

EMPLEO DE REDES NEURONALES PARA LA ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE NÍQUEL EN CORTEZA LATERÍTICA CON MÉTODOS RADIOACTIVOS DE POZOS

*Marcial Guerra, **Jorge Ruiz,***Nelson Ebecken, ****Luiz Landau, *****Josias Silva.

Empresa Geominera Oriente, Cuba, mguerra@geominera.co.cu
 Departamento de Geociencias de ISPJAE, Cuba, jorge@civil.cujae.edu.cu
 COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, nelson@ntt.ufrj.br
 COPPE-UFRJ, LAMCE, Rio de Janeiro, landau@lamce.ufrj.br
 COPPE-UFRJ, Laboratório 2m, Rio de Janeiro, jsilva@lab2m.coppe.ufrj.br

(Recibido: el 3 de Febrero de 2014 y aceptado 14 de Mayo de 2014)

<p>Resumen: El objetivo del actual trabajo es definir de forma preliminar los grupos que componen la Corteza Laterítico – Niquelíferas Cobaltíferas del Yacimiento Punta Gorda en Cuba, mediante redes neuronales aplicadas a un conjunto de registros radioactivos de pozo de acuerdo a una clasificación geológica previamente determinada. Se realiza además la evaluación del contenido de Níquel en cada uno de los grupos definidos aplicando también redes neuronales</p>	<p>Abstract: The aim of the present work is a preliminary set of groups that make up the Crust Laterítico Niquelíferas Cobaltíferas of Punta Gorda Reservoir in Cuba by neural networks applied to a set of radioactive well logs according to a predetermined geological classification. It also undertakes assessment of nickel content in each of the defined groups also implementing neural networks.</p>
<p>Palabras clave: Redes Neuronales; Geofísica de pozos; Lateritas.</p>	<p>Key words: Neural Network; Well Log, Lateritas.</p>

1. INTRODUCCIÓN

El empleo de las redes neuronales para la clasificación de grupos poblacionales de datos, en particular, determinación de la composición de las rocas, evaluación estratigráfica, determinación de las propiedades físicas y otras, mediante las mediciones de los métodos geofísicos de pozo en las investigaciones para petróleo, minerales sólidos, hidrogeología y otras, es una realidad en la actualidad y reconocida a nivel internacional. Sin embargo, estas técnicas no han sido aplicadas en el estudio de las rocas cortadas por los pozos realizados en los yacimientos lateríticos en Cuba con la finalidad de clasificar a las distintas formaciones que las componen y determinar en cada una el contenido de alguno de los elementos que industrialmente contienen estas.

Las cortezas Lateríticos Ferro – Niquelíferos Cobaltíferas del Yacimiento de Punta Gorda del Noreste de Cuba Oriental, presentan relativamente altos valores industriales de Níquel y otros elementos. Las cortezas son generadas en rocas madres ofiolíticas máficas y ultramáficas por procesos químicos de hidratación, lixiviación e hidrólisis, que dan lugar a la acumulación de algunos elementos químicos y la lixiviación de otros, y que sus características dependen de las condiciones climáticas de la región, de su geomorfología, del tipo de roca madre y del grado de tectonismo fundamentalmente.

Los procesos de generación de las cortezas lateríticas dan lugar a diferentes concentraciones de los elementos químicos útiles que contienen, aunque no son muy elevadas las variaciones y los contenidos de los elementos químicos de interés en las mismas, con excepción del hierro, si es importante su evaluación para el proceso de beneficio industrial.

En este sentido, para el estudio de La zona de La corteza a beneficiar se efectúan redes de perforaciones de las que se obtienen muestras a todo lo largo de los pozos, para el análisis químico de laboratorio y en los que se efectúan además registros geofísicos. En este trabajo se describen los resultados de la aplicación de las redes neuronales con diferentes conjuntos de métodos radioactivos de pozos para la clasificación de las formaciones, geológicamente establecidas, y la determinación en cada una de ellas de sus contenidos de Níquel en una zona del yacimiento de Punta Gorda en El Oriente de Cuba.

La efectividad y las posibilidades de clasificar a las formaciones que componen las cortezas lateríticas y de obtener para cada una de ellas los contenidos de Níquel, se realiza en este trabajo, mediante la comparación de los resultados de la medición en muestras de los pozos y los obtenidos por la aplicación de las redes neuronales a los datos geofísicos de los mismos.

El empleo de las redes neuronales para la clasificación de grupos poblacionales de datos, en particular, determinación de la composición de las rocas, evaluación estratigráfica, determinación de las propiedades físicas y otras, mediante las mediciones de los métodos geofísicos de pozo en las investigaciones para petróleo, minerales sólidos, hidrogeología y otras, es una realidad en la actualidad y reconocida a nivel internacional. Sin embargo, estas técnicas no han sido aplicadas en el estudio de las rocas cortadas por los pozos realizados en los yacimientos lateríticos en Cuba con la finalidad de clasificar a las distintas formaciones que las componen y determinar en cada una el contenido de alguno de los elementos que industrialmente contienen estas.

Las cortezas Lateríticas Ferro – Niquelíferos Cobaltíferas del Yacimiento de Punta Gorda del Noreste de Cuba Oriental, presentan relativamente altos valores industriales de Níquel y otros elementos. Las cortezas son generadas en rocas madres ofiolíticas máficas y ultramáficas por procesos químicos de hidratación, lixiviación e hidrolisis, que dan lugar a la acumulación de algunos elementos químicos y la lixiviación de otros, y que sus características dependen de las condiciones climáticas de la región, de su geomorfología, del tipo de roca madre y del grado de tectonismo fundamentalmente.

Los procesos de generación de las cortezas lateríticas dan lugar a diferentes concentraciones de los elementos químicos útiles que contienen, aunque no son muy elevadas las variaciones y los contenidos de los elementos químicos de interés en las mismas, con excepción del hierro, si es importante su evaluación para el proceso de beneficio industrial. En este sentido, para el estudio de la zona de la corteza a beneficiar se efectúan redes de perforaciones de las que se obtienen muestras a todo lo largo de los pozos, para el análisis químico de laboratorio y en los que se efectúan además registros geofísicos.

En este trabajo se describen los resultados de la aplicación de las redes neuronales con diferentes conjuntos de métodos radioactivos de pozos para la clasificación de las formaciones, geológicamente establecidas, y la determinación en cada una de ellas de sus contenidos de Níquel en una zona del yacimiento de Punta Gorda en El Oriente de Cuba.

La efectividad y las posibilidades de clasificar a las formaciones que componen las cortezas lateríticas y de obtener para cada una de ellas los contenidos de Níquel, se realiza en este trabajo, mediante la comparación de los resultados de la medición en muestras de los pozos y los obtenidos por la aplicación de las redes neuronales a los datos geofísicos de los mismos.

Las redes neuronales artificiales son redes interconectadas masivamente de elementos simples, usualmente adaptativos (neuronas), y con organización jerárquica, las cuales intentan interactuar con el mundo real de igual forma que el sistema nervioso biológico.

Las neuronas biológicas funcionan recibiendo en sus conexiones exteriores (denominadas dendritas) señales de entrada que en su interior son sumadas hasta llegar a un nivel determinado de excitación, y que cuando sobrepasa un umbral determinado, emite una señal a las otras neuronas por una conexión de salida denominada axón.

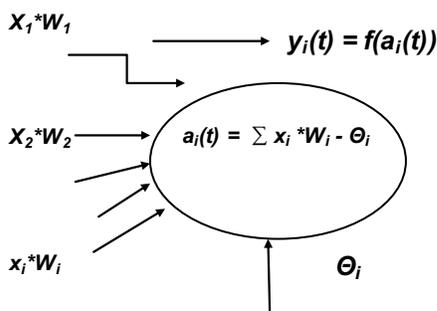


Figura 1. Esquema de la neurona artificial.

La neurona artificial trabaja de forma semejante a la biológica Figura 1. Cada neurona (*i*) está caracterizada en cualquier instante (*t*) por un valor numérico o estado de excitación $a_i(t)$ que es la suma del producto de todas los valores de entradas por sus pesos respectivos $x_i * W_i$ y el umbral de activación Θ_i .

$$a_i(t) = \sum x_i * W_i - \Theta_i$$

Asociada a cada neurona hay una función de activación o transferencia, que transforma su estado actual de activación en una señal de salida.

$$y_i(t) = f(a_i(t))$$

y el estado de excitación de la neurona de la siguiente neurona (*j*) será;

$$a_{i,j}(t) = \sum W_{ij} f(a_i(t)) + \Theta_j$$

y la señal de salida de esta neurona será:

$$y_{ij}(t) = f(a_{ij}(t))$$

De esta forma, cada neurona al recibir un conjunto de señales emitirá hacia la siguiente otra y este proceso ocurre en toda la red.

Existen diferentes funciones de transferencia tales como: identidad (purelin), escalón, sigmoidea (tansig) y otras. Estas funciones determinan los valores de salida y los límites que puede alcanzar estos.

La distribución de las neuronas dentro de la red se confecciona, formando capas de un número determinado de ellas. Se distinguen tres capas fundamentales: de entrada, oculta o intermedia y de salida, que reciben la información externa de la red, procesa de diferentes formas la información dentro de la red y transfieren la información de la red hacia el exterior, respectivamente.

La forma de conexión de las neuronas de la red y el número de sus capas define sus tipos, características y funcionamiento.

Después de conformada la red, esta se entrena, es decir, se logra su aprendizaje, que es el proceso por el cual se modifican los pesos (W_{ij}) y los umbrales de activación Θ_i de cada una de las neuronas que componen las distintas capas de la red. El aprendizaje puede ser supervisado o no supervisado. La diferencia entre ambos es que existe un agente externo (supervisor) que controla el proceso de aprendizaje.

En el trabajo que se presenta, la red empleada es una red supervisada, en donde los valores de los contenidos de Níquel medidos en el laboratorio, es el elemento supervisor, que mediante los valores registrados de los métodos geofísicos de pozos, estima mediante la red los contenidos de Níquel que esta calcula. La red empleada es la denominada Backpropagation (BPN).

El funcionamiento de la red Backpropagation (BPN), en esencia, aplica un patrón de entrada a las primeras capas de la red y que se propaga por todas las capas hasta generar un valor, que se compara en las neuronas de la última capa de la red, con el valor de salida que se desea obtener (contenido de Níquel de laboratorio). La comparación genera un error que se propaga hacia atrás a las capas intermedias. Según el valor del error se reajustan los pesos y los umbrales de activación de las neuronas de cada una de las capas.

Este proceso se repite para cada patrón de entrada hasta que el entrenamiento de la red está terminado o el error global es el indicado. Existen diferentes algoritmos de entrenamiento Levenberg-Marquardt, Gradiente Descendente, Gradiente Conjugado, Secante de un paso y otros, todos los algoritmos presentan diferentes posibilidades de acuerdo al tiempo que emplea en la ejecución y otras propiedades.

2. METODOLOGÍA

En la base de datos se tienen los valores de los métodos radioactivos: Gamma - Gamma medidos con longitudes corta y larga, el neutrón - gamma, el neutrón - neutrón, el gamma natural en unidades de conteos por segundo, la clasificación litológica, determinada mediante los datos de composición y otros realizado en el laboratorio, y los contenidos de Níquel en porcentos de 181 muestras de diferentes pozos del sector.

Se empleó para la confección, entrenamiento y simulación de las redes al Programa MATLAB y las herramientas sobre redes neuronales que posee. Se usan dos redes en lo fundamental, la primera para realizar la clasificación de las formaciones que componen a las cortezas lateríticas y la segunda para determinar en cada una de ellas los contenidos de Níquel, ambas mediante los datos de los métodos radioactivos de pozos.

La evaluación se efectúa mediante la comparación de los resultados de ambas redes con los datos aportados por el laboratorio de cada una de las muestras. En el caso de la clasificación de las formaciones se evalúa según los niveles de acierto para cada muestra entre la clasificación dada por la red y la aportada por geología y en el segundo caso mediante la correspondencia entre los contenidos de Níquel determinados por la red y los medidos en el laboratorio.

Con la red para la clasificación se determinan tres valores asociados a cada una de las formaciones clasificadas por geología, la red calcula los valores según los datos de los métodos geofísicos de pozo y la pertenencia de cada muestra a los grupos definidos se realiza mediante el criterio de selección de distancia media. Un criterio de efectividad de la red en la clasificación es la de la correlación simple entre los valores asignados a cada población y el calculado por la red. Los coeficientes de la ecuación de correlación y el coeficiente de regresión son parámetros de evaluación de la efectividad de la red al igual que el porciento de acierto.

Se emplearon cuatro redes, una para la clasificación y tres para la estimación de los contenidos de Níquel en cada formación clasificada. La arquitectura de todas las redes empleadas tiene la siguiente característica, son redes de tres capas con 3, 10 y 1 neurona respectivamente. Se estudio una red con un mayor número de neuronas en la capa intermedia, aunque mejoraron los resultados esta no es significativa y el tiempo de ejecución es algo mayor.

Las funciones de transferencia son tansig para la primera capa y la capa oculta y purelin para la última capa. El algoritmo de entrenamiento usado fue el Levenberg-Marquardt, el número de iteraciones se fijo entre 300 y 500 y el error global de optimización de 0.001. Estos parámetros fueron determinados mediante corridas experimentales y la información aportada por la bibliografía consultada.

El orden de la investigación siguió los siguientes pasos

1. Determinación de la red y sus características para la clasificación mediante los datos de los métodos geofísicos de pozos de todas las muestras empleando como supervisor la clasificación dada por geología.
2. Determinación de la red para evaluar los contenidos de Níquel de cada una de las poblaciones definidas por geología, empleando como supervisor las mediciones de laboratorio.

2. Determinación de la red para evaluar los contenidos de Níquel de cada una de las poblaciones definidas por la clasificación realizada por la red, empleando como supervisor las mediciones de laboratorio.
3. Comparación de los resultados.

3. RESULTADOS

La clasificación de las poblaciones litológicas mediante los datos de los métodos geofísicos de pozo, muestra una relación entre el valor calculado (A) para cada población por la red y el propuesto (T) de $A = 0.821T + 0.433$ con un coeficiente de correlación de $R = 0.906$, con un índice de acierto (por ciento de la muestra total clasificado correctamente) de 0.86, es decir, se tienen 25 muestras mal clasificadas del total de 181. El resultado final de la clasificación se muestra en la tabla 1, donde se dan el número total de muestras clasificadas por geología y por la red en cada grupo.

Se consideran una de las partes más importantes del artículo, no llevan numeración y cada conclusión forma un párrafo aparte. El título CONCLUSIÓN en la sección es obligatorio. El número de la sección corresponde al consecutivo que se lleve en el contenido del cuerpo del artículo

Grupos	Geología	Red
1	34	32
2	39	32
3	108	117

Tabla 1. Número de muestras de cada grupo clasificado.

Estimación de los contenidos de Níquel.

La estimación del contenido de Níquel se realizó mediante siete redes las que fueron empleadas para:

1. Estimar el contenido de Níquel del conjunto total de muestras.
 2. Estimar el contenido de Níquel de cada una de los grupos clasificado por geología.
- Estimar el contenido de Níquel de cada uno de los grupos clasificados por la red.

En la tabla 2 se muestra las ecuaciones de correlación simple entre los contenidos de Níquel calculado por la red (A) y los medidos en el laboratorio (T) para cada grupo clasificado por geología, y en la Tabla 3 se presenta el análisis de los valores, máximo y mínimo y la desviación estándar de los errores individuales para las poblaciones clasificadas.

Tabla 2. Relación entre el contenido de Níquel Calculado por la red (A) y el medido en el laboratorio (T).

Gru pos	Ecuación $A = c * T + b$	Muestras Numero	R
1	$A = 0.972 T + 0.017$	34	0.988
2	$A = 0.979 T + 0.0208$	39	0.991
3	$A = 0.776 T + 0.302$	108	0.881
total	$A = 0.8497 T + 0.172$	181	0.92

Grupos	Error Máximo	Error Mínimo	σ Error
1	0.0813	-0.0881	0.01312
2	0.0788	-0.1007	0.0317
3	0.4567	-0.788	0.1332
Total	0.457	-0.44	0.1416

Tabla 3. Análisis de los errores de cada grupo y del total de muestras.

En las Figuras 1, 3 y 5 se muestran los gráficos de las relaciones de correlación simple entre los valores estimados de los contenidos de Níquel determinado por la red (A) y los medidos en el laboratorio para cada uno de los grupos y en las figuras 2, 4 y 6 se presentan los grafico de los contenidos de Níquel calculados por la red y medidos en el laboratorio de cada grupo respectivamente y para cada una de las muestras o puntos en el pozo medido.

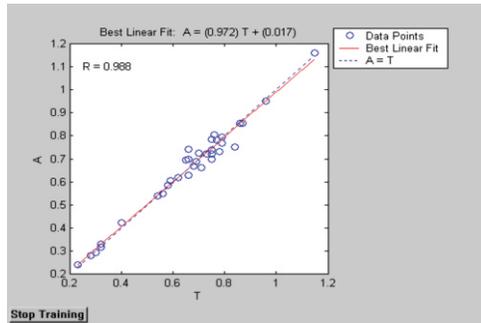


Figura 1. Relación entre el contenido de Níquel Calculado por la red (A) y el medido en el laboratorio (T).

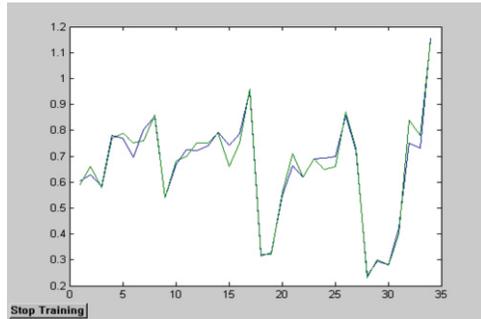


Figura 2. Valores del contenido de Níquel calculado por la red (Azul) y el medido en el pozo (verde) para cada muestra en el pozo para el grupo clasificado como 1 por geología.

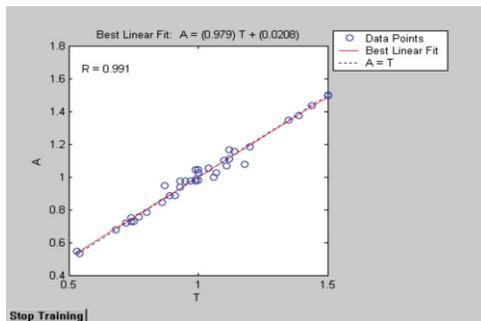


Figura 3. Relación entre el contenido de Níquel Calculado por la red (A) y el medido en el laboratorio (T) para el grupo clasificado como 2 por geología.

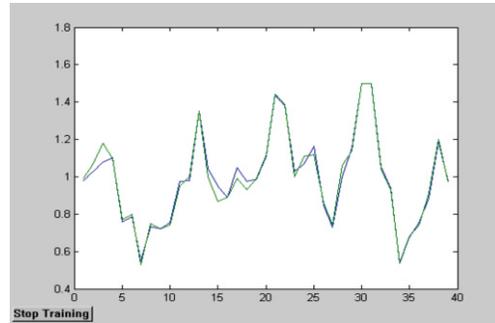


Figura 4. Valores del contenido de Níquel calculado por la red (Azul) y el medido en el pozo (verde) para cada muestra en el pozo para el grupo clasificado como 2 por geología.

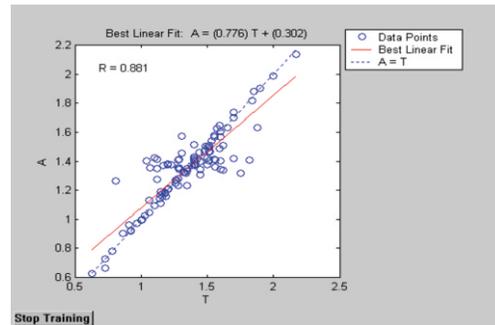


Figura 5. Relación entre el contenido de Níquel Calculado por la red (A) y el medido en el laboratorio (T) para el grupo clasificado como 3 por geología.

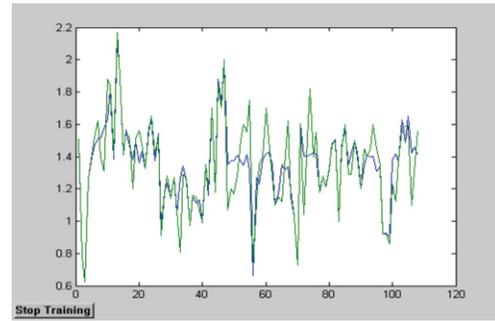


Figura 6. Valores del contenido de Níquel calculado por la red (Azul) y el medido en el pozo (verde) para cada muestra en el pozo para el grupo clasificado como 3 por geología.

En la tabla 4 se muestran las ecuaciones de correlación simple entre los contenidos de Níquel calculado por la red (A) y los medidos en el laboratorio (T), y en la Tabla 5 se presenta el análisis de los valores, máximo y mínimo y la desviación estándar de los errores para cada conjunto de métodos y para cada uno de los métodos individuales para las poblaciones clasificadas por la red.

Grupos	Ecuación $A = c * T + b$	Muestras Numero	R
1	$A = 0.959 T + 0.0241$	32	0.981
2	$A = 0.967 T + 0.0269$	32	0.992
3	$A = 0.843 T + 0.21$	117	0.918

Tabla 4. Relación entre el contenido de Níquel Calculado por la red (A) y el medido en el laboratorio (T).

Grupos	Error Máximo	Error Mínimo	σ Error
1	0.0879	-0.0826	0.0315
2	0.0906	-0.0643	0.0274
3	0.4609	-0.4502	0.1134

Tabla 5. Análisis de los errores de cada grupo de muestras.

En las Figuras 7, 9 y 11 se muestran los gráficos de las relaciones de correlación simple entre los valores estimados de los contenidos de Níquel determinado por la red (A) y los medidos en el laboratorio (T) para cada uno de los grupos y en las figuras 8, 10 y 12 se presentan los grafico de los contenidos de Níquel calculados por la red y medidos en el laboratorio de cada grupo respectivamente y para cada una de las muestras o puntos en el pozo medido.

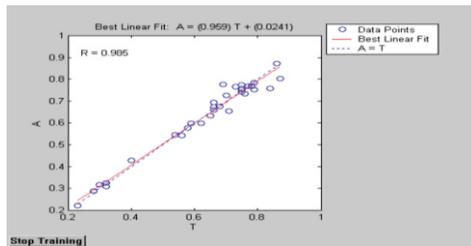


Figura 7. Relación entre el contenido de Níquel Calculado por la red (A) y el medido en el laboratorio (T) para el grupo clasificado como 1 por la red.

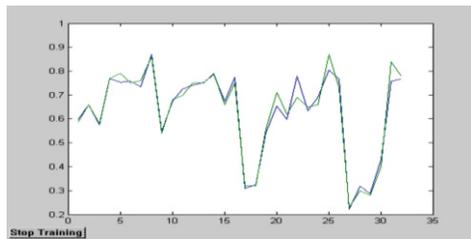


Figura 8. Valores del contenido de Níquel calculado por la red (Azul) y el medido en el pozo (verde) para cada muestra en el pozo para el grupo clasificado como 1 por la red.

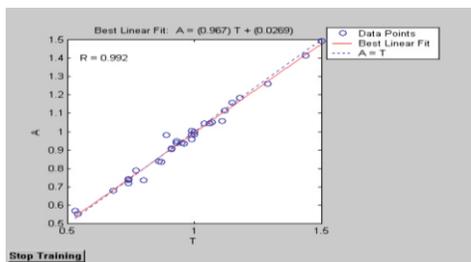


Figura 9. Relación entre el contenido de Níquel Calculado por la red (A) y el medido en el laboratorio (T) para el grupo clasificado como 2 por la red.

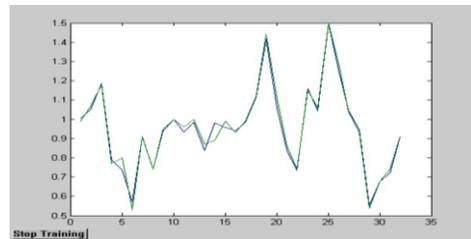


Figura 10. Valores del contenido de Níquel calculado por la red (Azul) y el medido en el pozo (verde) para cada muestra en el pozo para el grupo clasificado como 2 por la red.

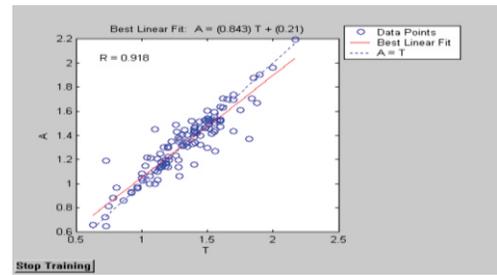


Figura 11. Relación entre el contenido de Níquel Calculado por la red (A) y el medido en el laboratorio (T) para el grupo clasificado como 3 por la red.

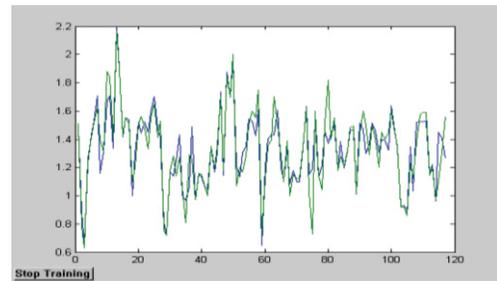


Figura 12. Valores del contenido de Níquel calculado por la red (Azul) y el medido en el pozo (verde) para cada muestra en el pozo para el grupo clasificado como 3 por la red.

El análisis de los resultados demuestra que no existe gran diferencia entre los resultados de la clasificación litológica dada por el análisis de laboratorio con el proporcionado por la red neuronal de los datos radioactivos de pozos, de acuerdo con el índice de acierto, lo que posibilita el empleo de la red para la clasificación litológica de muestras en otros pozos.

En todos los casos el empleo de las redes neuronales, permite desde el punto de vista cuantitativo efectuar el cálculo de los contenidos de Níquel en las menas lateríticas de los datos radioactivos de pozos, los datos de las tablas 2, 3, 4 y 5 lo demuestran.

Los coeficientes de correlación entre los contenidos de Níquel calculado por la red y medido en el laboratorio son en todos los casos superiores a 0.88. Se destaca el valor menor de este coeficiente para el tercer grupo de las poblaciones clasificadas por geología.

Por otra parte, los coeficientes de correlación entre los contenidos de Níquel calculado y medido para las poblaciones clasificadas por la red son mejores que los clasificados por geología, aunque la diferencia no es grande y solamente está asociada al tercer grupo.

Del análisis de los gráficos de la comparación entre los contenidos de Níquel calculados por las redes empleadas (curva azul) y medido en el laboratorio (curva verde), se aprecia que el intervalo de variación de los valores de los contenidos de Níquel son menores para los calculados por la red que para los medidos en el laboratorio lo que demuestra que los resultados obtenidos por la red (que provienen de mediciones de pozos, y que por consiguiente, estas mediciones tienen la influencia de un espacio mayor), toman por ello, valores promedios mientras que las de laboratorio como son realizadas a muestras puntuales en el pozo, pueden tomar valores más variados.

4. CONCLUSIONES

1. En el trabajo se demuestra que es posible emplear las redes neuronales para la clasificación de los ocrees en las cortezas lateríticas de acuerdo a los datos de los métodos radioactivos de pozo con buenos resultados.
2. El empleo de las redes neuronales para el cálculo del contenido de Níquel de poblaciones ya clasificadas proporciona mejores resultados que el obtenido para toda la muestra sin clasificar.
3. El cálculo del contenido de Níquel obtenido en las muestras clasificadas por la red son más exactos que los obtenidos en las poblaciones clasificadas por geología.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar sus agradecimientos al Comité Organizador del 1er. Seminario Internacional de Geofísica Aplicada, por brindarnos un espacio para exponer nuestros resultados investigativos.

6. REFERENCIAS

Guerra M., Ruiz J., Ebecken N., Landau L., Silva J.. REDES NEURONALES PARA LA CLASIFICACIÓN DE OCRE LATERÍTICO.

Empresa Geominera Oriente, Santiago de Cuba. Departamento de Geociencias de ISPJAE, Cuba. COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, 2012.

Carson, H.H. (1962). A seismic survey at Harpers Ferry. *Archaeonze*"5, 119- 122.

Clark, A.J. (1986). Review of archaeological geophysics in Britain. *Geoph. vsics* 51, (in press).

Chang J. L; y otros. (2004). Aplicación de técnicas geofísicas en la evaluación de riesgos geológicos en la comunidad. *Resúmenes de la VII Jornada Científica de la SCG, Filial del Centro. Santa Clara.*

Dolphin, L.T. (1981). Geophysical methods for archaeological surveys in Israel: Stanford Research Intemational, Menlo Park, Calif., December 1981.

Fajklewicz, A., Glinski, A., and Sliz, J. (1982). Some applications of the underground tower gravity vertical gradient- *Geophysics* 47, 1688-1692.

Foster, E.J. (1968). Further developments of the pulsed induction metal detector. *Prospezioni Archeologiche* 3, 95-99.

Frohlich, B., and Lancaster, W.J. (1986). Electromagnetic surveying in current middle eastern archaeology-Application and evaluation. *Geophysics* 51, (in press).