niveles bajos de clasificación y difíciles de estandarizar.^{1,2}

Técnicas más recientes proponen el uso de instrumentos de ayuda al diagnóstico donde las valoraciones de algunas perturbaciones son realizadas con la ayuda de dichos instrumentos. Particularmente, la utilización de algoritmos de procesamiento digital de señales (PDS) es muy útil para mejorar la confiabilidad de las valoraciones realizadas y permitir un análisis consecuente, no solo en diferentes realizaciones en un mismo paciente, sino también cuando se analizan grabaciones de diferentes pacientes con una misma patología.³

En la actualidad la tendencia en el procesamiento de voces patológicas es el de utilizar sistemas híbridos donde se utilicen valoraciones objetivas o subjetivas para apreciar la severidad de los rasgos de la voz, en dependencia de su precisión. Los resultados de las mediciones son comparados con un criterio de medida que generalmente se basa en valoraciones de expertos o en parámetros de síntesis.⁴

METODOLOGÍA

En este estudio se utilizaron grabaciones de voces patológicas de pacientes que exhiben ocho tipos de disartrias entre los que se encuentran disartria flácida (FD), espástica (SD), atáxica (AD), hipocinética [Parkinson (PD)], hipercinética [corea (HC)], distonía (HD), temblor orgánico de la voz (OVT) y mixta [Esclerosis Lateral Amyotrófica (ALS)].⁵

Las mediciones de los rasgos fueron realizadas sobre la alocución de tres ejercicios que muestran más eficientemente las perturbaciones en la voz: la lectura del párrafo "El Abuelo", la alocución de la vocal $\backslash a \backslash$ sostenida (AVS) y la repetición de las sílabas $\backslash pa \backslash ta \backslash ka$. Las grabaciones utilizadas fueron tomadas de dos bases de datos, una grabada por Aronson,⁶ y otra de pacientes cubanos grabada por los autores de este trabajo. En cada base de datos se incluyeron pacientes sanos como referencia. Se analizaron un total de ciento veintisiete pacientes teniendo en cuenta un subconjunto de treinta y ocho rasgos de la voz reportados entre los más importantes para describir los tipos de disartria utilizados.⁵

Como resultado de un análisis relacionado con la correlación entre especialistas y criterios de síntesis del tipo de patología se determinaron los veinte rasgos de la voz más importantes para describir las enfermedades analizadas.⁷ Once rasgos eran apreciados más confiablemente mediante el uso de algoritmos de procesamiento digital del habla (PDH), mientras nueve rasgos son tomados directamente del promedio de las valoraciones subjetivas hechas por tres especialistas en lenguaje patológico.

RASGOS DE LA VOZ

Entre los rasgos mejor apreciados mediante algoritmos de PDS se encuentran:

Período Pitch (PL): Se define como el valor medio del período fundamental (F_o) en un segmento estable de la AVS, comparada con valores estándares de acuerdo con el sexo y edad reportados en la literatura.^{7,8} Este rasgo de la voz es difícil de apreciar subjetivamente por los especialistas debido a su interrelación con otras perturbaciones y la no linealidad en la escala de frecuencia e intensidad que caracteriza al oído humano. La medida obtenida es descrita por:

$$PL_{IDX} = P_A - TH \quad \dots(1)$$

donde:

P_A : Corresponde a la mediana del valor de F_o en el segmento más estable de la vocal sostenida $\backslash a \backslash$.

TH : Valor medio normalizado en semitonos de los valores típicos de F_o .

Rupturas del período (RTP): Se define como variaciones abruptas e incontrolables de F_o . Debido a las limitaciones del oído humano, este rasgo es mejor apreciado usando algoritmos de PDH que de forma subjetiva. El método de apreciación algorítmica es descrito por:

$$RTP = \frac{\sum_{j=1}^K I(j) + FLT_j}{\sum_{i=1}^N |F_i - FLT_i| + FLT_i} \quad \dots(2)$$

donde:

$$I(j) = \begin{cases} |F_j - FLT_j| & ; |F_j - FLT_j| > FLT_j \cdot 0,40 \\ 0 & ; |F_j - FLT_j| < FLT_j \cdot 0,40 \end{cases} \quad j = 1 \dots N \quad \dots(3)$$

F_j : Vector de los valores de F_o calculados en AVS.

FLT_j : Vector de tendencia lineal de los valores de F_o con respecto al criterio de mínimos cuadrados.

K : Total de muestras que superan el umbral del 40 % de los valores de FLT_j .

N : Número total de muestras del vector de F_o .

Temblor (Tr): Se define como una oscilación en señal de voz irradiada que se produce como una combinación de amplitud y baja frecuencia que son producidos por movimientos oscilatorios

en componentes del mecanismo de producción de la voz. Este rasgo es relevante fundamentalmente para la enfermedad OVT, donde se manifiestan unas oscilaciones entre 4-8 Hz y modulaciones de amplitud que varían del 30-10 %. El algoritmo de apreciación está basado en la prominencia de picos en la banda inferior a 30 Hz. El algoritmo primero diferencia las alocuciones de pacientes normales de las patológicas, usando un criterio basado en la kurtosis de la respuesta de frecuencia del modelo autorregresivo que caracteriza al tracto vocal y después obtiene un índice de severidad mediante la razón de la energía de los picos más prominentes en la banda de interés con respecto a la energía total de la banda de frecuencia considerada.⁷

Excesivas variaciones del nivel (ELV): Se definen como abruptas e incontrolables variaciones del nivel, presentando niveles unas veces muy altos o muy bajos. La valoración algorítmica se obtiene mediante la razón entre la energía de las transiciones que exceden una variación normalizada del 50 % de la máxima amplitud entre cada extremo y la energía total de todas las transiciones.

Voz áspera (HV): Se define como un sonido áspero, metálico o estridente, usualmente caracterizado por un excesivo esfuerzo para la fonación producido por retracciones de la lengua y estrechez del conducto vocal. La percepción de este rasgo es multidimensional por naturaleza, por consiguiente mediciones simples generalmente proporcionan información limitada acerca de las características acústicas de este tipo de perturbación.

El algoritmo de apreciación está descrito por combinaciones lineales de características de la voz entre las que se encuentran: factor de perturbación de frecuencia con tres muestras de suavización (J3), factor de perturbación de amplitud con quince muestras de suavizado (S15), relación armónicos-ruido (HNR) y el número de tramas sonoras (NVF) en la AVS. Las NVF generalmente son más numerosas en este tipo de perturbación por la constricciones del tracto vocal. La ecuación que describe la medida es:

$$HV_{Idx} = 0,82 + 0,88J3 + 1,94S15 - 0,058HNR + 0,001NVF \dots(4)$$

Voz jadeante (BV): Se define como una fonación donde las cuerdas vocales están vibrando normalmente, pero su cierre es parcial o incompleto. Esto produce que las voces con este tipo de perturbación carezcan de una estructura de armónico apropiada, una amplitud del armónico fundamental muy superior a la del segundo armónico y los armónicos superiores, un contenido de ruido significativo en la banda alta del espectro y una relación señal a ruido más baja que las voces normales. Debido a la multidimensionalidad de este rasgo, el algoritmo desarrollado para apreciar su severidad en voces patológicas fue obtenido mediante una combinación lineal de parámetros. Sin embargo, se desarrolló una medida que explica más del 60 % de los casos en la base de datos utilizada que contempla casi todas las características de las voces jadeantes [razón de armónicos en la señal residual (HEres)].⁷ La ecuación está descrita por:

$$BV_{Idx} = 1,75 - 0,926 GNE + 1,73 j3 + \\ + 0,070 8 HNR - 0,096 0 HEres \\ - 0,000 366 NVF \dots(5)$$

donde:

GNE: Algoritmo, razón de excitación entre los pulsos glotales.

Interrupciones de la voz (VST): Se definen como abruptos cortes en el flujo de aire que hace vibrar las cuerdas vocales como consecuencia de pérdidas temporales en el control del mecanismo fonador. La medida obtenida para describir esta perturbación (AS) esta basada en el número de muestras por debajo del 25 % del valor RMS de la señal de intensidad de la vocal sostenida con respecto al número total de muestras. La medida se describe mediante la siguiente ecuación:

$$AS_{mod} = -1,664 5 AS^2 + 5,815 3 AS + 0,136 5 \dots(6)$$

Esta medida tiene una relación no lineal con respecto a la forma en que se percibe esta perturbación por parte de los especialistas.

Inspiraciones audibles (AI): Se define como un exceso en la intensidad con que se producen las inspiraciones como resultado de un excesivo estrechamiento del tracto vocal durante la inhalación de aire hacia los pulmones. El algoritmo desarrollado para apreciar automáticamente la severidad de esta perturbación aprovecha características espectro-temporales de las inspiraciones para obtener una medida basada en la cantidad de las inspiraciones (NAI), su duración (DAI) e intensidad (AI_{RMS}).

La detección de las inspiraciones se realiza mediante un análisis de sonoridad en la alocución del párrafo, donde aquellos segmentos sordos son analizados inicialmente en el dominio del tiempo y después en el dominio de la frecuencia para extraer los segmentos correspondientes a las inspiraciones audibles. Posteriormente se obtiene el índice de severidad mediante la siguiente combinación lineal obtenida de una comparación con las apreciaciones subjetivas.

$$AI_{Idx} = - 0,087 + 0,414 NAI + 0,009 71 DAI + 42,3 AI_{RMS} \dots(7)$$

Razón del habla (R): Se define como una razón del habla más lenta o más rápida que la normal. Generalmente es medida como el número de unidades (fonemas, sílabas, palabras, frases, etcétera) por unidad de tiempo. En las disartrias esta perturbación se manifiesta comúnmente como razón lenta aunque se ha reportado razón rápida en pacientes con PD. La medida obtenida para apreciar la severidad de esta perturbación está basada en una combinación lineal del número de tramas sonoras obtenidas en la alocución del párrafo (N_v), el número de sílabas por segundo (Ss) y la duración normalizada de la alocución (NT_{dur}).⁷ La combinación lineal se expresa por:

$$R_{Idx} = - 2,44 - 0,001 61 N_v + 0,862 Ss + 6,5 NT_{dur} \dots(8)$$

Frases cortas (SP): Se definen como la ocurrencia de frases anormalmente cortas, generalmente marcadas por un exceso de pausas o inspiraciones. La medida obtenida para esta perturbación está basada en el número de tramas sordas normalizado con respecto al número promedio de sílabas por segundo producidas por alocuciones de pacientes normales.

Ráfagas cortas del habla (SRS): Se definen como la ocurrencia de ráfagas cortas del habla separadas por pausas. Esta perturbación produce segmentos entre sílabas y entre palabras más cortos que los normales con pausas más largas entre frases u oraciones. La medida que más estuvo correlacionada con las opiniones de los especialistas fue la **longitud efectiva de los segmentos articulados (ELAS)** que se obtiene como el tiempo efectivo de articulación normalizado por el tiempo promedio de articulación obtenido de pacientes normales. Los segmentos entre palabras más largos que los normales son truncados a un tiempo fijo por solo ser de interés los intervalos en que se produce la articulación.

Entre los rasgos mejor apreciados de forma subjetiva por parte de los especialistas están: **monotonía del nivel, hipernasalidad, estrés reducido, razón variable, intervalos prolongados, silencios inapropiados, estrés igual o excesivo, rupturas irregulares de la articulación y vocales distorsionadas.**

MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN

El conjunto final de medidas fue extraído para todos los pacientes de la base de datos para evaluar la efectividad de tres técnicas fundamentales de clasificación. La primera es el clasificador tradicional (figura 1) propuesto por Darley, Aronson y Brown mediante su diagnóstico diferencial de disartrias,⁵ la segunda está basada en el análisis mediante técnicas de discriminante lineal⁹ y la tercera está basada en algoritmos no lineales usando mapas autoorganizados de Kohonen.¹ Los clasificadores no solo tienen como objetivo clasificar correctamente las clases, sino permitir el estudio de la contribución que realiza cada rasgo de entrada en la selección de una clase dada y así permitir correlacionar los rasgos de la voz con la lesión en el SNCP.

El clasificador tradicional está basado en treinta y ocho rasgos apreciados subjetivamente por los especialistas en lenguaje patológico. Estos rasgos son agrupados en *clusters* y la combinación de estos *cluster* determina el tipo de enfermedad.

El clasificador mediante el algoritmo del discriminante lineal (LDA) se basa en un análisis de las clases a través de combinaciones lineales de los rasgos de entrada. La decisión se realiza sobre la ecuación que produce una máxima magnitud, lo que equivale a una mínima distancia del vector de entrada con la clase seleccionada. La implementación puede ser apreciada en la figura 2.

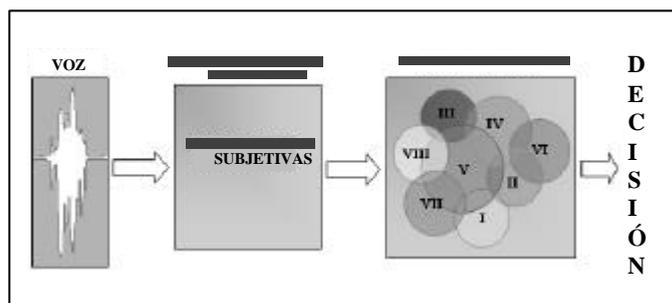


Figura 1
Diagrama en bloques del clasificador tradicional.

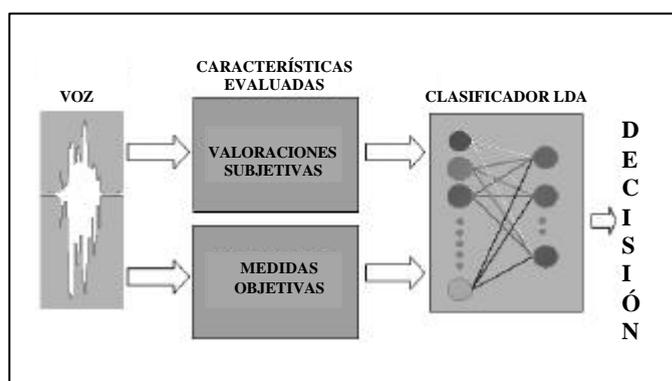


Figura 2
Diagrama en bloques del clasificador mediante discriminante lineal.

El clasificador no lineal está basado en el uso de redes neuronales artificiales, específicamente en los mapas autoorganizados de Kohonen (SOM). Este tipo de red neuronal aprende a reconocer las regularidades y correlaciones del conjunto de entrada y adapta las respuestas futuras de acuerdo con las entradas. Este tipo de red no solo aprende a reconocer grupos de vectores de entrada similares, sino que también las neuronas vecinas aprenden a reconocer la vecindad de las secciones delimitadas por el espacio de entrada.

Por consiguiente, las SOM aprenden la distribución y la topología de los vectores de entrada que son usados para su entrenamiento y producen un vector de pesos asociados a cada neurona que sirve para identificar cuáles de los rasgos de entrada contribuyen más a la decisión final del clasificador. Esto determina su uso en este tipo de aplicación donde el análisis de la contribución de los rasgos es decisivo para el estudio de este grupo de enfermedades. La figura 3 muestra el diagrama en bloques del clasificador diseñado para la aplicación de este tipo de red neuronal a la clasificación de disartrias.

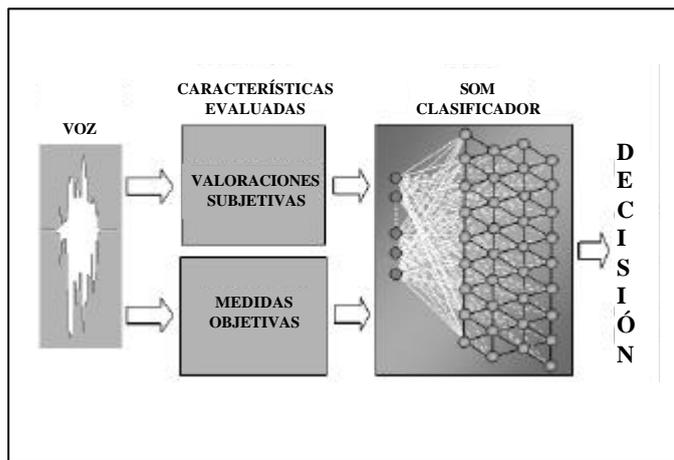


Figura 3
Diagrama en bloques del clasificador mediante mapas auto-organizados.

MÉTODOS DE EVALUACIÓN

La evaluación de la efectividad de los métodos utilizados se realizó mediante la clasificación de los ciento veintisiete casos de las bases de datos seleccionadas para este estudio. El número de rasgos en los casos de LDA y SOM analizados permanecieron constantes para mantener una uniformidad en la evaluación de la efectividad de los métodos. En cada método se analizaron las coincidencias de los casos clasificados correctamente con respecto a la clasificación original dada por los especialistas utilizando varios métodos que incluyen otras formas de estudio como tomografía axial computarizada, análisis de reflejos, resúmenes de historias clínicas, etcétera.

RESULTADOS

El conjunto de rasgos extraídos de las voces patológicas fue sometido a la clasificación usando el clasificador lineal (LDA) y el no lineal (SOM) y comparado posteriormente con los resultados del método de clasificación tradicional. Los resultados indican que el clasificador LDA permite un porcentaje de clasificación correcta (PPC) de 81,1 %, superando la efectividad mostrada por el clasificador tradicional (PPC = 66,1%) en un 15 %. El clasificador SOM permite un PPC de 85,8 %, superando al clasificador LDA y el tradicional alrededor de 20 % y 5 % respectivamente.

Los resultados obtenidos muestran una superioridad de los métodos de clasificación que usan combinaciones de parámetros valorados subjetiva y objetivamente comprobando la efectividad de esta nueva metodología desarrollada. Sin embargo, no se aprecia una diferencia aplastante entre la efectividad del clasificador LDA y el SOM. La gran diferencia entre ambos está dada en que el clasificador usando el SOM no solo brinda un

PPC más alto, sino que permite un análisis más efectivo de la contribución de los rasgos de entrada a la decisión del clasificador. Esto permite correlacionar más confiablemente la lesión en el SNCP con los rasgos distintivos de la voz y por consiguiente, con los tipos de disartrias.

El clasificador SOM también tiene la ventaja que permite una representación gráfica bidimensional de la distribución espacial de los vectores de la base de datos usada en el entrenamiento y proporciona una realimentación gráfica al especialista de la ubicación del nuevo paciente dentro del mapa autoorganizado confeccionado en la etapa de entrenamiento.

La figura 4 muestra el mapa que se obtuvo de entrenar una SOM con veinte neuronas en la capa de entrada y una capa representacional de 9X9 neuronas entrenada con una configuración hexagonal en celosía y una función de vecindad de burbujas para obtener una mejor información visual en el mapa conformado. Se puede apreciar cómo las neuronas se agrupan en los nueve grupos clasificados (incluyendo la clase normal), definiendo vecindades bien marcadas entre ellos. Los grupos con menor distancia son FD y SD con respecto a ALS debido a que este último grupo es una disartria mixta compuesta por los dos primeros grupos. Por consiguiente, se comprueba que la agrupación obtenida en el mapa contiene valiosa información acerca de la distribución espacial de los tipos de disartrias estudiados.⁷

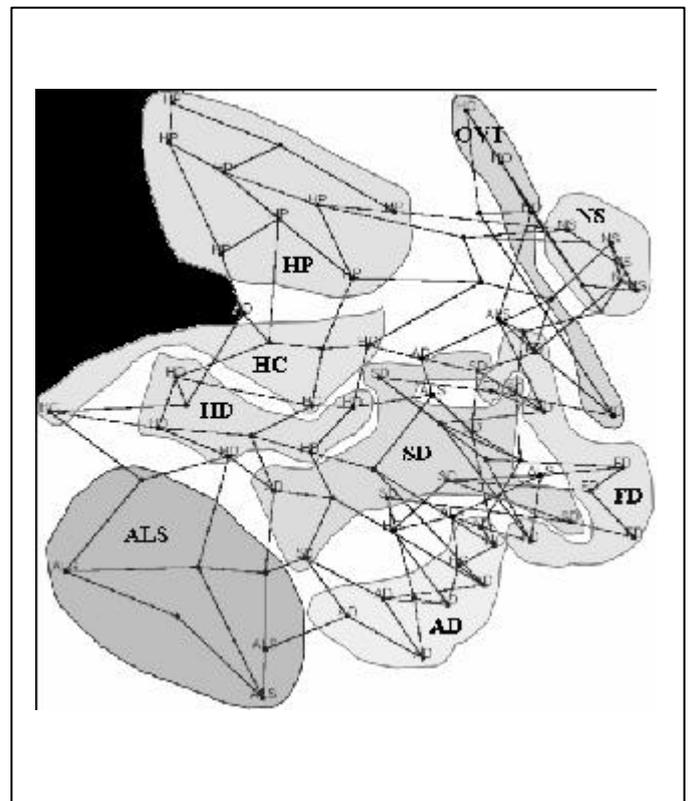


Figura 4
Representación bidimensional del mapa autoorganizado de la red neuronal artificial.

DISCUSIÓN

Los resultados mostrados comprueban que el clasificador usando SOM es superior a los demás clasificadores no solo por presentar una efectividad mayor en la clasificación sino por proporcionar también más información a los especialistas mediante la representación visual del mapa autoorganizado. Este mapa influye directamente en la opinión de los especialistas pues contribuye a lograr una mayor credibilidad de los resultados del clasificador lo que repercute en un uso mayor en la práctica diaria.

El clasificador mediante SOM también supera a los demás métodos en cuanto a la precisión del análisis de la contribución de los rasgos en la decisión. Este análisis se realiza inspeccionando la magnitud y el signo de los pesos asociados al centroide de las neuronas que responden a cada clase. De este modo los pesos positivos y de magnitud mayor influirán más en la decisión del clasificador y por consiguiente serán más representativos de esa clase o grupo. Contrariamente, aquellos pesos negativos no son característicos de esa clase. De esta manera el análisis de la contribución de los rasgos se realiza de forma más sencilla y fácil de entender por parte del personal médico.

CONCLUSIONES

Se ha demostrado mediante el análisis realizado que los ocho grupos de disartrias estudiados son aquellos precisamente descritos mediante rasgos obtenidos a través de combinaciones de valoraciones objetivas y subjetivas.

El clasificador no lineal que usa SOM ha mostrado resultados superiores a los restantes y constituye una excelente herramienta el estudio de este tipo de enfermedad mediante su integración a un sistema experto diseñado para estos fines.

REFERENCIAS

1. KOHONEN, T.: "Self-organized Formation of Topologically Correct Features", *Biological Cybernetics*, Vol. 43, pp. 59-69, 1982.
2. KENT, R. D. *et al.*: "Acoustic Studies of Dysarthric Speech: Methods, Progress and Potential", *J. Com. Dis.*, Vol. 32, pp. 141-186, 1999.
3. FRÖHLICH, M.; D. MICHAELIS & H. W. STRUBE: "Acoustic 'Breathiness Measures' in the Description of Pathologic Voices", *Proceedings of ICASSP '98*, Vol. 2, pp.937-940, paper No. 1738, 2001.
4. KENT, R. D. & M. J. BALL: *Voice Quality Measurement*, Singular Publishing Group, Inc, 2000.
5. DARLEY, F. L; A. E. ARONSON & J. R. BROWN: "Differential Diagnostic Patterns of Dysarthrias", *JSHR*, Vol. 12, pp. 462-496, 1969a.

6. ARONSON, A. E.: "Dysarthrias: Differential Diagnosis" (audio tape), Rochester, MN: Mentor Seminars, 1993.
7. CASTILLO GUERRA, E.: "A Modern Approach to Dysarthria Classification", Ph.D. Thesis at University of New Brunswick, Canada, 2002.
8. BAKEN, R. J.: *Clinical Measures of Speech and Voice*, Singular Publishing Group, Inc, 1996.
9. HERMANSKY, H. & N. MALAYATH: "Spectral Basis Functions from Discriminant Analysis", *Proceedings ICSLP'98*, Sydney, Australia, November, 1998.

AUTORES

Eduardo Castillo Guerra

Ingeniero Electrónico, Máster en Telecomunicaciones, Doctor en Ciencias. Labora como Investigador Agregado. Ha laborado como asistente de investigaciones en el Instituto de Ingeniería Biomédica de la Universidad de New Brunswick, Canadá. Tiene varios cursos impartidos a nivel de posgrado y pregrado en Cuba y en Canadá. Es miembro de la Sociedad de Ingeniería Biomédica y Biológica de Canadá y miembro de la Sociedad de Ingenieros Profesionales de New Brunswick, Canadá, miembro Titular de la Sociedad Cubana de Bioingeniería de la Sociedad Cubana de Reconocimiento de Patrones.
Correo electrónico: ecastillo@uclv.edu.cu

Denis F. Lovely

Ingeniero Electricista, Doctor en Filosofía, especialidad, Ingeniería Eléctrica. Su trabajo científico está relacionado con la instrumentación y procesamiento de señales biomédicas.

Vol. XXVI, No. 1, 2005

CONGRESOS INTERNACIONALES

The Joint Meeting of the 5th Intl Conference on Bioelectromagnetism and 5th Intl Symposium on Noninvasive Functional Source Imaging within the Human Brain and Heart
12 – 15 May 2005
Minneapolis, Minnesota
<http://bemnfsi.umn.edu/>