

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

COMPARACIÓN DE TÉCNICAS PARA LA ESTIMACIÓN DE VELOCIDAD DE ONDAS DE CORTE EN YACIMIENTOS SILICICLÁSTICOS Y CARBONÁTICOS DE VENEZUELA

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por la Br Barbosa Z., Marian K
Para optar al Título
de Ingeniera Geofísica

Caracas, 2017

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**COMPARACIÓN DE TÉCNICAS PARA LA ESTIMACIÓN DE
VELOCIDAD DE ONDAS DE CORTE EN YACIMIENTOS
SILICICLÁSTICOS Y CARBONÁTICOS DE VENEZUELA**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Ronny Meza

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por la Br Barbosa Z., Marian K
Para optar al Título
de Ingeniera Geofísica

Caracas, 2017

Caracas, marzo, 2017

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Geología, Minas y Geofísica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por la Br MARIAN KATHERINE BARBOSA ZAVARCE, titulado:

**“COMPARACIÓN DE TÉCNICAS PARA LA ESTIMACIÓN DE
VELOCIDAD DE ONDAS DE CORTE EN YACIMIENTOS
SILICICLÁSTICOS Y CARBONÁTICOS DE VENEZUELA”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero geofísico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por la autora, lo declaran APROBADO.

Prof. José Cavada
Jurado

Prof. Vincenzo De Lisa
Jurado

Prof. Ronny Meza
Tutor Académico

DEDICATORIA

A Dios todopoderoso

A mis padres

Y a mi hermano

Por ser mi razón de ser...

Lo logramos!

AGRADECIMIENTOS

A Dios porque ha estado presente siempre mostrándome su misericordia en cada una de mis peticiones, guiándome y llenándome de bendiciones día a día.

A mis padres Mary y Juan, que son y serán por la eternidad mi pilar fundamental; mi madre que es la mujer a la que más admiro en el mundo y me enseñó siempre apuntar a la perfección en cada una de las cosas que me propongo y mi padre por apoyarme incondicionalmente en cada una de mis decisiones y siempre estar presente con su manera característica de demostrarme su cariño.

A mi hermano que es mi cómplice y que junto con mis padres es mi vida.

A mi tía María que es mi segunda madre y la tía más especial que puede existir.

A mi abuelos María y Celso que siempre estuvieron atentos y al pendiente de mi cada vez que tenía oportunidad de verlos.

A los cuatro seres amados que desde el cielo me cuidan; mis abuelos Petra y José, mi tía Gladys y a mi chiquita que tantas sonrisas causó en mí y mi hogar.

A la Universidad Central de Venezuela y sus profesores por su formación a pesar de las circunstancias que se vivieron durante mi trayectoria en esta prestigiosa casa de estudios.

A mi tutor Ronny Meza por su entera disposición, excelencia, paciencia y por compartir incondicionalmente sus conocimientos en este camino.

A PDVSA-INTEVEP por ser el primer contacto con el campo laboral y su colaboración en la presente investigación.

A Elizabeth Faria por la amistad de años que ni la distancia podrá debilitar y a Brian Damiano por las incansables pláticas, consejos, regaños y secretos que compartimos desde el inicio de la carrera.

A Jhon Alzate, Jonathan Carreño y Marvin Baptista por estar siempre disponibles para escuchar, aconsejar o simplemente compartir momentos únicos y agradables.

A Yolimar Rojas, Luis Díaz y Jeiker Balaguera por su amistad, calidez, las innumerables conferencias de estudio online y por todos los momentos vividos.

A Braz Pereira por ser la luz cuando todo se volvía oscuro y siempre estar de una u otra forma dándome ánimo y esperanzas.

Barbosa Z. Marian K.

COMPARACIÓN DE TÉCNICAS PARA LA ESTIMACIÓN DE VELOCIDAD DE ONDAS DE CORTE EN YACIMIENTOS SILICICLÁSTICOS Y CARBONÁTICOS DE VENEZUELA

Tutor Académico: Prof. Ronny Meza. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Departamento de Geofísica.

Año 2017, n° pág. (178).

Palabras Claves: registros de pozos, onda acústica – cizalla, ecuaciones empíricas, redes neuronales, algoritmo genético.

Resumen: La adquisición completa del grupo de registros de pozos es fundamental para la interpretación petrofísica de un yacimiento. Entre ellos, los registros acústicos que además de ser utilizados en el campo petrofísico aportan información para la caracterización sísmica y análisis geomecánico. Dichos estudios están limitados al no disponer de los parámetros elásticos de las rocas porque las empresas no solicitan el procesamiento de los registros sísmicos de cizalla. El presente trabajo se centró en el estudio de distintos métodos para la obtención de los registros sísmicos dipolares a partir de las ecuaciones Greenberg-Castagna, Brocher, Castagna y Carrol. También se estudió la viabilidad de la obtención de los resultados recurriendo a métodos de inteligencia artificial empleándose redes neuronales y algoritmo genético. Los datos para el estudio contenían ocho pozos de un campo de la Faja Petrolífera del Orinoco y dos pozos del Golfo de Venezuela. Estos campos poseen características litológicas distintas por lo que se evaluó la capacidad de predicción de estas técnicas en diferentes ambientes sedimentarios. Se procedió estructurando un código en el lenguaje interpretado *Matlab* para evaluar la capacidad de predicción de registro DTS con las ecuaciones de empíricas mencionadas, donde la ecuación Greenberg Castagna generó el mejor modelo con valores de error cuadrático medio entre 75,74 y 194,24. Acto seguido se entrenó una red neuronal y los valores de error cuadrático medio estuvieron entre 64,90 y 155,30; por último se reestructuró un código para la generación de dicho registro mediante algoritmo genético y el rango de los errores estuvieron entre 21,03-151,42. En conclusión, con base a la aplicación de los diferentes métodos, el método más idóneo para la generación de registros sísmicos de cizalla es redes neuronales artificiales por tener los menores valores de error cuadrático medio en los pozos estudiados, la arquitectura más efectiva es con la utilización de todo el grupo de registros y con 10 neuronas en la capa oculta.

ÍNDICE GENERAL

Contenido	Pág.
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	v
Resumen.....	vi
ÍNDICE GENERAL.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS	x
LISTA DE ABREVIATURAS	xi
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2 Objetivo general	2
1.3 Objetivos específicos	3
1.4 Antecedentes	3
1.5 Ubicación del área de estudio	4
CAPÍTULO II	6
MARCO TEORÍCO.....	6
2.1 Sísmica	6
Ondas compresionales.....	6
Ondas transversales	6
2.1.1 Velocidad de ondas P y S.....	7
2.1.2 Relación entre velocidad de onda P y resistividad.....	9
2.1.3 Relación entre la velocidad de la onda P y la densidad	10
2.2 Petrofísica.....	10
2.2.1 Registros de pozos	11
2.3 Ecuaciones empíricas	22
2.3.1 Castagna	22
2.3.2 Greenberg-Castagna.....	23
2.3.3 Brocher	23
2.3.4 Carrol	23
2.4 Métodos de inteligencia artificial.....	24
2.4.1 Redes neuronales artificiales.....	24
2.4.2 Algoritmo genético.....	30

CAPÍTULO III	39
GEOLOGÍA REGIONAL	39
3.1 Faja Petrolífera del Orinoco	39
3.2 Golfo de Venezuela	41
CAPÍTULO IV	43
MARCO METODOLÓGICO	43
4.1 Tratamiento estadístico de los datos	44
4.1.1 Pruebas de normalidad	44
4.1.2 Diagrama de caja y bigotes	45
4.1.3 Análisis de correlación de datos	46
4.2 Evaluación de métodos de ajuste	47
4.2.1 Métodos empíricos	47
4.2.2 Métodos de inteligencia artificial	49
4.3 Análisis estadístico de los distintos métodos	59
4.3.1 Análisis de errores	59
4.3.2 Evaluación de calidad vs costos	59
CAPÍTULO V	60
RESULTADOS Y ANÁLISIS	60
5.1 Métodos Empíricos	60
5.2 Inteligencia artificial	62
5.2.1 Redes neuronales	62
5.2.2 Algoritmo genético	66
5.2.3 Comparación de todos los métodos de estimación	67
5.2.4 Resultados aplicados a la geofísica	70
CAPÍTULO VI	72
CONCLUSIONES	72
Recomendaciones	75
BIBLIOGRAFÍA	76
Apéndice A	78
Apéndice B	¡Error! Marcador no definido.

ÍNDICE DE FIGURAS

Contenido	Pág.
Figura N° 1 Ubicación de la Faja petrolífera de Venezuela.....	4
Figura N° 2 Ubicación del Golfo de Venezuela.....	5
Figura N° 3 Una roca puede ser deformada por compresión (a), tensión (b) y cizalladura (c).....	7
Figura N° 4 Diagrama esquemático de la toma de registros	11
Figura N° 5 Herramientas sónicas	19
Figura N° 6 Efecto de caverna en un pozo	20
Figura N° 7 Respuesta de funciones de transferencia de redes neuronales.....	29
Figura N° 8 Cruce 1 punto para codificación binaria (a) y por valor directo (b)	33
Figura N° 9 Cruce 2 puntos para codificación binaria (a) y por valor directo (b)	34
Figura N° 10 Flujo de trabajo para el desarrollo de la investigación	43
Figura N° 11 Test de normalidad del registro NPHI pozo BZ-25.....	45
Figura N° 12 Diagrama de caja y bigotes del registro NPHI pozo BZ-25	46
Figura N° 13 Matriz de correlación pozo BZ-25	47
Figura N° 14 Flujo de trabajo para el empleo de redes neuronales.....	50
Figura N° 15 Configuración de red neuronal	51
Figura N° 16 Funciones del código reestructurado para algoritmo genético	55
Figura N° 17 Minimización de la función costo vs número de iteraciones definida por los parámetros a y b.....	58
Figura N° 18 Sónico de onda P vs sónico de onda S con recta	58
Figura N° 19 Registros DTS y registros sintéticos generados con métodos empíricos, de izquierda a derecha relaciones de GC, B, CR y C del pozo BZ-25.....	61
Figura N° 20 Registros DTS y registros sintéticos generados por redes neuronales con una y dos neuronas por output	64
Figura N° 21 Registros con 1, 10 y 100 neuronas en la capa oculta pozo BZ-25.....	65
Figura N° 22 Comparación de los distintos sintéticos elaborados pozo BZ-25.....	68
Figura N° 23 Comparación de velocidad de onda S con el registro original y el sintético pozo BZ-25	71

ÍNDICE DE TABLAS

Contenido	Pág.
Tabla 1 Comparación cuantitativa de la primera prueba de redes neuronales	63
Tabla 2 Comparación cuantitativa de la segunda prueba de redes neuronales	64
Tabla 3 Comparación cuantitativa de la tercera prueba de redes neuronales	65
Tabla 4 Coeficientes a y b para cada pozo de siliciclásticos generados por algoritmo genético	67
Tabla 5 Coeficientes a y b para cada pozo de siliciclásticos generados por algoritmo genético	67
Tabla 6 Error cuadrático medio de los registros sintéticos de pozos de siliciclásticos	68
Tabla 7 Error cuadrático medio de los registros sintéticos de pozos de carbonatos ...	69

LISTA DE ABREVIATURAS

Para facilitar la comprensión de las figuras y tablas se presenta la siguiente lista de abreviaturas:

Abreviatura	Significado
AG	Algoritmo genético
B	Relación de Brocher
C	Relación de Castagna
CR	Relación de Carrol
DT	Registro sónico compresional
DTS	Registro sónico de cizalla
ECM	Error cuadrático medio
ECMF	Error cuadrático medio final
GC	Relación Greenberg-Castagna
GR	Registro de rayos gamma
It	Numero de iteraciones
NPHI	Registro neutrón
R	Coeficiente de correlación de Pearson
RD	Registro resistividad profunda
RM	Registro resistividad media
RN	Redes Neuronales
RS	Registro resistividad somera
Rtr	Reentrenamiento de red neuronal
SP	Registro de potencial espontáneo
TC	Tiempo de cómputo
Vp	Velocidad de onda P
Vs	Velocidad de onda S

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

Hace más de medio siglo se introdujo el registro eléctrico de pozos en la industria petrolera; desde entonces se han desarrollado y utilizado con mayor frecuencia y se han perfeccionado las herramientas de medición. Conrad Schlumberger en 1927 llevó a cabo los primeros experimentos en la etapa de prospección; se fundamentó en enviar una corriente eléctrica introduciéndola al subsuelo entre dos varillas metálicas dibujando sobre un plano las líneas de potencial constante observadas en la superficie y obteniendo con su interpretación la naturaleza y configuración geométrica de los distintos cuerpos atravesados por el campo eléctrico.

Con el transcurrir de los años se fueron implementando herramientas para desarrollar distintos registros y alrededor de 1949 se comenzaron a medir las propiedades acústicas de las rocas, cuantificando el tiempo de tránsito de éstas y relacionándolo con su porosidad.

Los registros acústicos en la actualidad forman parte indispensable en la perforación de pozo y en la caracterización sísmica de un yacimiento debido a que con ellos se maneja la distribución de las velocidades de las ondas en el subsuelo. En este sentido, conocer la velocidad de la onda de cizalla representa un considerable aporte debido a que con su implementación se puede identificar distintos parámetros, siendo algunos de ellos los contrastes litológicos, determinación de fluidos contenidos en los estratos, valores de impedancia, porosidad y densidad obtenidos de inversiones sísmicas y valiosa información acerca del estado de la presión de poro del yacimiento.

Sin embargo, a pesar de su importancia la onda de cizalla no es procesada por los costos elevados que representa para la industria petrolera; en algunas circunstancias, sólo esta información es procesada en escasos pozos del área de interés y los mismos

son seleccionados por los intérpretes basados en su experiencia o criterios económicos.

Según Eskandary et al (2003), la estimación de la velocidad de onda de corte (V_s), utilizando datos de registros es un enfoque importante para la exploración sísmica; basado en esto y en lo antes expuesto, surge la necesidad de estimar los registros sísmicos de cizalla a partir de ecuaciones empíricas o de relaciones entre otras propiedades, aspecto central en la presente investigación, tomando como base, técnicas previas utilizadas fuera del país y adaptándolas a campos siliciclásticos y carbonáticos de Venezuela.

Trabajos previos han desarrollado distintos métodos para la estimación de dichas mediciones aplicándolos a plataformas de clastos y carbonatos en países como Irán (Eskandari, Rezaee, Javaheriam, y Mohammadnia, 2003), Nigeria (Horsfall, Omubo-Pepple y Tamunobereton-ari, 2014) y el Mar de Noruega (Ringo, 2012) con resultados satisfactorios y con coeficientes de correlación elevados, por lo que esta investigación tiene como propósito la recopilación de los métodos empleados, la adaptación a campos venezolanos y dictaminar cuál de los utilizados es el más factible y con mayor precisión de los valores obtenidos en cada plataforma estudiada.

Se llevará a cabo dicho propósito con pruebas de los métodos propuestos por diversos autores, con el fin de estimar los coeficientes correspondientes para ajustes de dos variables o multivariantes mediante la aplicación de algoritmos lineales y no lineales, generando entonces registros de comportamiento de la onda de cizalla en el subsuelo y comparándolos con los registros genuinos de los pozos.

En síntesis, este trabajo de investigación tendrá una contribución significativa en el campo de la caracterización sísmica de yacimientos y en el campo de la física de rocas aplicada a yacimientos petrolíferos de Venezuela.

1.2 Objetivo general

- Contrastar métodos de estimación de registros de velocidad de onda de corte en campos siliciclásticos y carbonáticos.

1.3 Objetivos específicos

- Implementar métodos de optimización de técnicas lineales y no lineales empleando un lenguaje de programación.
- Adaptar los métodos implementados a plataformas de clastos y carbonatos de campos venezolanos.
- Analizar estadísticamente la eficiencia de cada uno de los métodos adaptados.
- Establecer el método con mayor factibilidad para la generación de registros sísmicos de cizalla para cada caso en estudio.

1.4 Antecedentes

La interpretación de los datos sísmicos multicomponentes requiere de un estudio integrado. Ante la ausencia del registro de ondas de corte en algunos pozos, varios autores han generado registros de velocidad de onda S mediante el uso de distintos métodos en diferentes partes del mundo en campos siliciclásticos y carbonáticos.

Entre las técnicas empíricas resaltan los trabajos de Ringo (2012) en un campo de siliciclásticos en el Mar de Noruega, Hampson y Russell (s.f.) con datos de pozos de una región de Alberta, Banerjee junto con Bakshi (2013) en el campo Padra en India, Eskandary, Rezaee, Javaherian y Mohammadnia (2003) en un yacimiento de carbonatos en Iran y Royle y Bezdan (s.f.), todos los autores mencionados llevaron a cabo principalmente las técnicas de Castagna, Brocher, Greenberg-Castagna, regresión simple y multivariable, obteniendo como resultado que el mejor ajuste de los registros sísmicos de cizalla sintéticos con los originales grabados en pozos se obtiene con la relación de Castagna y regresión multivariable con coeficiente de correlación mayor a 0,90.

Por otro lado, en diversos trabajos además de utilizar métodos empíricos también emplearon regresiones basadas en algoritmos artificiales. Dichos trabajos finalizan expresando que las correlaciones empíricas no son lo suficientemente buenas para

extraer un registro de velocidad de onda de corte fiable, por lo que los algoritmos de inteligencia artificial se establecieron como la mejor técnica para generar este registro acústico, algunas de esas investigaciones fueron las realizadas por Khashayar Tabari, Orod Tabari y Mahsa Tabari (Tabari et al, 2011) en rocas carbonáticas y Maleki, Moradzadeh, Riabi, Gholami y Sadeghzadeh (Maleki et al, 2014) en un campo de petróleo ubicado en la provincia de Iraní de Juzestán.

1.5 Ubicación del área de estudio

En el presente trabajo de investigación se trabajará con datos de registros de pozos pertenecientes a la Faja Petrolífera del Orinoco y al Golfo de Venezuela, la ubicación específica de los campos por razones de confidencialidad no puede ser revelada. Aun así, en las figuras N° 1 y 2 se puede visualizar la ubicación general de las zonas.



Figura N° 1 Ubicación de la Faja petrolífera de Venezuela (Curlis, y otros, 2002)



Figura N° 2 Ubicación del Golfo de Venezuela

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se contemplarán conceptos básicos de sísmica e información pertinente a petrofísica, registros de pozos y generación de registros acústicos a partir de métodos empíricos y de inteligencia artificial.

2.1 Sísmica

Los métodos sísmicos de exploración geofísica se basan en que las ondas elásticas viajan con diferentes velocidades en distintos medios. El principio es iniciar tales ondas en un punto, y determinar en un cierto número de puntos el tiempo de llegada de la energía que ha sido reflejada o refractada por las discontinuidades en las diferentes formaciones rocosas (Parasnis, 1970).

Estas ondas elásticas viajan en el interior de la tierra y en la superficie, clasificándose como corpóreas y superficiales respectivamente. Debido al objetivo de este trabajo se hará énfasis en las ondas de cuerpo.

Ondas compresionales

En las ondas compresionales o también conocidas como ondas P, el movimiento del medio se produce en la misma dirección en que se propaga la onda, son en otras palabras ondas sonoras ordinarias (Parasnis, 1970).

Ondas transversales

En estas ondas, también llamadas ondas de cizalla y ondas S, las partículas del medio se mueven en ángulo recto con la dirección en la que la onda se propaga (Parasnis, 1970).

2.1.1 Velocidad de ondas P y S

Como se definieron anteriormente, estas ondas son de interés fundamental cuando se analizan los datos sísmicos. La ecuación para ambas puede ser escrita de la siguiente forma:

$$V = \left[\frac{M}{\rho} \right]^{1/2} \quad \text{Ecuación 1}$$

Dónde: M = módulos elásticos y ρ = densidad.

Para comprender los conceptos de módulos elásticos primero se definirán esfuerzo y deformación. El esfuerzo es la fuerza por unidad de área requerida para producir una deformación y puede escribirse de esta manera:

$$p = F/A \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde p : deformación, F = fuerza y A = área.

La deformación es la resultante del esfuerzo, no es dimensional porque simplemente describe la deformación proporcional del material. La figura N° 3 muestra las tres formas en las que una roca puede ser deformada: empujando desde arriba (compresión), tirando desde arriba (tensión), o empujando desde el lado (cizalla) (Hampson y Russell, 2014).

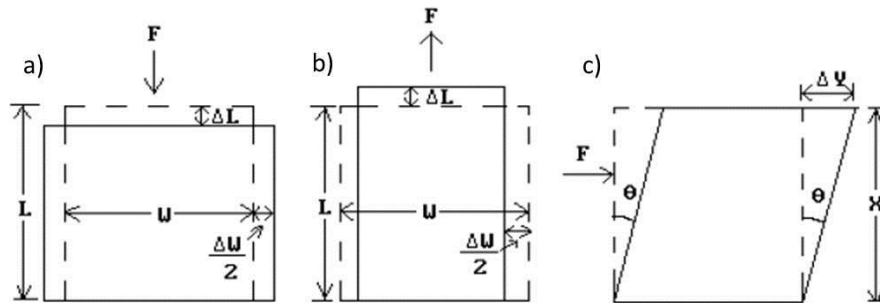


Figura N° 3 Una roca puede ser deformada por compresión (a), tensión (b) y cizalladura (c) (Hampson y Russell, 2014)

La compresión y tensión están relacionados puesto que uno resulta en un cambio que es simplemente el negativo del otro, en ambos cambia el volumen de la roca pero no su forma (Hampson y Russell, 2014). En el caso de la deformación de cizalla, cambia la forma de la roca pero no su volumen. Estos tipos de deformaciones son:

$$\text{Longitudinal:} \quad e_L = \Delta L / L \quad \text{Ecuación 3}$$

$$\text{Transversal:} \quad e_W = \Delta W / W \quad \text{Ecuación 4}$$

$$\text{De cizalla:} \quad e_s = \Delta Y / X = \text{tang}\theta \quad \text{Ecuación 5}$$

Con lo concerniente a los módulos elásticos, para una deformación puramente longitudinal el módulo es llamado módulo de Young y es la relación esfuerzo/deformación que puede escribirse como:

$$p_L = E \frac{\Delta L}{L} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde E= módulo de Young

Para una deformación de cizalla, el módulo es llamado módulo de cizalla o de rigidez, y puede ser escrito:

$$p_s = \mu e_s \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde p_s = esfuerzo de cizalla, μ = módulo de cizalla y e_s = deformación de cizalla.

Para una deformación volumétrica la constante es llamada módulo de volumen, o de compresibilidad:

$$p_H = K \frac{\Delta V}{V} \quad \text{Ecuación 8}$$

Dónde: p_H = esfuerzo hidrostático, $\frac{\Delta V}{V}$ = deformación volumétrica o dilatación y K = módulo de volumen.

Sin tener que acudir a una derivación matemática la velocidad de la onda P puede ser escrita como:

$$\alpha = \left[\frac{K+4/3\mu}{\rho} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde ρ = velocidad de onda P

Para la velocidad de la onda S la ecuación es

$$\beta = (\mu/\rho)^{1/2} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde β = velocidad de onda S

Un importante parámetro en sismica para la determinación litológica es el ratio de la velocidad de las ondas P y S. Se deriva de la ecuación anterior que:

$$\gamma = (\alpha/\beta)^2 = K/\mu + 4/3 \quad \text{Ecuación 11}$$

Otro parámetro importante es el ratio de Poisson, dado en términos de ratio alfa y beta:

$$\sigma = \frac{\gamma-2}{2(\gamma-1)} \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde σ = ratio de Poisson

$$\gamma=(\alpha/\beta)^2 \quad \text{Ecuación 13}$$

2.1.2 Relación entre velocidad de onda P y resistividad

En muchos campos antiguos, los únicos registros disponibles son los registros de resistividad, en rocas hidratadas, el registro de resistividad y el registro acústico de onda P tienden a seguirse entre sí, es por ello que se han derivado una serie de relaciones empíricas que permiten al geofísico derivar un registro acústico de onda P a partir de registros de resistividad (Hampson y Russell, 2014). La relación más antigua fue formulada por Faust:

$$\alpha = a(Rd)^c$$

Ecuación 14

Donde α = velocidad de onda P, a, c = constantes, R = valor de resistividad y d = profundidad.

2.1.3 Relación entre la velocidad de la onda P y la densidad

Otro de los parámetros físicos que guarda relación con la velocidad de la onda P es la densidad, de hecho, la densidad y la velocidad en un yacimiento pueden ser afectadas por el número de minerales, sus porcentajes y la forma de los granos, por la porosidad de la roca y por el tipo de fluidos que rellena el espacio poral. En el programa de AVO existen dos caminos para derivar la velocidad de la onda P a partir de la densidad, o en el caso inverso, derivar la densidad partiendo de la velocidad de onda P, pero por no ser este el propósito de esta investigación no se ahondará al respecto (Hampson y Russell, 2014).

2.2 Petrofísica

La petrofísica es definida por Archie (1950) como el término que se refiere a la física de rocas basándose en el estudio multidisciplinario de sus propiedades físicas que están relacionadas a la distribución del espacio poroso y de los fluidos.

Una definición moderna de la petrofísica sería la caracterización integral de las rocas y fluidos del subsuelo para su aprovechamiento económico y científico. Su connotación generalizada se debe a que se ha demostrado que la petrofísica ha dejado de ser de aplicación exclusiva en la industria petrolera, trascendiendo sus fronteras y entrando en los confines de otras ciencias en la tierra, como la geotermia y la tecnofísica (Crain, 1987).

Los estudios petrofísicos se efectúan a partir de registros de pozos también conocidos como *well logs*, así como por información directa del yacimiento suministrada por muestras de núcleos a los cuales se les practican distintos análisis simples o sofisticados para la obtención de propiedades físicas de interés y la

corroboración de los valores de las propiedades obtenidas con el manejo de los registros de pozos.

2.2.1 Registros de pozos

La geología es el estudio de las rocas que forman la corteza terrestre. El campo de la geología que es de mayor importancia para la industria del petróleo es la sedimentología, la cual implica un estudio preciso y detallado de la composición, textura y estructura de las rocas, el color de los constituyentes, y la identificación de posibles restos de organismos animales y vegetales. Esto permite que el geólogo identifique las condiciones biológicas físicas, químicas y las transformaciones que la serie sedimentaria ha experimentado desde la deposición (Serra, 1984).

Serra (1984), plantea que los registros de pozo son una grabación contra profundidad de características físicas en la formación de la roca (figura N° 4). Las mediciones se obtienen a través de una herramienta de adquisición especial para cada tipo de registro. Una vez culminada la etapa de perforación dicha herramienta es colocada en la boca del pozo, baja a través de él y en intervalos fijos de profundidad va transmitiendo mediciones por el cable a una unidad de laboratorio en la superficie o un ordenador.

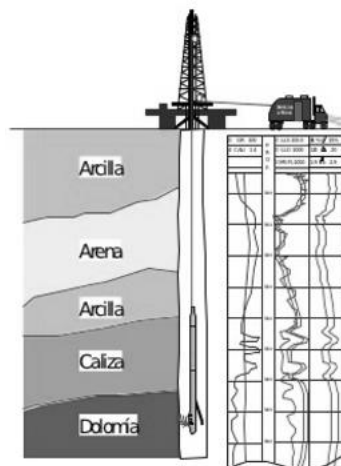


Figura N° 4 Diagrama esquemático de la toma de registros (Ringo, 2012)

Los registros de pozos constituyen, por lo tanto, una firma de la roca; las características físicas que representan son las consecuencias de las condiciones biológicas que prevalecen durante la deposición física, química y la evolución durante el curso de la historia geológica. Con la interpretación de los registros se pueden suponer cambios significativos en cualquiera característica geológica al manifestarse al menos un parámetro físico que pueda ser detectado por uno o más registros (Serra, 1984).

A continuación se definirán los registros con los que se trabajaron en cada pozo, así como su principio, herramienta y principales características, los cuales serán agrupados según su función en registros de hoyo, litológicos, resistivos, de porosidad y acústicos.

2.2.1.1 Registros de diámetro de pozo

Para obtener información relacionada con las condiciones del hoyo, el registro *Bit Size* proporciona las medidas de las mechas utilizadas y el registro Caliper está diseñado para medir el diámetro del hoyo construido (Schlumberger, 1983). Ambos registros se obtienen durante la perforación y con la comparación de su información se pueden obtener las siguientes inferencias:

- a) Mientras mayor sea el diámetro del hoyo en comparación con el diámetro de mecha, menor es la competencia de la roca perforada (hoyo derrumbado). Este efecto puede generar medidas erróneas de los otros registros en las profundidades afectadas.
- b) Si el diámetro del hoyo es similar al diámetro de mecha, indica que la roca es competente (hoyo no derrumbado).
- c) Si el diámetro del hoyo es menor que el diámetro de la mecha, puede indicar que se trata de lutitas expansivas o que se formó un revoque muy grueso.

2.2.1.2 Registro litológico Gamma Ray

Por lo general conjuntamente con los registros de resistividad o porosidad se suele correr el registro Gamma Ray (GR). Este perfil es bastante útil e informativo, siendo algunos de sus usos diferenciar rocas potencialmente productoras permeables y porosas, de arcillas y lutitas no permeables, definir los límites de capas y permitir la correlación de las mismas, proporcionar indicaciones de arcillosidad de la capa y ayudar en la identificación litológica (Schlumberger, 1983).

Los rayos gamma son impulsos de ondas electromagnéticas de alta energía que son emitidas por algunos elementos radioactivos. El isótopo de potasio radioactivo y los elementos radioactivos de las series del uranio y del torio emiten casi toda la radiación gamma que se encuentra en la tierra.

Casi todas las rocas presentan cierta cantidad de radioactividad natural, dichas cantidades son indicadas por el registro Gamma Ray (GR) y dependen de la concentración de potasio, torio y uranio contenida en las formaciones. Existen dos tipos de registros GR, el estándar que mide sólo la radioactividad total y el registro de espectrometría de rayos gamma naturales que además de medir la radioactividad total también registra las concentraciones de los elementos mencionados anteriormente; con el primero será el que se trabajara en esta investigación (Schlumberger, 1983).

La sonda de GR contiene un detector para medir la radiación que se origina en el volumen de la formación cerca de la sonda y la unidad de los registros es grados *API*. En las formaciones sedimentarias el registro normalmente refleja el contenido de arcilla de las formaciones porque los elementos radioactivos tienden a concentrarse en arcillas y lutitas, por lo que las formaciones limpias generalmente tienen un nivel muy bajo de radioactividad.

La función de este registro es la determinación del contenido de arcilla en formaciones arcillosas o lutíticas, se parte del supuesto de que la magnitud de la deflexión de la curva de rayos gamma del registro es proporcional al contenido de

material radioactivo en el intervalo de la formación que se analiza. Otros de sus usos es definir los límites de capas y permitir la correlación de las mismas, así como ayudar en la identificación litológica (Schlumberger, 1983).

2.2.1.3 Registros de resistividad

La resistividad es la medida de resistencia de un material al flujo de una corriente eléctrica, esta fue la propiedad de la roca que primero se estudió en la ciencia del perfilaje y se llevó a cabo en el año 1927 en un pequeño campo petrolero al noreste de Francia, ya para el año 1929 se introdujo en Venezuela, Estados Unidos y Rusia reconociéndose en la industria petrolera la utilidad de la medición de la resistividad para propósitos de correlación, identificación de la saturación de agua y capas potenciales portadoras de hidrocarburo.

Los perfiles de resistividad son perfiles transversales, diagramáticos y teóricos que ilustran las distribuciones horizontales de las zonas que los fluidos invadieron, la zona no invadida y sus correspondientes resistividades relativas. La unidad de este registro es el ohmio por metro ($\Omega.m$) (Schlumberger, 1983).

Hay distintas herramientas que proporcionan medidas de resistividad a distintas profundidades, en el presente trabajo se emplearan curvas de resistividad somera media y profunda.

2.2.1.4 Registros de porosidad

La porosidad de las rocas puede obtenerse a partir del registro de densidad, el registro de neutrones o el registro de sónico, este último será ampliado en la sección de registros acústicos. Todas estas herramientas ven afectada su respuesta por la porosidad, los fluidos y la matriz de la formación.

2.2.1.4.1 Registro neutrón

El registro neutrón (NPHI) responde principalmente a la cantidad de hidrógeno en la formación, por lo tanto, en formaciones limpias cuyos poros estén saturados con agua o aceite, el registro de neutrones refleja la cantidad de porosidad saturada de fluido. Su unidad de medida es el porcentaje (%) y su principio se basa en una fuente radioactiva en la sonda que emite constantemente neutrones de alta energía, estos neutrones chocan con los núcleos de los materiales de las formaciones y con cada colisión el electrón pierde parte de su energía.

La cantidad de energía perdida por colisión depende de la masa relativa del núcleo con el que choca el neutrón. La mayor pérdida de energía ocurre cuando el neutrón golpea un núcleo de hidrógeno, las colisiones con núcleos pesados no desaceleran mucho al neutrón. Por lo tanto la desaceleración de neutrones depende en gran parte de la cantidad de hidrógeno de la formación.

Debido a las colisiones sucesivas, en unos cuantos microsegundos los neutrones habrán disminuido su velocidad y se difunden aleatoriamente, sin perder más energía, hasta que son capturados por los núcleos de átomos como cloro, hidrógeno o silicio, la tasa de conteo en el detector aumenta para bajas concentraciones de hidrógeno y si se presenta el caso contrario, pues disminuye para las altas concentraciones de hidrógeno.

2.2.1.4.2 Registro de densidad

Las densidades de las formaciones además de ser utilizadas para la determinación de la porosidad, también se emplean conjuntamente con otros perfiles para evaluar formaciones de litología compleja, cálculo de presión de sobrecarga, propiedades mecánicas de las rocas, evaluación de formaciones arcillosas e identificación de minerales para la detección de gas en los yacimientos si se relaciona con el perfil neutrón.

Su unidad es g/cm^3 , su principio de medición se basa en una fuente radioactiva que emite a la formación rayos gamma de mediana intensidad, considerándolos como partículas de alta velocidad, chocan con los electrones en la formación. Con cada choque los rayos ceden parte de su energía al electrón y continúan con energía disminuida, por último, los detectores del dispositivo captan estos rayos gamma de baja energía y por cada uno de estos rayos que choca con ellos, generan una pulsación eléctrica que se envía a la superficie indicando así la densidad de la formación (Schlumberger, 1983).

2.2.1.5 Registros acústicos

Además de los perfiles de densidad y neutrón, otro registro es utilizado para el cálculo de porosidad en las rocas de los yacimientos, es el principal uso que le dan los petrofísicos en el momento de la interpretación, se trata del perfil de propagación de ondas de sonido.

El tiempo de tránsito en una formación dada, depende de su litología y de su porosidad, siendo mayor cuando existe una mayor porosidad. El registro sónico es un registro en función del tiempo, t , que requiere una onda sonora para atravesar un pie de formación. Este es conocido como tiempo de tránsito, Δ_t , es el inverso de la velocidad de la onda sonora (Schlumberger, 1983).

La propagación del sonido en un pozo es un fenómeno complejo que está regido por las propiedades mecánicas de la formación, la columna de fluido del pozo y la misma herramienta de registro. Una herramienta sónica consiste en un transmisor que emite impulsos sónicos y un receptor que capta y registra los impulsos. El principio de la herramienta radica en que el sonido emitido del transmisor choca contra las paredes del agujero, esto establece ondas de compresión (Δ_{tc}) y de cizallamiento (Δ_{ts}) dentro de la formación, ondas de superficie a lo largo de la pared del agujero y ondas dirigidas dentro de la columna del fluido.

En el caso de registros de pozos, la pared y rugosidad del agujero, las capas de la formación y las fracturas pueden representar discontinuidades acústicas significativas. Por lo tanto, los fenómenos de refracción, reflexión y conversión de ondas dan lugar a

la presencia de muchas ondas acústicas en el agujero cuando se está corriendo un registro sónico.

Por interés de este trabajo sólo se mencionarán las ondas de cuerpo que son captadas por el receptor. El primer arribo u onda compresional es la que ha viajado desde el transmisor a la formación como una onda de presión de fluido, se refracta en la pared del pozo, viaja dentro de la formación a la velocidad de onda compresional de la formación y regresa al receptor como una onda de presión de fluido. La onda de cizallamiento es la que viaja del transmisor a la formación como una onda de presión de fluido, viaja dentro de la formación a la velocidad de onda de cizallamiento de la formación y regresa al receptor como una onda de presión de fluido (Schlumberger, 1983).

La unidad de medición de este registro es el microsegundo por pie ($\mu s/ft$), pero en la presente investigación estos datos se manejarán en microsegundo por metro ($\mu s/m$). Con respecto a las herramientas, a continuación se nombrarán algunas características de las herramientas sónicas antiguas y las que son utilizadas en la actualidad.

- a) Primeras herramientas: las primeras herramientas contaban con un transmisor (Tx) y un receptor (Rx), el cuerpo del instrumento estaba hecho a partir de goma para detener las ondas que viajan abajo de la herramienta al receptor. Existían dos problemas con este dispositivo, el primero es que el tiempo de recorrido siempre era demasiado largo debido a que el tiempo necesario para que las ondas elásticas viajaran por el lodo estaba incluido en la medición. El segundo inconveniente es que la longitud de la formación a través de la cual la onda elástica viaja no es constante porque cambia la velocidad de la onda ya que dependiendo de la formación se altera el ángulo crítico de refracción (Glover, 2014).
- b) Herramientas de dos receptores: estas herramientas se diseñaron para superar los problemas de las primeras herramientas, en estas se utilizaban dos receptores a pocos pies de distancia y medían la diferencia de los tiempos de llegada de las ondas elásticas en cada Rx de un impulso dado desde el Tx. El

problema con esta disposición es que si la herramienta se inclina en el agujero, o cambia el tamaño del agujero, el sistema de los Rx no funcionaba (Glover, 2014).

- c) Registro sínico compensado (BHC): esta herramienta compensa automáticamente los problemas con la desalineación de la herramienta y la variación del tamaño del agujero, utiliza un transmisor superior, otro inferior y dos pares de receptores sínicos. Cada uno de los transmisores se pulsa alternativamente, y los valores Δ_t se miden a partir de pares alternos de receptores. Estos dos valores de Δ_t se promedian para compensar la desalineación de la herramienta, en cierta medida por los cambios en el tamaño del pozo (Glover, 2014).
- d) Registro sínico de largo espaciamento (LSS): actualmente se dispone de herramientas sínicas que tienen espaciamentos entre el transmisor y el receptor entre 8 y 10 pies o de 10 y 12 pies, estos miden el tiempo de tránsito de la formación a mucha mayor profundidad que la herramienta BHC. Esta herramienta tiende más a proporcionar una medición libre de efectos por la alteración de la formación, daños por invasión de fluidos y agrandamiento del agujero. Siempre son más deseables estas medidas cuando los datos sínicos se van a utilizar para propósitos sísmicos (Schlumberger, 1983).

En la figura N° 5 se muestran las cuatro herramientas mencionadas anteriormente, se tienen las primeras herramientas (1), las de dos receptores (2), el registro sínico compensado (3) y el registro sínico de largo espaciamento (4).

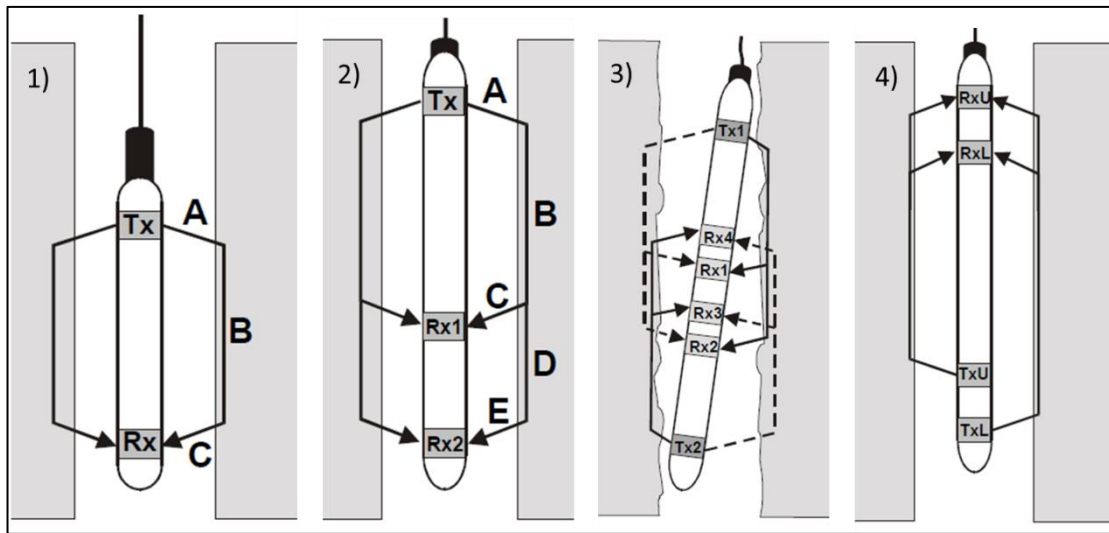


Figura N° 5 Herramientas sónicas (Modificado de Glover, 2014)

2.2.1.5.1 Anomalías en las mediciones de los registros sónicos

Los valores de lentitud de los registros sónicos suelen variar dependiendo de la litología, entre 40 microsegundos por pie en las formaciones duras, hasta 200 microsegundos por pie en capas recientes y en lodos de perforación comúnmente usados, algunas anomalías en los registros pueden ocurrir cuando se presenta un derrumbe en el hoyo o también conocido como el efecto de caverna y cuando ocurre el salto de ciclo (Schlumberger, 1989).

En un pozo con caverna, la lectura del tiempo de tránsito dada por la sonda de dos receptores presenta anomalías en el tope y en la base de la caverna en sentido opuesto. La figura N° 6 muestra un registro sísonico en capas de sal y de anhidrita donde muestran Δ_t de alrededor de $67 \mu s/ft$ de $52 \mu s/ft$ respectivamente.

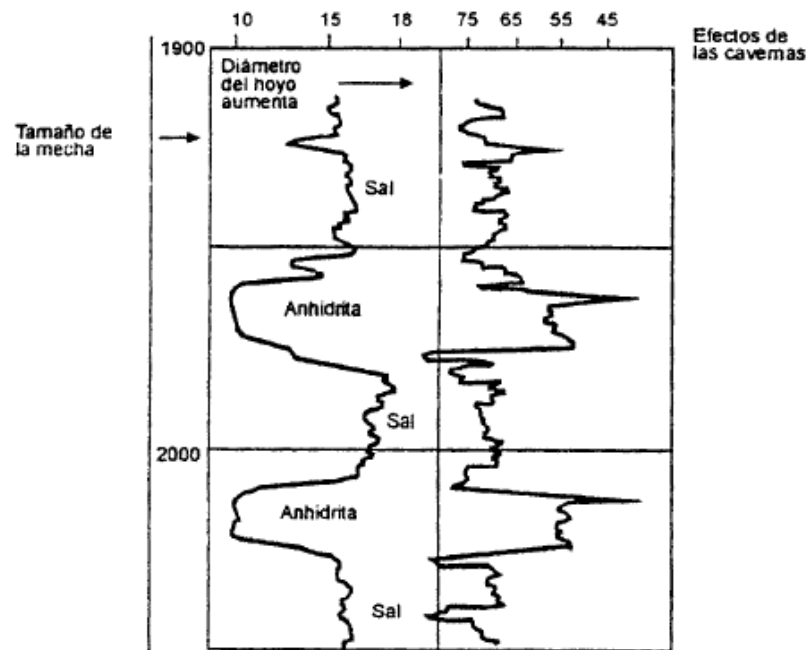


Figura N° 6 Efecto de caverna en un pozo (Schlumberger, 1989)

Como se puede observar en la figura N° 6 en tamaño nominal del pozo es de 8'', frente a las capas de sal se observan derrumbes de aproximadamente 16'' a 18''. El efecto de estos derrumbes se muestra en la curva sónica como desviaciones abruptas hacia tiempos de transito mayores en la parte superior de las capas de sal y menores en las partes inferiores de las mismas. Este efecto de caverna se solucionó con el perfil sónico compensado que está actualmente en uso (Schlumberger, 1989).

Por otro lado, como se mencionó anteriormente, otro efecto que produce anomalías en las lecturas del registro sónico es el salto de ciclo, este efecto se presenta cuando el segundo receptor de la sonda no es activado por el mismo arribo con el que es activado el primer receptor, cuando ambos receptores son activados con el mismo arribo dicho efecto no tiene importancia.

Teóricamente ambos receptores deberían activarse con el primer arribo de la energía sónica, sin embargo, en la práctica esto no ocurre. Puede suceder que el receptor que está más cerca del transmisor se active con un impulso de energía que, cuando a su vez llega al receptor más lejano, viene demasiado atenuado por las formaciones por donde viajó y no tiene la capacidad de activarse este último. En este

caso, el segundo receptor será activado por un siguiente impulso de energía en un tiempo determinado, después del paso de la onda que activó el primer receptor (Schlumberger, 1989).

En la mayoría de los casos el salto de ciclo se observa en el registro como desviaciones bruscas hacia valores altos de Δ_t . A menudo es posible obtener tiempos de tránsito correctos en donde se ha producido un cambio de ciclo. Esto se logra mediante una cuidadosa inspección del registro, siguiendo la tendencia e interpolando las lecturas que están encima y debajo del intervalo afectado por el salto (Schlumberger, 1989).

2.2.1.5.2 Aplicaciones de los registros sísmicos

Este perfil además de ser utilizado para el cálculo de la porosidad, como se mencionó al principio de esta sección, también provee un registro de tiempo y la velocidad de viaje "sísmica" a través de un pozo, suministra datos sísmicos para el uso en la creación de sismogramas sintéticos y su información es empleada para correlaciones estratigráficas, identificación de litologías, reconocimiento de facies, y la identificación de fractura, compactación, sobrepresiones y la roca fuente (Glover, 2014).

2.2.1.5.3 Interpretación de la onda de cizallamiento

Desde la aparición de los registros sísmicos el principal interés eran los tiempos de arribo la de onda compresional, actualmente se empieza a explorar la aplicación de la onda de cizallamiento en la evaluación de formaciones, es predecible que los datos de velocidad de la onda de cizallamiento resulten útiles para calcular propiedades de elasticidad e inelasticidad de la roca y como complemento de los datos sísmicos de cizallamiento.

Los datos del tiempo de tránsito de la onda de cizallamiento también son útiles para identificar los minerales de las matrices y los fluidos de los poros, por ejemplo, un diagrama del tiempo de tránsito de compresión t_c y el tiempo de tránsito de

cizallamiento t_s , pueden usarse para identificar el contenido de minerales de las distintas rocas atravesadas por el pozo. La técnica es similar a otras técnicas de grabación de registros de porosidad.

Existe evidencia que el tiempo de tránsito de la onda de cizallamiento puede ser útil para la identificación de fluidos. Observaciones de laboratorio sugieren que una ligera saturación de hidrocarburos disminuye la velocidad de la onda de compresión (relativa a la saturación del agua salada) a través de la roca porosa y aumenta la velocidad de la onda de cizallamiento (Schlumberger, 1983).

2.3 Ecuaciones empíricas

Diversos autores se han dado a la tarea de desarrollar ecuaciones lineales y no lineales para estimar la velocidad de la onda de cizalla a partir de datos de velocidad de onda P de registros de pozos. En las ecuaciones que en el presente trabajo se emplearan V_p y V_s representan la velocidad de la onda compresional y la velocidad de la onda de cizalladura respectivamente y las unidades están dadas en km/s .

2.3.1 Castagna

Castagna, Batzle y Eastwood (1985) analizaron datos publicados de velocidad, registros sónicos, sísmicos y de laboratorio para rocas lodosas, a las que los autores clasifican como rocas clásticas, silicatadas, compuestas principalmente de granos de arcilla o limo. Castagna et al. (1985) encontraron una relación empírica entre la velocidad de compresión y la velocidad de corte de las rocas lodosas saturadas de agua.

$$V_p = 1.16V_s + 1.36 \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde entonces V_s sería

$$V_s = 0.8621V_p - 1.1724 \quad \text{Ecuación 16}$$

2.3.2 Greenberg-Castagna

Otro de los métodos empleados para la estimación de velocidad de ondas de corte en rocas porosas son las relaciones de Greenberg-Castagna (1992), estos autores desarrollaron y resolvieron ecuaciones acopladas con datos de laboratorio y registros de pozos de velocidad de onda compresional y de corte en rocas saturadas de salmuera con datos de varias ubicaciones e indicaron que la velocidad de onda de corte puede estimarse con una precisión superior al 7%.

Los autores anteriormente mencionados propusieron la ecuación 17 para calizas, la ecuación 18 para areniscas, para dolomitas la ecuación 19 y la ecuación 20 para las arcillas.

$$V_s = -0,05508V_p^2 + 1,01677V_p - 1,03049 \quad \text{Ecuación 17}$$

$$V_s = 0,58321V_p - 0,07775 \quad \text{Ecuación 18}$$

$$V_s = 0,80416V_p - 0,85588 \quad \text{Ecuación 19}$$

$$V_s = 0,76969V_p - 0,86735 \quad \text{Ecuación 20}$$

2.3.3 Brocher

Brocher (citado en Maleki et al. (2014)) muestra miles de datos de velocidad de onda para una amplia gama de litologías de sedimentos no consolidados de rocas ígneas con muy baja porosidad y de tobas volcánicas no fusionadas a rocas metamórficas compactas, obteniendo la ecuación 21 no lineal válida para velocidades de onda compresional entre 1.5 y 8.5 *km/s*.

$$V_s = -0,1238V_p^3 + 0,7949V_p^2 - 1,2344V_p + 0,7858 \quad \text{Ecuación 21}$$

2.3.4 Carroll

En 1969 Carroll (citado en Maleki et al. (2014)) propone la relación empírica entre velocidad de onda compresional y de cizalla a partir de la ecuación 22.

$$V_s = 1,09913326V_p^{0,9238115336} \quad \text{Ecuación 22}$$

Esta correlación es válida para algunas rocas que poseen rigidez de Poisson entre 0.22 y 0.28 que implica a partir de las ecuaciones elásticas que el radio V_p/V_s puede ser entre 1.61 y 1.85.

2.4 Métodos de inteligencia artificial

Con el pasar de los años el hombre se ha caracterizado por buscar nuevas vías para mejorar su estilo de vida en el menor esfuerzo posible, una de ellas es la construcción de máquinas calculadoras que ayuden a resolver de forma automática y rápida determinadas operaciones que resultan tediosas cuando se realizan a mano.

Fue hasta 1946 cuando se construyó la primera computadora electrónica y desde entonces los desarrollos en el campo de la tecnología han tenido un auge impresionante. Estas máquinas permiten implementar algoritmos para resolver problemas que a mano se tornan engorrosos; sin embargo, una de las limitantes es cuando se presentan problemas que no pueden ser resueltos con el uso de algoritmos. Algunos de esos problemas pueden ser reconocimiento de un rostro desde un ángulo crítico, reconocimiento robusto de caracteres manuscritos y el modelado de procesos con variables múltiples y relaciones no lineales múltiples.

Es por lo antes expuesto que se comenzó a implementar la inteligencia artificial. Este método es un intento por descubrir y describir aspectos de la inteligencia humana que pueden ser simulados mediante máquinas (Matich, 2001).

2.4.1 Redes neuronales artificiales

El hombre es capaz de resolver problemas acudiendo a la experiencia; según las redes neuronales son un modelo artificial y simplificado del cerebro humano, estas redes emulan ciertas características propias de los humanos como la capacidad de memorizar, asociar hechos y obtener aprendizaje a partir de los errores.

La unidad básica de procesamiento de las redes neuronales artificiales está inspirada en la célula fundamental del sistema nervioso humano, la neurona. Todos los procesos del cuerpo humano están ligados a la (in)actividad de las neuronas y lo que básicamente ocurre en ellas es que son estimuladas o excitadas a través de sus

entradas (*inputs*) y cuando se alcanza un cierto umbral la neurona se dispara o se activa pasando una señal hacia el axón.

Se podrían definir las redes neuronales artificiales como redes interconectadas masivamente en paralelo de elementos simples y con organización jerárquica que procesan información por medio de su estado dinámico como respuesta a entradas externas. Tienen capacidad de aprender, mejorar su funcionamiento y muestran buenos resultados a problemas como datos ruidosos o difusos, patrones escondidos o sutiles, datos con no-linealidades significativas o no modelables y datos caóticos (en el sentido matemático) (Matich, 2001).

Las redes neuronales artificiales presentan un gran número de características semejantes a las del cerebro como aprender de la experiencia, generalizar de casos anteriores a nuevos casos y abstraer características esenciales a partir de entradas que representan información irrelevante. Algunas de las ventajas que incluyen son las siguientes:

- a) Aprendizaje adaptativo: las redes neuronales pueden aprender a diferenciar patrones mediante ejemplos y entrenamientos, por esto no es necesario elaborar modelos a priori ni especificar funciones de distribución de probabilidad. Además de esto, son adaptables a nuevas condiciones por lo que son capaces de cambiar constantemente y con lo que respecta al proceso de aprendizaje, los enlaces ponderados de las neuronas se ajustan de manera que se obtengan ciertos resultados específicos, por lo que no necesita un algoritmo para resolver un problema porque ella puede generar su propia distribución de pesos en los enlaces.
- b) Auto-organización: una red neuronal puede crear su propia organización o representación de la información que recibe mediante una etapa de aprendizaje. Cuando se emplean para conocer cierta clase de patrones ellas auto organizan la información usada, es decir, la auto organización consiste en la modificación de la red neuronal completa para llevar a cabo un objetivo específico.

- c) Tolerancia a fallos: las redes neuronales cuentan con una capacidad inherente a fallos, si sufren un fallo en un número no muy grande de neuronas y aunque el comportamiento del sistema se ve influenciado, no sufre una caída repentina. Su tolerancia a fallos le permite aprender a reconocer patrones con ruido, distorsionados o incompletos y pueden seguir cumpliendo su función. La razón de todo esto es porque las redes neuronales tienen su información distribuida en las conexiones entre neuronas, existiendo cierto grado de redundancia en este tipo de almacenamiento.
- d) Operación en tiempo real: el tiempo de cómputo es uno de los factores más relevantes en las áreas de aplicación por la necesidad de realizar procesos con datos de forma rápida. Las redes neuronales se adaptan perfectamente por su implementación paralela. Para que la mayoría de las redes puedan operar en un entorno de tiempo real, la necesidad de cambio en los pesos de las conexiones o entrenamiento es mínimo.
- e) Fácil inserción dentro de la tecnología existente: con las herramientas computacionales existentes (no del tipo PC), una red puede ser rápidamente entrenada, comprobada, verificada y trasladada a una implementación de hardware de bajo coste. Por lo tanto, no se presenta dificultades para la inserción de redes neuronales en aplicaciones específicas.

La estructura de las redes neuronales artificiales está constituida por neuronas interconectadas y arregladas en capas. Se conoce como capas o nivel a un conjunto de neuronas cuyas entradas provienen de la misma fuente y cuyas salidas se dirigen al mismo destino. Los datos ingresan por medio de la capa de entradas, viajan a través de la capa oculta y salen por la capa de salida (Matich, 2001).

- a) Función de entrada: las entradas no son neuronas, sino la forma de representar vectores de entrada, los valores de esta capa se multiplican por los pesos anteriormente ingresados a la neurona.
- b) Función de activación: las neuronas biológicas pueden estar activas o inactivas, es decir, tienen un estado de activación; las neuronas artificiales también, esta función calcula el estado de actividad de una neurona,

transformando la entrada global en un valor de activación cuyo rango va de 0 a 1 o de -1 a 1. Esto porque una neurona puede estar totalmente inactiva (0 o -1) o activa (1)

- c) Función de salida (*output*): el valor resultando de esta función es la salida de la neurona; por ende, la función de salida determina qué valor se transfiere a las neuronas vinculadas. Si la función de salida está por debajo de un umbral determinado, ninguna salida se pasa a la neurona subsiguiente. No cualquier valor es permitido como una entrada para una neurona, por lo tanto, los valores de salida están comprendidos en el rango $[0,1]$ o $[-1,1]$.

Una red neuronal debe aprender a calcular la salida correcta para cada arreglo o vector de entrada en el conjunto de ejemplos. El aprendizaje de una red neuronal es el proceso por el cual una red neuronal modifica sus pesos en respuesta a una información de entrada. Existen dos métodos de aprendizaje importante que pueden distinguirse:

- a) Aprendizaje supervisado: se caracteriza porque el proceso de aprendizaje se realiza mediante un entrenamiento controlado por un agente externo (supervisor) que determina la respuesta que debería generar la red a partir de una entrada determinada. El supervisor controla la salida de la red y en caso de que esta no coincida con la deseada, se procederá a modificar los pesos de las conexiones, con el fin de conseguir que la salida obtenida se aproxime a la deseada.
- b) Aprendizaje no supervisado: también es conocido como auto supervisado, las redes con este aprendizaje no requieren influencia externa para ajustar los pesos de las conexiones entre sus neuronas. La red no recibe ninguna información por parte del entorno que indique si la salida generada es respuesta a una determinada entrada es o no correcta y deben encontrar características, regularidades, correlaciones o categorías que puedan establecer entre los datos que se presenten en su entrada. Para corroborar que las salidas son válidas en algunos casos la salida representa el grado de

familiaridad o similitud entre la información que se le está presentando en la entrada y las informaciones que se le han mostrado hasta entonces. En otros casos, podría realizar una clusterización o establecimiento de categorías, indicando la red a la salida a qué categoría pertenece la información presentada a la entrada, siendo la propia red quien debe encontrar las categorías apropiadas a partir de las correlaciones entre las informaciones presentadas (Matich, 2001).

Existen tres funciones de transferencias típicas que determinan distintos tipos de neuronas, en la figura N° 7 se observan las respuestas de estas funciones:

- a) Función lineal: responde a la expresión $f(x)=x$. Se define un límite inferior y otro superior. Si la suma de las señales de entrada es menor que el límite inferior, la activación se define como 0, si la suma es mayor que el límite superior, la activación es 1. Para valores situados entre ambos límites, la activación se define como una función lineal de la suma de las señales de entrada.
- b) Función escalón: se utiliza cuando las salidas de la red son binarias. La salida de la neurona se activa solo cuando el estado de activación es mayor o igual que cierto valor umbral que representa la mínima entrada total ponderada necesaria para provocar la activación de la neurona.
- c) Función sigmoideal: es la más apropiada cuando se requiere como salida información analógica. Con esta función, para la mayoría de los valores del estímulo de entrada (variable independiente), el valor dado por la función es cercano a uno de los valores asintóticos. La importancia de esta función es que su derivada es siempre positiva y cercana a cero para los valores positivos o negativos; además toma su valor máximo cuando x es 0. Esto hace que se puedan utilizar las reglas de aprendizaje en las cuales se usan sus derivadas (Matich, 2001).

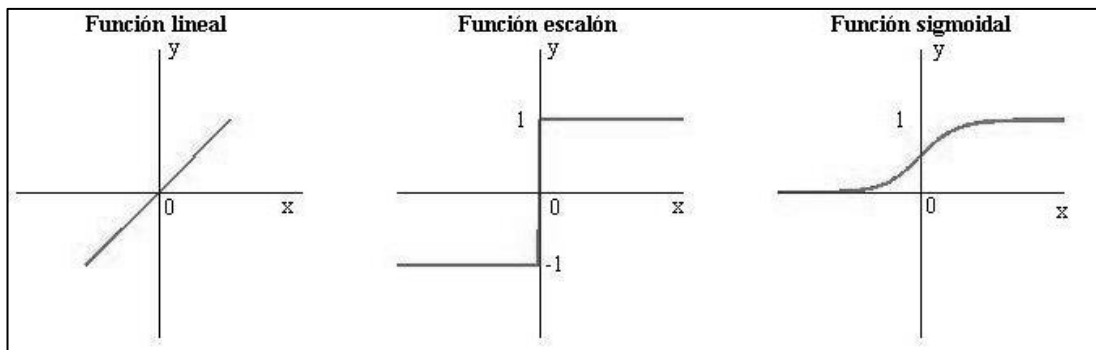


Figura N° 7 Respuesta de funciones de trasferencia de redes neuronales

Una vez entrenada la red con la arquitectura deseada y los datos correspondientes un paso importante es la etapa de validación de la red neuronal, en este paso se comprueba si la red neuronal puede resolver nuevos problemas, del tipo general, para los que ha sido entrenada. Para esta etapa se requiere de otro conjunto de datos denominado conjunto de validación o testeo.

Cada ejemplo del conjunto de evaluación contiene los valores de las variables de entrada, con su correspondiente solución tomada. En esta etapa la solución no es otorgada a la red neuronal sino que se compara las soluciones calculadas con un porcentaje de información oculta que no fue procesada por la red neuronal, validándose así el funcionamiento de la misma.

Por último, otro aspecto importante es la topología o también llamada arquitectura de la red neuronal; ésta consiste en la organización, disposición de las neuronas en la misma formando capas o agrupaciones de neuronas más o menos alejadas de la entrada y salida de dicha red. Los parámetros fundamentales de la red son el número de capas, número de neuronas por capa, grado de conectividad y el tipo de conexiones entre neuronas. Existen distintas arquitecturas de redes neuronales artificiales pero en vista al interés de la investigación sólo se hará énfasis a las redes de propagación hacia atrás (*backpropagation*).

2.4.1.1 Redes de propagación hacia atrás (*backpropagation*)

Las redes de propagación hacia atrás resultan de la forma en que el error es propagado hacia atrás a través de la red neuronal, es decir, el funcionamiento de esta

red consiste en lo siguiente, se aplica un patrón de entrada como estímulo para la primera capa de las neuronas de la red, esta se va propagando a través de todas las capas superiores hasta generar una salida la cual es comparada con la salida que se desea obtener y se calcula un error para cada neurona de salida. Luego de eso esos errores se transmiten hacia atrás partiendo de la capa de salida hacia todas las neuronas de la capa intermedia que contribuya directamente a la salida, recibiendo el error aproximado a la neurona intermedia de la salida original. Este proceso se repite capa por capa hasta que las neuronas de la red hayan recibido un error que describa su aportación relativa al error total. En base al valor de error recibido se reajustan los pesos de conexión de cada neurona de manera que la siguiente vez que se presente el mismo patrón, la salida este más cercana a la deseada.

El cambio de los pesos en las conexiones de las neuronas además de influir sobre la entrada global, influye en la activación y por consiguiente en la salida de una neurona. Por lo tanto, es de gran utilidad considerar las variaciones de la función activación al modificarse el valor de los pesos. Esto se llama sensibilidad de la función activación, de acuerdo al cambio de los pesos.

2.4.2 Algoritmo genético

Desde los años 1950 iniciaron los intereses acerca de la computación evolutiva. Alrededor de esta década varios científicos de forma independiente comenzaron a estudiar los sistemas evolutivos guiados por la intuición de que se podían emplear como herramienta en problemas de optimización en ingeniería, el principio era evolucionar una población de candidatos a ser solución de un problema conocido, utilizando operadores inspirados en la selección natural y la genética natural, imitando así el principio de la evolución biológica de Darwin.

Jhon Holland junto con colegas y estudiantes de la universidad de Michigan en las décadas de 1960 y 1970 perseguían dos objetivos, uno de ellos era abstraer y explicar rigurosamente el proceso adaptativo de los sistemas naturales y el otro era desarrollar vías para extrapolar esos mecanismos de adaptación natural a los sistemas computacionales. El algoritmo genético de Holland, considerado el creador de este

método de inteligencia artificial, era un método para desplazarse de una población de cromosomas (*bits*) a una nueva población utilizando un sistema parecido a la selección natural junto con los operadores de cruces, mutaciones e inversión inspirados en la genética (Rodríguez,s.f.)

Rodríguez describe los algoritmos genéticos como algoritmos de búsqueda basados en mecanismos de selección natural y genética natural que combinan la supervivencia de los más compatibles entre las estructuras de cadenas, con una estructura de información ya aleatorizada, intercambiada para construir un algoritmo de búsqueda con algunas de las capacidades de innovación de la búsqueda humana.

En la misma publicación titulada *Introducción a los algoritmos genéticos y sus aplicaciones* Rodríguez también lleva al termino biológico lo que sería un algoritmo genético y explica que en la cadena de ADN todos los organismos están compuestos por una o más células conteniendo éstas uno o más cromosomas, un cromosoma puede dividirse conceptualmente en genes y de forma superficial se puede decir que estos genes son los responsables de determinar los rasgos de un individuo. Las diferentes posibilidades de escoger un rasgo reciben el nombre de alelos y cada gen está ubicado en una determinada posición dentro del cromosoma que integra.

La mayoría de las especies reproductoras sexualmente almacenan sus cromosomas por parejas, durante la reproducción sexual se produce una recombinación o cruce; en cada padre, se intercambian los genes entre cada par de cromosomas, para formar un gameto (cromosoma único), y entonces, los gametos de los padres se emparejan para construir un conjunto completo de cromosomas diploides. La descendencia está sujeta a mutaciones, donde se produce un cambio en algún nucleótido (*bits* elementales de ADN) de padre a hijo; esas modificaciones son resultado habitualmente de “errores de copia”. La capacidad del organismo se define como la probabilidad de que el organismo viva para reproducirse (viabilidad) o como una función del número de descendencia que tenga ese organismo (fertilidad).

La forma más simple de un algoritmo genético como se describió en el párrafo anterior utiliza tres tipos de operadores estos son la selección, cruce y mutación (Merelo,s.f); de manera resumida un algoritmo genético consiste en hallar de que

parámetros depende el problema, codificarlos en un cromosoma, y aplicar selección y reproducción sexual con intercambio de información y mutaciones que generen diversidad. A continuación se definen los principales operadores de este método de inteligencia artificial:

- a) Selección: el operador de selección se encarga de escoger los cromosomas más capacitados para que estos sean los que se reproduzcan con más probabilidad de acuerdo con la teoría de Darwin en el cual los más capacitados son los que deben sobrevivir y generar una nueva descendencia más facultada, cuanto más capaz sea el cromosoma, más veces será seleccionado para reproducirse. La selección puede hacerse de las siguientes formas:
 - 1. Basado en el rango: en este método a cada cromosoma se le asigna un rango numérico basado en su aptitud y la selección se realiza en base a este ranking.
 - 2. Rueda de ruleta: en este caso se crea una ruleta con los cromosomas presentes en una generación, cada cromosoma tendrá una parte de esa ruleta mayor o menor en función a la puntuación que tenga cada uno. Se hace girar la ruleta y se selecciona el cromosoma en el que se para la ruleta. El cromosoma con mayor puntuación saldrá con mayor probabilidad. En caso de que las probabilidades difieran mucho, este método de selección dará problemas puesto que si un cromosoma tiene un 90% de posibilidades de ser seleccionado, el resto apenas saldrá lo que reduciría la diversidad genética.
 - 3. Selección de torneo: se escogen aleatoriamente un número de individuos de la población, y el que tiene puntuación mayor se reproduce, sustituyendo su descendencia al que tiene menor puntuación.
- b) Cruce: también llamado reproducción o *crossover* es el principal operador genético, se puede decir que no se está en presencia de un algoritmo genético si este no tiene cruce. Una vez realizada la selección de los

cromosomas se procede a realizar la reproducción entre dos de ellos la cual consiste en el intercambio genético. El objetivo de este operador es conseguir que el descendiente mejore la aptitud de sus padres por los que cada hijo hereda genes de cada uno de los padres. No ocurre nada si se emparejan dos descendientes de los mismos padres, ello garantiza la perpetuación de un individuo con buena puntuación, pero si esto ocurre muy a menudo puede generar problemas como que toda la población puede aparecer dominada por descendientes de algún gen, que además, puede tener caracteres no deseados (Merelo,s.f). La reproducción de los cromosomas puede ocurrir de las siguientes formas:

1. Cruce 1 punto: en este cruce los dos cromosomas padres se cortan por un punto, se copia la información genética de uno de los padres desde el inicio hasta el punto de cruce y el resto se copia del otro progenitor (figura N°8).

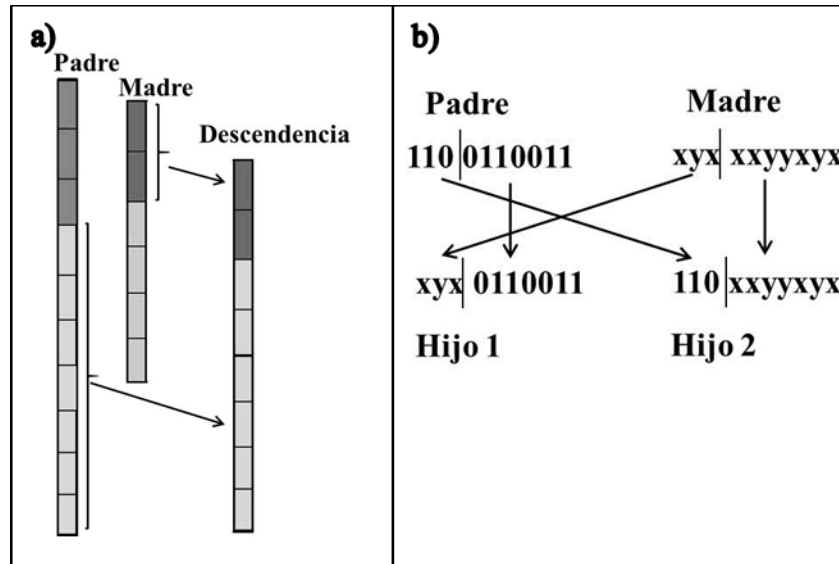


Figura N° 8 Cruce 1 punto para codificación binaria (a) y por valor directo (b)

2. Cruce 2 puntos: es la misma filosofía del caso anterior con la salvedad de que hay dos puntos de corte, se copiará al descendiente los genes de un cromosoma progenitor desde el principio hasta el

primer punto de cruce, los genes del otro progenitor desde el primer punto de cruce hasta el segundo y del segundo punto de cruce hasta el final se copiara el otro progenitor (figura N° 9).

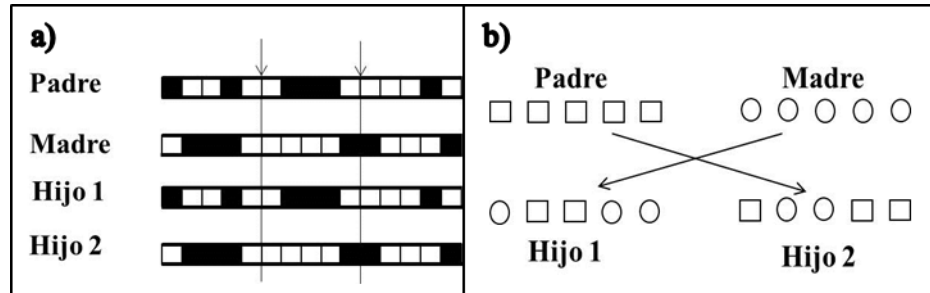


Figura N° 9 Cruce 2 puntos para codificación binaria (a) y por valor directo (b)

3. Cruce Uniforme: cada gen se obtiene de cualquiera de los padres de forma aleatoria, una opción es generar números aleatorios, si este número supera cierto umbral se elegirá un padre determinado y si no lo supera se elige al otro.
- c) Mutación: las mutaciones en la evolución son poco comunes y en la mayoría de los casos son letales a pesar de contribuir a la diversidad genética. En los algoritmos genéticos es igual de escasa pero es una forma de explorar nuevas alternativas con la finalidad de lograr individuos que generen nuevas soluciones y consiste en modificar ciertos genes de forma aleatoria atendiendo a la probabilidad de mutación establecida con anterioridad. Un aspecto importante de resaltar es que no es bueno abusar de la mutación porque aunque es un mecanismo generador de diversidad, y por lo tanto, la solución cuando un algoritmo genético está estancado, también es cierto que reduce el algoritmo genético a búsqueda aleatoria; siempre es más conveniente usar otros mecanismos de generación de diversidad como aumentar el tamaño de la población o garantizar aleatoriedad de la población inicial (Merelo,s.f).

Como todos los métodos, el algoritmo genético cuenta con ventajas y limitaciones, y a continuación se mencionan algunas de ellas, por ventajas este riguroso método posee:

- a) La mayoría de los otros algoritmos son en serie, estos por el contrario es intrínsecamente paralelo por lo que puede explorar el espacio de soluciones en múltiples direcciones a la vez y de encontrar uno de sus caminos no satisfactorio pueden eliminarlo fácilmente y continuar en trabajo en las opciones más prometedoras, dándoles una mayor probabilidad en cada ejecución de encontrar la solución.
- b) Debido al paralelismo mencionado en el párrafo anterior, este método funciona particularmente bien resolviendo problemas cuyo espacio de soluciones potenciales es realmente grande para hacer una búsqueda exhaustiva en un tiempo razonable.
- c) Destaca su habilidad para manipular muchos parámetros simultáneamente, refiriéndose esto a los problemas que no pueden definirse en términos de un único valor que hay que minimizar o maximizar. El paralelismo con el que cuentan los algoritmos genéticos les permite producir múltiples soluciones, igualmente buenas, al mismo problema.
- d) Otra de sus características que puede parecer a primera vista desfavorable es que los algoritmos genéticos no utilizan información específica conocida a priori, son relojeros ciegos que realizan cambios aleatorios en sus soluciones candidatas y luego utilizan la función de aptitud para determinar si estos cambios producen una mejora (Haupt y Haupt, 2004).

Por otro lado, a pesar de ser un método de inteligencia artificial robusto cuenta con ciertas limitaciones, algunas de ellas son:

- a) La representación del problema, el lenguaje utilizado para especificar soluciones candidatas debe ser robusto, es decir, capaz de tolerar cambios aleatorios que no produzcan constantemente errores fatales o resultados sin sentido.
- b) Debe elegirse cuidadosamente los parámetros del algoritmo genético siendo estos el tamaño de la población, tipo y fuerza de la selección y el ritmo de cruce y mutación; si el tamaño es demasiado pequeño puede que el algoritmo no explore suficientemente el espacio de soluciones para encontrar buenas

soluciones consistentemente; si el ritmo de cambio es demasiado alto o el sistema de selección se escoge inadecuadamente, puede alterarse el desarrollo de esquemas beneficiosos y la población puede entrar en catástrofe de errores, al cambiar demasiado rápido para que la selección llegue a producir convergencia.

- c) Otro de los problemas que pueden surgir se conoce como convergencia prematura, este problema es común en poblaciones pequeñas, donde incluso una variación aleatoria en el ritmo de reproducción puede provocar que un genotipo se haga dominante sobre los otros. Lo que ocurre en este caso es que al ser un individuo más apto que la mayoría de sus competidores este emerge muy pronto en el curso de la ejecución, se puede reproducir tan abundantemente que crece la diversidad de la población demasiado pronto, provocando que el algoritmo converja hacia el óptimo local que representa ese individuo, en lugar de rastrear el paisaje adaptativo lo bastante a fondo para encontrar el óptimo global.
- d) Por último, no una limitante sino una recomendación es no utilizar algoritmo genético para la solución de problemas que pueden ser resueltos de forma analítica debido a que esta última consume muchos menos tiempo y potencia computacional que el algoritmo genético, además de que las soluciones analíticas ofrecen la única solución exacta (Haupt y Haupt, 2004).

Los algoritmos genéticos han logrado ser un campo puntero en la investigación actual debido a su amplia aplicación en diversos problemas tanto en ingeniería como en la ciencia en general, algunas de sus aplicaciones son las siguientes:

- a) Optimización: la optimización se fundamenta en la búsqueda de valores de variables que intervienen en un problema para que el resultado sea el mejor posible, una solución óptima es aquella que minimiza o maximiza, según sea el caso, una función objetivo o también llamada función costo. Entre estos problemas se encuentran los problemas de optimización numérica y los problemas de optimización combinatoria, estos últimos conforman una subclase de los problemas NP-completos los cuales son problemas

numéricos importantes en cuya resolución el esfuerzo computacional aumenta de forma exponencial con el tamaño del problema. Ejemplos de optimización combinatoria son el problema del agente viajero y problema de la mochila, estos se basan en optimizar una función costo dependiente del orden de un numero finito de entes o eventos, es decir, buscar la mejor solución entre un conjunto finito de posibles soluciones. Esta fue la inspiración para los creadores de estos algoritmos, debido a las características intrínsecas de estos problemas su aplicación en este ámbito es un campo bien abonado.

- b) Programación automática: los algoritmos genéticos se han utilizado para desarrollar programas para tareas específicas y para diseñar otras estructuras computacionales como por ejemplo el autónoma celular, este es un modelo matemático de interacción simple que emula el comportamiento de muchos sistemas naturales; prueba de la utilización de los algoritmos genéticos en este campo es el trabajo de Vázquez y Oliver titulado *Evaluación de autómatas celulares utilizando algoritmos genéticos* los cuales concluyen expresando que los algoritmos genéticos son un método ideal para la obtención de autómatas celulares que sean capaces de llevar a cabo tareas complejas como por ejemplo el procesamiento de imágenes o el análisis de turbulencias.
- c) Máquinas de aprendizaje: se han empleado en diversas de estas aplicaciones como la predicción del tiempo o la estructura de una proteína. De la misma forma también han sido utilizados para desarrollar aspectos particulares de aprendizaje como los pesos en una red neuronal, las reglas para sistemas de clasificación de aprendizaje o sistemas de producción simbólica y los sensores para robots.
- d) Economía: utilizados en este ámbito para modelizar procesos de innovación, desarrollo de estrategias de puja y la aparición de mercados económicos.

- e) Ecología: su uso en esta rama son en la modelización de fenómenos ecológicos tales como las carreras de armamento biológico, la coevolución parásito-huésped, la simbiosis y el flujo de recursos.
- f) Evolución y aprendizaje: empleados en el estudio de las relaciones entre el aprendizaje individual y a relación de una especie.
- g) Sistemas inmunes: ha sido de utilidad el empleo de los algoritmos genéticos a la hora de modelizar varios aspectos de los sistemas inmunes naturales, incluyendo la mutación somática durante la vida de un individuo y el descubrimiento de las familias de genes múltiples en tiempo evolutivo.
- h) Sistemas sociales: utilizados en los aspectos evolutivos de estos sistemas como por ejemplo la evolución de la cooperación y la comunicación de sistemas multi-agentes (Rodriguez).

CAPÍTULO III

GEOLOGÍA REGIONAL

En este trabajo de investigación, como se ha mencionado anteriormente, se trabajará con registros de pozos de dos yacimientos de hidrocarburo de distintos tipos de rocas, campos siliciclásticos y carbonáticos, dichos datos pertenecen a la Faja Petrolífera del Orinoco y a la región costa afuera en el Golfo de Venezuela respectivamente. Los datos fueron suministrados por PDVSA-Intevep y son de carácter confidencial, por lo cual, se desconocen las coordenadas de los pozos que serán evaluados. Solo se cuenta con una ubicación referencial, lo que ayudara a inferir la geología regional del área de estudio, la cual se indica a continuación.

3.1 Faja Petrolífera del Orinoco

La Faja Petrolífera del Orinoco (FPO) constituye uno de los mayores yacimientos de crudo pesado y extrapesado, se ubica en la cuenca oriental de Venezuela. Esta cuenca está representada por una depresión topográfica y estructural de longitud aproximada de 800 km en sentido oeste-este, una anchura promedio de 200 km de norte a sur y un área total aproximada de 165.000 km² en los estados Guárico, Anzoátegui, Monagas y territorio Delta Amacuro y una extensión menor en el estado Sucre (González de Juana et al, 1980).

La cuenca sufrió una evolución relativamente simple por haber estado apoyada sobre el borde estable del Cratón de Guayana. Su prehistoria se sitúa en el Devono-Carbonífero, período que estuvo marcado por tres ciclos sedimentarios separados, correspondiendo el primero al Paleozoico Medio-Superior, el segundo comienza durante el Cretácico Medio y se hace regresivo durante el Terciario Inferior y el tercero de ellos desarrollado durante el Terciario Superior, siendo este último definitivo para la configuración de la cuenca petrolífera en su estado actual.

Con respecto a las estructuras presentes en la cuenca de Venezuela Oriental se destacan tres líneas de corrimiento. Dos de ellas subparalelas, la primera de ellas corresponde al Corrimiento Frontal de Guárico y la segunda, situada al este de la depresión de Barcelona, el sistema de corrimientos frontales de Anzoátegui y Monagas. Ambas se diferencian en cuanto a su significación para una cuenca petrolífera; la línea de corrimiento de Guárico constituye el límite septentrional del sector noroeste de la cuenca, al norte del cual no existen campos de petróleo ni se prevé desarrollo petrolífero a corto plazo. Por el contrario, en el sistema de Anzoátegui y Monagas, extendiéndose hacia el sur de la Serranía del Interior Oriental, se han desarrollado campos petrolíferos importantes como son Quiamare al oeste y Quiriquire al este (González de Juana et al, 1980).

La tercera línea de corrimiento, de gran importancia en la generación de petróleo, atraviesa la parte central de la cuenca con un rumbo aproximado N40°E entre los campos de petróleo de El Toco al suroeste y La Ceiba al noroeste; en conexión con el corrimiento se conocen en su flanco norte numerosas estructuras dómicas cuya producción de petróleo se agrupa en cinco principales campos. Este aislamiento se conoce como corrimiento de Anaco el cual se une oblicuamente con el sistema Anzoátegui-Monagas con el cual parece fundirse y continuar en sentido oeste-este (González de Juana et al, 1980).

La FPO representa el borde septentrional de la Cuenca de Venezuela Oriental, los sedimentos perforados, de edad Cretácico y Terciario Superior, indican ambientes de muy poca profundidad desarrollados sobre dos penillanuras erosionales donde se depositaron formaciones transgresivas que cubrieron diacrónicamente toda el área hasta una línea cercana al curso actual del río Orinoco. Todas las formaciones terciarias consisten en intercalaciones de arenas con lutitas y la relación arena/lutita aumenta hacia el sur (González de Juana et al, 1980).

La nomenclatura formacional empleada en la FPO abarca dos conjuntos de nombres: el sector occidental al oeste de la falla Ipire, representado por La Pascua, Roblecito y Chaguaramas, conteniendo el intervalo de La Pascua hasta 50% de arena y 70% la suprayacente Chaguaramas, ambas con intercalaciones ligníticas.

El sector oriental con las Formaciones Merecure y Oficina, derivados directamente del Área Mayor de Oficina muestran litologías similares a las descritas con anterioridad, salvo el aumento de relación arena/lutita (González de Juana et al, 1980).

3.2 Golfo de Venezuela

El Golfo de Venezuela forma parte de la región costa afuera venezolana. Desde el punto de vista geomorfológico, en las cuencas existentes en la región costa afuera de Venezuela se observan distintas zonas positivas y negativas, plataformas, arcos de islas, altos y bajos estructurales, que determinan una topografía irregular y sugieren variaciones en los patrones de las sucesiones sedimentarias y en los ambientes de depositación (Margotta, 2010).

Se desarrollaron sobre la pronunciada discordancia del Eoceno medio a superior las cuencas de la plataforma continental del norte de Colombia y Venezuela. Desde el Mioceno inferior, el arrastre dextral de la Placa Caribe se reanuda pero en forma más transpresiva y localmente transtensiva y de manera abrupta en Los Andes desde el Mioceno medio, y la sedimentación del Paleógeno en la parte norte de la plataforma continental venezolana, constituida predominantemente por turbiditas, sufrió, conjuntamente con las capas anteriores, una tectónica compresiva cuyas estructuras fueron severamente erosionadas bajo la discordancia que marca la base del Neógeno.

La presente configuración de las cuencas fue adquirida a partir del Oligoceno y Mioceno basal hasta el Reciente mientras la corteza oceánica Caribe experimentaba el subcorrimento hacia el sur por debajo del continente suramericano. Estratigráficamente se caracterizan por lutitas marinas, areniscas y calizas en ambientes batiales junto con areniscas de grano fino a grueso y sedimentos en el plioceno de arcillas calcáreas con abundantes fragmentos de conchas (Padrón, 2002).

En la parte oriental del golfo de Venezuela se reconocen dos ciclos de sedimentación con una discordancia intermedia descansando sobre un basamento metamórfico, la parte occidental presenta una situación diferente. Sobre la Plataforma

de Dabajuro solo se conoce la primera discordancia sobre un homoclinal de fuerte buzamiento hacia el este en el cual se localizaron reflexiones de calizas, que se pueden interpretar como de rocas cretácicas en facies similares a las conocidas en el Lago de Maracaibo y en la península de La Goajira. Esta unidad descansa sobre un basamento granítico. Las reflexiones de calizas cretácicas aparentemente terminan de manera abrupta en el centro del golfo contra una zona sorda, la cual ha sido identificada como de unidades metamórficas similares a las existentes como basamento en el resto de la Plataforma del Caribe (González de Juana et al, 1980).

En la península de la Goajira afloran unidades sedimentarias del Triásico-Jurásico y del Cretácico. Los sedimentos sobre la plataforma de la Goajira corresponden al grupo Cojoro, el cual representa un ciclo continental de capas rojas intercaladas con efusivas riodalíticas y una facies calcáreas que sugiere una breve incursión marina proveniente del surco de la Goajira, donde ocurría la sedimentación marina del Grupo Cocinas, con amonites del Jurásico Superior. En el surco de La Goajira, en relación aparentemente transicional, sigue una sección del Cretácico Inferior, que comienza con lutitas y calizas de la Formación Kesima. Sobre esta secuencia de surco existe una sección cretácica similar a la Plataforma de La Goajira meridional.

La secuencia cretácica sedimentaria de la Plataforma de la Goajira meridional comienza en el Valanginiense con una sección transgresiva con conglomerados y calizas arrecifales calcáreas plataformales muy fosilíferas y la Formación Palanz; sigue la Formación Moina de facies calcáreas plataformales muy fosilíferas y la Formación Yuruma de facies similares y calizas laminadas de ambiente euxínico, en su parte superior; estas formaciones representan el Hauteriviense y Barramiense respectivamente. Sobre esta sección continua ininterrumpidamente un intervalo de calizas equivalentes al Grupo Cogollo, calzas laminares concrecionarias equivalentes a la Formación La Luna y una sección de calizas laminadas gris oscuro de edad Campaniense a Maestrichinse denominada Formación Guaralamai (González de Juana et al, 1980).

CAPÍTULO IV

MARCO METODOLÓGICO

El método para alcanzar la solución al problema y lograr las metas propuestas en cada uno de los objetivos comprende las tres fases presentadas en el esquema de la figura N° 10, cada una de las etapas señaladas se aplicó a ocho pozos de yacimientos siliciclásticos y dos pozos de rocas carbonáticas; el empleo de distintos pozos tiene por objeto la comparación de los resultados obtenidos y con esto poder establecer con mayor seguridad el método óptimo para la estimación de registros acústicos de onda de cizalla.

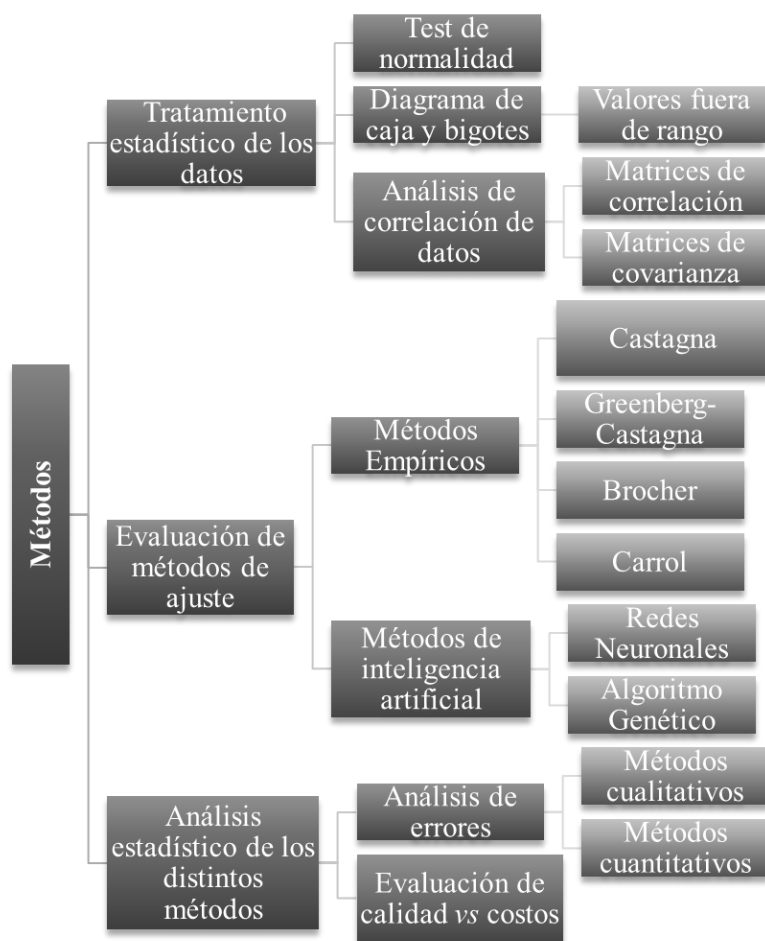


Figura N° 10 Flujo de trabajo para el desarrollo de la investigación

4.1 Tratamiento estadístico de los datos

Debido al propósito de la investigación, para la aplicación de los métodos lineales y no lineales se efectuó el análisis estadístico a la profundidad completa que disponían los registros, así como a intervalos de arena puntuales seleccionados en base a su litología, número de muestras y espesor del intervalo.

Además de todos los gráficos para el análisis estadístico, también por cada pozo se procedió a la elaboración de una tabla con los parámetros de los estadísticos descriptivos que están contemplados en el apéndice A junto con las tablas de matrices de covarianza e imágenes pertinentes a esta fase.

El intervalo de muestreo de la mayoría de los pozos de clastos es de 0,6096 m (2ft), los otros pozos (BZ-25, BZ-27, BZ-28) así como los de carbonatos tienen un intervalo de muestreo de 0,152m (0,5 ft). En rocas siliciclásticas se contó con los registros de diámetro de hoyo (CALI), sónico de onda compresional (DT), sónico de onda de cizalla (DTS), Gamma Ray (GR), resistividad profunda (RD), densidad (RHOB), neutrón (NPHI) y potencial espontáneo (SP). Por su lado los pozos de carbonatos cuentan con un *set* de registros parecido al anteriormente mencionado, la única salvedad es la ausencia del registro SP y la inclusión de los registros de resistividad somera (RS) y resistividad media (RM).

4.1.1 Pruebas de normalidad

Una vez visualizados los registros de los pozos se procede a la primera fase del tratamiento estadístico, para lo que se elaboraron las tablas de estadística descriptiva y acto seguido se aplicaron pruebas de normalidad en todos los registros.

Estas pruebas muestran un gráfico de probabilidad normal de los datos de la variable con el que se puede evaluar visualmente si los datos de la variable a estudiar provienen de una población con una distribución normal y la dependencia lineal de las mismas. Esa distribución normal es calculada a partir de la media y la desviación estándar de la población, obteniendo con esto el área bajo la curva y simulando dicha distribución como una línea recta como se nota en la línea segmentada de la figura N° 11.

Es de importancia señalar dos aspectos, el primero es que esta prueba se le aplicó al registro cáliber para utilizarlo como control de calidad para el descarte de posibles mediciones erróneas originadas por condiciones de hoyo y segundo, en los gráficos de algunos registros se pueden apreciar respuestas marcadas de distintas litologías.

En la figura N° 11 se muestra la prueba de normalidad perteneciente al registro neutrón del pozo BZ-25, como lo expresa la leyenda la línea punteada representa la distribución normal perteneciente al conjunto de datos, las cruces representan las mediciones del registro las cuales suelen solaparse con la línea sólida que representa los percentiles 25 y 75.

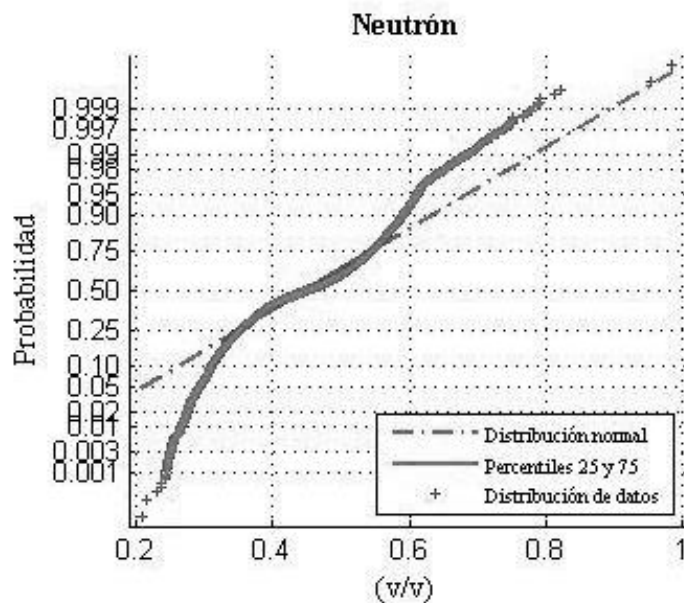


Figura N° 11 Test de normalidad del registro NPHI pozo BZ-25

4.1.2 Diagrama de caja y bigotes

Luego de las pruebas de normalidad se elaboraron los diagramas de caja y bigotes extendidos (*box plot*), este método describe de forma visual y coloca en una sola dimensión la información que provee un histograma. Se basa en una caja rectangular donde los lados más largos muestran el recorrido intercuartílico. La caja está dividida por un segmento que indica donde se posiciona la mediana y su relación con los cuartiles primero y tercero. Las líneas que sobresalen de la caja son los bigotes, los

valores excluidos de su límite de prolongación son conocidos *outliers* o valores atípicos y son identificados individualmente. De igual forma estos gráficos permiten contemplar la influencia de dispersión y simetría de los datos dependiendo del tamaño de la caja y los bigotes (figura N° 12).

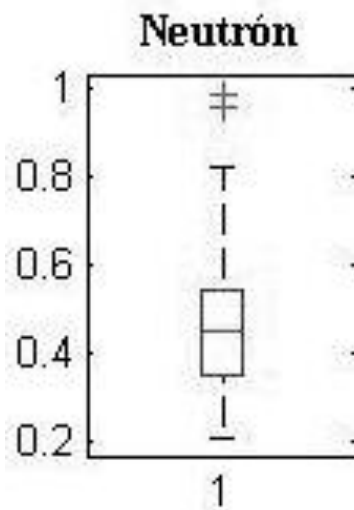


Figura N° 12 Diagrama de caja y bigotes del registro NPHI pozo BZ-25

4.1.3 Análisis de correlación de datos

Otros métodos para analizar datos estadísticamente son los histogramas de frecuencias, matrices de covarianza y correlación; la covarianza es un valor que indica el grado de variación conjunta de dos variables aleatorias respecto a sus medidas. La covarianza es positiva cuando los valores altos y bajos de una de las variables corresponden con los valores altos y bajos de la otra variable; por el contrario, la covarianza es negativa cuando los valores mayores de una variable suelen corresponder en general con los menores de la otra.

La figura N° 13 representa visualmente los histogramas de frecuencia en los que se contempla la distribución de los datos y los parámetros contenidos en la tabla de estadística descriptiva.

En la figura N°13 se aprecia también la matriz de correlación, esta matriz explica cómo se encuentran relacionadas cada una de las variables con otra variable. Su valor va de cero a uno. Si tiene valor cero, indica que no tiene ninguna relación con esa variable, por lo menos no lineal, es decir puede que tenga una relación cuadrática o de grado superior. Cuando la correlación es positiva indica que su proyección de la regresión lineal va a tender a crecer conjuntamente contra la variable, de ser negativa, el coeficiente entonces indica que su proyección de la regresión lineal va a tender a decrecer conjuntamente contra la variable.

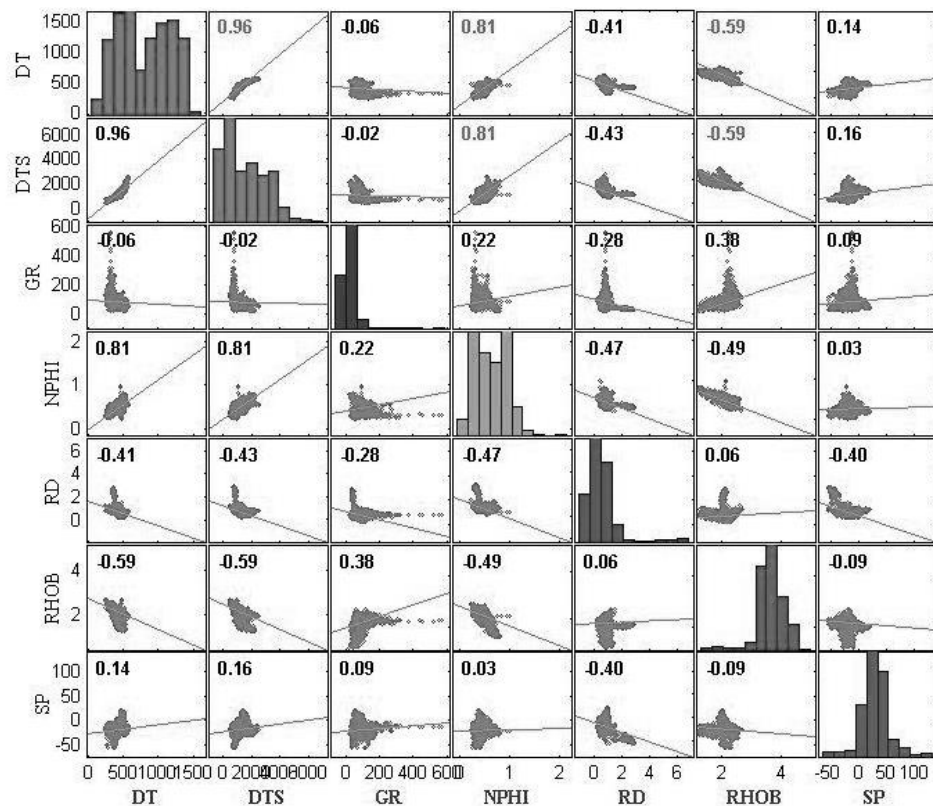


Figura N° 13 Matriz de correlación pozo BZ-25

4.2 Evaluación de métodos de ajuste

4.1.1 Métodos empíricos

Acto seguido del análisis estadístico se procedió al ajuste de las técnicas para la generación de los registros, las primeras técnicas llevadas a cabo fueron mediante las

relaciones empíricas propuestas por Castagna, Greenberg-Castagna, Brocher y Carroll, para lo que se calculó la velocidad de la onda S a partir de las mediciones de tiempo de viaje de los registros sísmicos compresionales aplicando las relaciones mencionadas en el marco teórico.

4.1.1.1 Criterio de selección de poblaciones

Cómo se mencionó luego del diagrama de flujo de trabajo para alcanzar los objetivos propuestos, el análisis estadístico de los datos además de efectuarse al pozo completo, también se le realizó a intervalos determinados, esto debido a que en la aplicación de los métodos empíricos la relación de Greenberg-Castagna posee distintos coeficientes dependiendo del tipo de roca.

El criterio de selección de poblaciones de siliciclásticos se basó en escoger intervalos de arenas con bajo contenido de arcilla que superaran las 40 muestras. A cada uno de los intervalos se le llevó a cabo pruebas de normalidad y matrices de correlación para el estudio del comportamiento de los datos con la intención determinar si era representativa o no su elección. A continuación se presentan los motivos por los cuales algunos intervalos fueron irrelevantes junto con el número de la figura en la que se pueden visualizar en el apéndice A.

- a) Carencia de muestras: algunas de las arenas seleccionadas a pesar de presentar escaso contenido de arcilla su número de muestras era menor a 40, cifra insignificante en comparación al número de muestras del pozo. Cuando se estaba en presencia de escenarios similares no se le elaboraron los análisis estadísticos.
- b) Dispersión en *crossplot*: en varios de los intervalos escogidos, las matrices de correlación indicaban dispersiones pronunciadas como consecuencia de distintos factores ya sea el incremento o disminución progresivo de finos en la columna, la existencia de más de una población y pequeñas variaciones del tamaño de grano o composición; dichas dispersiones no generan una relación viable por lo que fue preferible su omisión, se descartaron el intervalo 4 del

pozo 22 (apéndice A.40) y el intervalo 2 del pozo 25 (apéndice A.61) por estas razones.

- c) Presencia de conglomerados: otras exclusiones de población se fundamentaron en la formación de conglomerados; generalmente se espera que la respuesta de los gráficos cruzados sea de forma elipsoidal, estos casos por el contrario formaban conglomerados expresando similitud entre ellos y dificultando la existencia de una tendencia lineal, este fue el caso de la arena 1 y 3 del pozo 22 (apéndice A.31 y A.37)

En algunas oportunidades las correlaciones inferiores a 0,5 en los registros litológicos se deben a intercalaciones de limos, o arenas con presencia de hidrocarburo, estos casos no se suprimieron, la metodología utilizada fue filtrar el intervalo de interés con el objeto de verificar el motivo de la dispersión, como por ejemplo los intervalos 2 y 3 del pozo 23 (apéndice A.49 y A.52).

Finalizando este apartado es importante resaltar en esta sección que al pozo BZ-27 también se le realizó el análisis estadístico por intervalos, pero por mostrar gran dispersión entre los registros, sus resultados sólo fueron considerados con respecto a toda la profundidad del pozo.

4.1.2 Métodos de inteligencia artificial

4.1.2.1 Redes neuronales

La aplicación de este método de inteligencia artificial se llevó a cabo con el lenguaje de programación *Matlab*. En la figura N° 14 se puede apreciar un esquema del procedimiento utilizado para la generación de los resultados obtenidos a partir de esta técnica y acto seguido una pequeña descripción de cada uno de los pasos contemplados en el esquema.

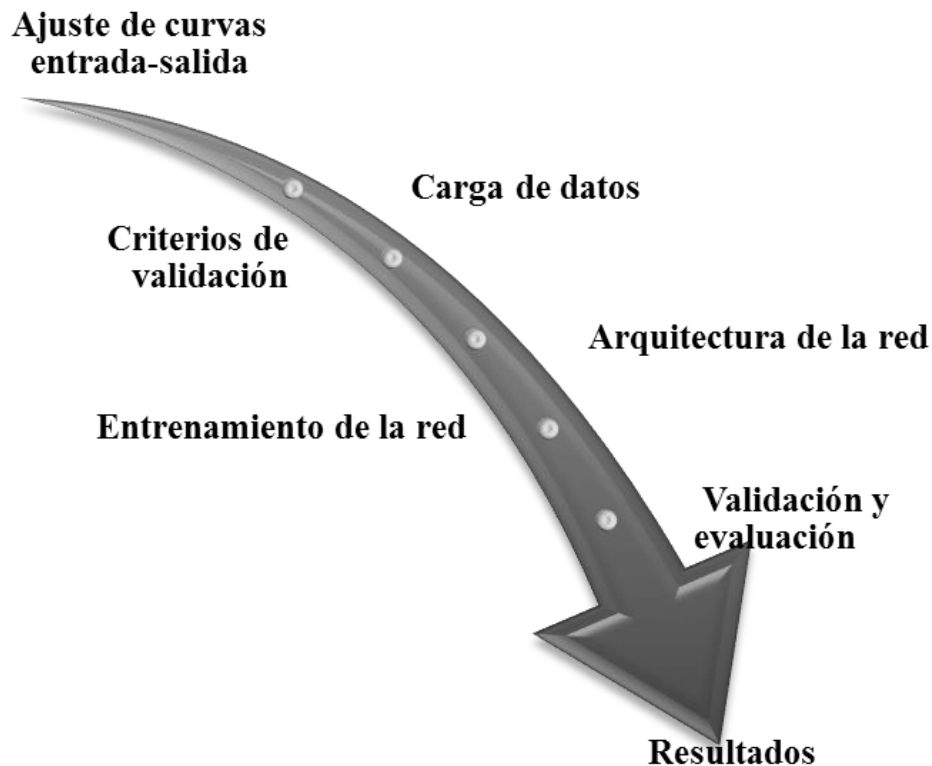


Figura N° 14 Flujo de trabajo para el empleo de redes neuronales

- a) Ajuste de curvas entrada-salida: al ingresar a la herramienta de redes neuronales aparecen distintas opciones, que solucionan otras necesidades de los usuarios, además del ajuste de curvas entrada-salida, también se encuentra reconocimiento de patrones, de conglomerados y análisis de series de tiempo. Para problemas como el presentado en esta investigación se selecciona ajuste de curvas entrada-salida.
- b) Carga de datos: los datos deben estar organizados de forma matricial y especificar si las variables se encuentran dispuestas con respecto a filas o columnas. En este caso se colocaron los distintos registros de cada pozo siguiendo un estricto orden entre las variables de entrada y su correspondiente salida.
- c) Criterios de validación: en esta parte de la red la herramienta contiene tres tipos de muestras, las muestras de entrenamiento con las que la red es ajustada

acorde a su error; las muestras de validación, utilizadas para medir la generalización de la red y detener el entrenamiento cuando la generalización deje de mejorar y por último las muestras de prueba las cuales no tienen efecto en el entrenamiento y proporcionan una medida independiente del rendimiento de la red durante y después del entrenamiento. Estas muestras tienen una ponderación predeterminada de 70% para el entrenamiento, 15% para la validación y 15% para la prueba de la red, éstos pueden ser variados por el usuario.

- d) **Arquitectura de la red:** en esta sección se definen el número de neuronas con la que va a trabajar la capa oculta de la red. El número predeterminado de neuronas en la capa oculta es de 10, pero es posible que se desee cambiar este número dependiendo del rendimiento de la red. La figura N° 15 muestra un esquema de la configuración de la red neuronal artificial una vez insertados los datos y colocado el número de neuronas en la capa oculta.

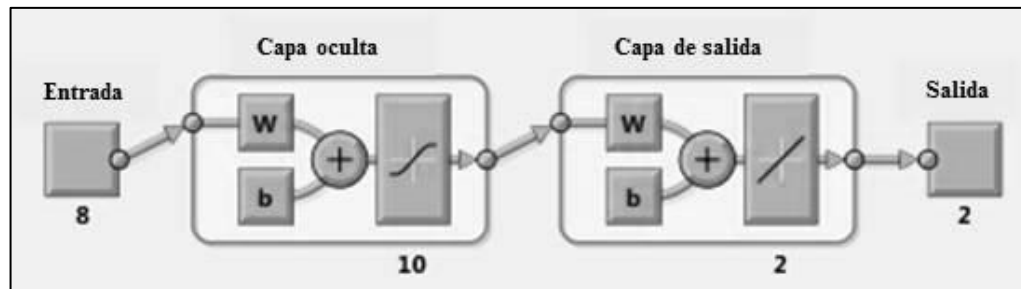


Figura N° 15 Configuración de red neuronal (modificado de entrenamiento de red neuronal en *Matlab*)

- e) **Entrenamiento de la red:** en el entrenamiento se capacita a la red para que cumpla con los objetivos deseados, el método utilizado es la propagación hacia atrás de Levenberg-Marquart. El entrenamiento como se mencionó anteriormente se detiene de forma automática cuando la generalización deja de mejorar, indicado esto por un aumento en el error cuadrático medio de las muestras de validación.
- f) **Validación y evaluación :** la etapa de validación comienza una vez la red se detiene, se despliega un cuadro con un conjunto de información tal como el

número de iteraciones realizadas, el tiempo de ejecución y una serie de gráficos estadísticos para el análisis del entrenamiento realizado, entre ellos, gráficos de regresión e histogramas de error. Acto seguido se evalúa si el rendimiento de la red fue lo suficientemente bueno, para esto en el panel que se despliega de *Evaluate Network* en el apartado para pruebas adicionales se insertan datos de entrada y salida, con el mismo formato utilizado para el entrenamiento, acá la herramienta calcula otro error cuadrático medio en base al entrenamiento y a la evaluación y generara otro gráfico de regresión.

- g) Resultados: en esta sección la herramienta despliega una ventana donde se puede extraer el guión avanzado; este guión es un código comentado que contiene los parámetros de la arquitectura y la función de la red neuronal. En esta última es donde se determina si la red fue entrenada de tal modo que arroje los resultados deseados. En este punto se ejecuta la función alimentándola con datos de entrada de un pozo (pozo oculto) que no han sido utilizados para el entrenamiento ni la evaluación de la red, generando finalmente el registro sintético y evaluando su similitud con la salida deseada. De igual forma, se puede salvar los resultados obtenidos, estando entre estos las salidas y los errores de la matriz de *Matlab*.

4.1.2.1.1 Criterio de ejecución de redes neuronales

Para llevar a cabo el flujo de trabajo de la figura N° 10 se dividieron los pozos respecto a su intervalo de muestreo y se seleccionó la profundidad común de los pozos para cada red. Parámetros como los datos de entrada para entrenar, evaluar y validar, el número de neuronas en la capa oculta y el reentrenamiento pueden ser controlados por el usuario en caso de usar un motor para redes neuronales como el empleado en esta investigación o similar, todo dependerá del buen rendimiento de la red. En el presente trabajo se realizaron distintas pruebas cambiando dichos parámetros:

- a) Datos entrada: al principio, en el análisis estadístico de los datos se realizaron matrices de correlación para verificar la correspondencia entre

los registros, con estos gráficos también se visualizó la relación del registro sísmico de cizalla con las demás variables y con esta información se iniciaron las primeras pruebas.

Un aspecto importante de resaltar antes de ahondar en la implementación de este método es que los registros GR y SP a pesar de trabajar con ellos a lo largo del análisis estadístico y de ser indiscutiblemente útiles para la discriminación de litologías fueron descartados al momento de implementar redes neuronales puesto que la ausencia de estos registros en algunos pozos limitaba la información disponible para la realización de las redes y además de esto mostraban considerable dispersión así como bajo coeficiente de correlación con respecto a las demás variables, aspecto que puede ser visualizado claramente en todas las matrices de correlación de los apéndices.

La mayoría de los pozos mantenían una correlación mayor a 0,5 entre los registros DTS con DT, NPHI y RHOB por lo que para las primeras pruebas los datos de entrada contenían sólo estas variables, acto seguido se hizo la prueba con todo el set de registros, es decir, incluyendo el registro RD.

- b) Número de neuronas: se realizaron pruebas variando el número de neuronas en la capa oculta, el motor utilizado tiene de forma predeterminada 10 neuronas en esta capa. Aunque los resultados obtenidos eran satisfactorios, para evaluar las variaciones con respecto al número de iteraciones y el tiempo de cómputo necesario para obtener la salida deseada, se probó además colocando una y dos neuronas por cada input, entendiéndose input cada registro para el entrenamiento de la red.

De igual forma se realizaron pruebas con 20 y 40 neuronas pero al ver los resultados se decidió variar el número de neuronas exponencialmente, haciéndose pruebas con 1,100 y 1000 neuronas en la capa oculta.

- c) Reentrenamiento: ésta es una de las opciones que contiene la herramienta para reentrenar la red, si los resultados obtenidos no fueron

los esperados, se tiene la opción de modificar la arquitectura de la red con respecto al número de neuronas o simplemente reentrenarla con los parámetros iniciales.

Para el caso de rocas carbonatadas se disponía sólo de información de dos pozos. Estos presentan características distintas de litología y resistividades por lo que podrían no pertenecer a un mismo yacimiento, además están grabados a profundidades distintas y si se recuerda uno de los primeros parámetros establecidos para el entrenamiento de la red es la profundidad común de los pozos.

Por las razones mencionadas en el párrafo anterior se decidió trabajar con esos pozos por separado y por no disponer de más información se procedió generando dos *sets* de registros modificados con ruido aleatorio que no modifica de manera sustancial la tendencia del registro, contando entonces para el entrenamiento de la red con el pozo del campo y los dos *pseudo* pozos.

4.1.2.2 Algoritmo genético

Para cumplir el objetivo de la investigación con el otro método de inteligencia artificial, algoritmo genético, se realizó una reestructuración del código propuesto por Haupt y Haupt (2004) en su libro *Practical Genetic Algorithms*, esto con el objeto de adaptar en el código a la función de costo a una recta, donde Y estará representado por el registro DTS y X por DT alimentados de una tabla anexa, necesitándose entonces que el algoritmo genético genere los coeficientes y constantes a y b para minimizar la función mencionada. La función de costo o de ajuste, se expresó en función del error cuadrático medio (RMSE), donde lo que se persigue es que este error sea mínimo. El código reestructurado cumple con las funciones del flujo presentado en la figura N°16. Acto seguido se especifican cada una de dichas funciones.

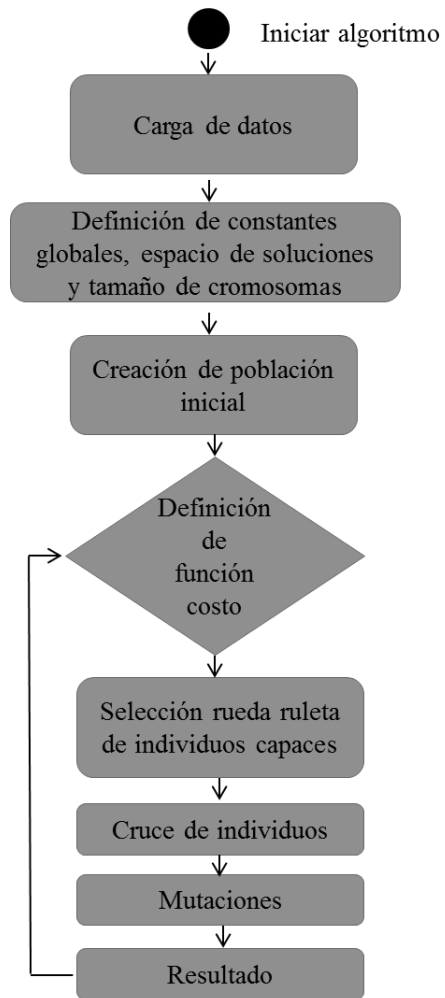


Figura N° 16 Funciones del código reestructurado para algoritmo genético

1. Carga de datos: Se importan los datos de una tabla anexa que alimentaran la ecuación con valores de DT y DTS. A cada uno de los datos se les calcula el logaritmo de base 10, para reducir la dispersión y para asegurar una dependencia lineal de los datos, lo cual facilita la estructuración del algoritmo genético.
2. Definición de constantes globales: las constantes definidas abarcan el número máximo de iteraciones, mínimo valor que puede tomar la función de costo, el

tamaño de la población aleatoria, cuantos individuos se mantienen, número de descendientes por pareja y número de mutaciones.

3. Definición del espacio de soluciones: en este renglón se colocan los valores mínimos y máximos que pueden tomar los resultados para minimizar la función costo. Este es el punto quizás más engorroso del proceso debido a que los parámetros óptimos se obtienen a partir de la experiencia en las estimaciones previas. En esta investigación se tomaron los coeficientes y constantes generados con antelación de regresiones de DTS vs DT de cada pozo y en base a ellos se fueron realizando las pruebas hasta conseguir el mejor ajuste de los resultados.
4. Tamaño del cromosoma: se establece el número de bits que tendrá el cromosoma, teniendo en cuenta que el mismo estará dado por la unión de los números binarios de a y b, asimismo se consideró la precisión del ajuste, para lo cual se consideraron 4 dígitos decimales.
5. Creación de poblaciones: en esta sección el código genera una matriz binaria, que viene dada por el número de individuos y por las características de cada individuo (número de cromosomas); estas características estarán definidas por el espacio de soluciones y por el grado de precisión que se desea alcanzar para las constantes de a y b con las condiciones establecidas en las secciones anteriores y acto seguido se convierten en un número decimal. Las constantes a y b, representan los coeficientes de una función lineal que será minimizada a través del algoritmo genético. Asimismo, es importante destacar, que la población inicial es la única que se genera de manera aleatoria, el resto de los individuos serán generados mediante cruce y algunos de esos tendrán mutaciones.
6. Definición de la función de costo: como se ha mencionado con antelación, se define la función de costo que se desea minimizar. Para este caso la función de costo es el error cuadrático medio (RMSE), el cual opera de la siguiente

forma $[Y-(aX+b)]$, a esta expresión se le calcula el RMSE para toda la columna de valores que toma DTS y DT siendo DTS igual a Y y DT igual a X. La idea es que la función de costo ayude a determinar los valores de las constantes a y b que minimizan el valor de RMSE.

7. Operadores de algoritmo genético: seguido de la definición de la función costo le siguen estos operadores; las constantes a y b en cada iteración son transformados de binario a decimal y evaluadas en la función costo, una vez evaluados, los individuos se ordenan de menor a mayor y se selecciona el 50% de la muestra, esto con la idea de seccionar los individuos más aptos para alcanzar la solución del problema, acto seguido vuelven a transformar a binarios y se reproducen por rueda ruleta para definir los individuos que se van a cruzar, lo cual dará origen a la nueva población y así se repite el ciclo hasta encontrar los individuos más competentes para la resolución del problema. Durante el proceso de cruce, se evalúa la probabilidad de que cada individuo sea afectado por una mutación, si este criterio se cumple, el individuo puede que adquiera una característica especial que lo ayude a ser seleccionado para reproducirse y acelerar la solución del problema, o puede que sea una mutación destructiva que empeore al individuo y reduzca las probabilidades de ser seleccionado por la rueda de ruleta. Después se convierte nuevamente el resultado en decimales para ser nuevamente evaluado en la función costo.
8. Resultados finales: una vez evaluados los parámetros en la función de costo, se generan los valores de a y b derivados de cada iteración, esto implica en listar los mejores individuos de cada iteración, para los cuales la función de costo posee su mínima expresión; como control de calidad se construye una gráfica que ilustra para cada iteración los valores de RMSE (figura N° 17), con la idea de observar el proceso de convergencia a la solución esperada y al mismo tiempo para determinar la iteración donde el algoritmo comienza a explorar el espacio de soluciones; asimismo, se grafican DT vs DTS, con la

superposición de la ecuación de la línea recta definida por los parámetros a y b (figura N° 18).

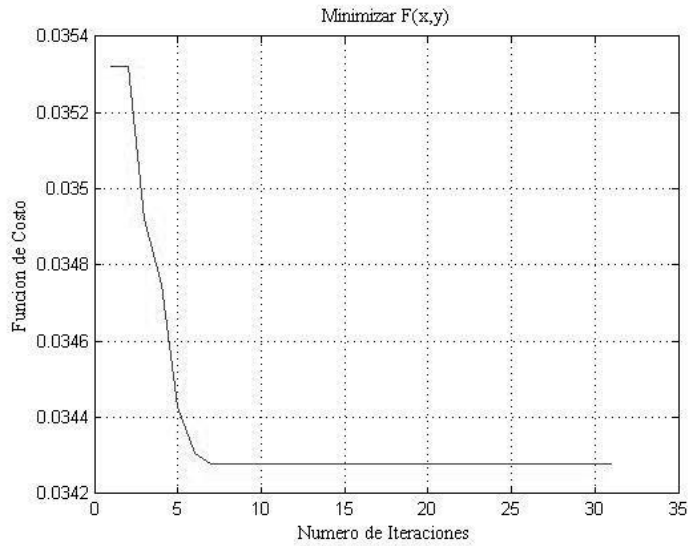


Figura N° 17 Minimización de la función costo vs número de iteraciones definida por los parámetros a y b

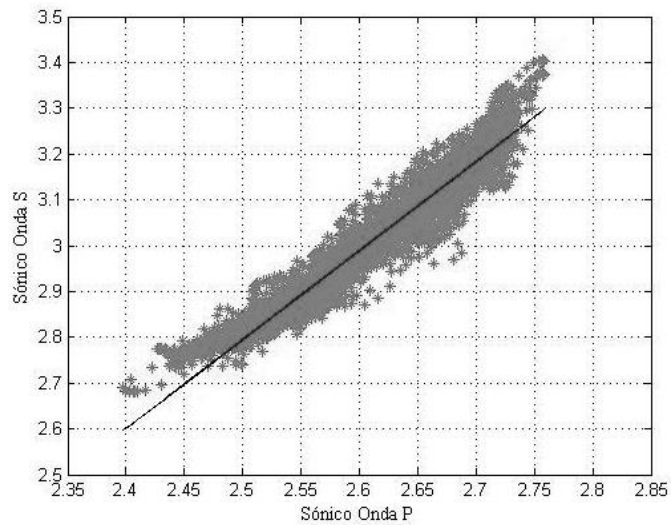


Figura N° 18 Sónico de onda P vs sónico de onda S con recta

4.3 Análisis estadístico de los distintos métodos

4.3.1 Análisis de errores

El análisis de los errores se efectuó de forma cualitativa y cuantitativa las cuales brindan descripción completa de la investigación. La primera tiene un carácter más general y superficial del problema en cuestión, la segunda en cambio permite examinar, en este caso, los resultados de forma numérica en el campo de la estadística.

El método en el que fueron empleados estos análisis en el ámbito cualitativo fue la visualización de los registros sintéticos y los DTS control del pozo en cuestión. En relación a la forma cuantitativa se efectuó el cálculo de la raíz del error cuadrático medio. Dicho error estima el promedio de los errores al cuadrado o para definirlo de otra forma estima la diferencia entre los que se estima y el estimador; la ecuación para el cálculo de este error se aprecia en la ecuación.

$$\sqrt{\frac{(Y_i - Y)^2}{n}}$$

Ecuación 23

Dónde:

Y = registro DTS del pozo

Y_i = registro sintético

n = número de muestras

4.3.2 Evaluación de calidad vs costos

El análisis de la calidad vs costos se enfocó en el tiempo de cómputo requerido para que cada método realizara los pasos o iteraciones pertinentes para obtener el resultado deseado, el comando *tic-toc* registra el tiempo de cómputo para la ejecución de alguna función o motor desarrollado en la herramienta de software matemático utilizada; este comando se utilizó en la evaluación las técnicas empíricas y algoritmo genético para obtener el tiempo de cómputo necesario para la obtención de sus resultados.

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para el análisis de los resultados obtenidos en primer lugar se presenta el estudio de cada uno de los métodos empleados, segundo una comparación entre todos y por último se visualiza el resultado de una sección desde el punto de vista geofísico y petrofísico.

Para algunos casos se presentan las figuras de los registros sintéticos junto con el registro original del pozo para evaluar el ajuste entre las curvas y una tabla anexa para la evaluación cuantitativa de cada método.

En las siguientes figuras y tablas, se encuentran las abreviaciones para el registro original, relación Greenberg-Castagna, Brocher, Carrol, Castagna, redes neuronales y algoritmo genético como DTS, GC, B, CR, C, RN, y AG respectivamente.

5.1 Métodos Empíricos

Los resultados obtenidos por los métodos empíricos a pesar de ser en su mayoría ecuaciones lineales proveen resultados y ajustes aceptables comparados con el registro original (figura N° 19), los mínimos y máximos de error cuadrático medio de dichas técnicas oscilaban entre 34,76-194,24 con la ecuación Greenberg-Castagna, 51,38-270,11 con la ecuación de Brocher y 44,73-303,61 con ecuación de Castagna. El error cuadrático medio por la ecuación de Carrol tuvo sus mínimos y máximos en 194,87-819,54. Todos estos valores se encuentran contemplados en la tabla 6.

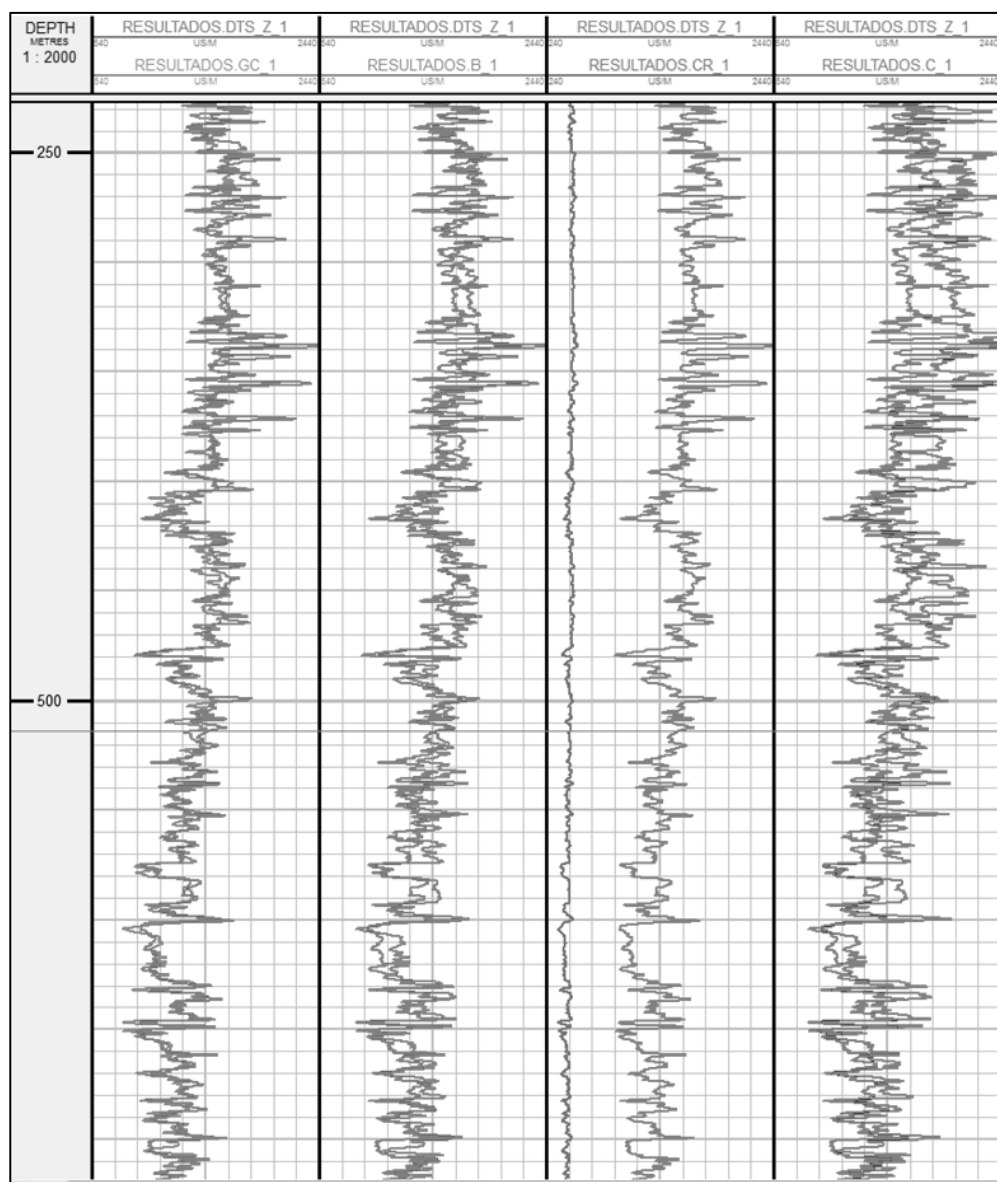


Figura N° 19 Registros DTS y registros sintéticos generados con métodos empíricos, de izquierda a derecha relaciones de GC (azul claro), B (violeta), CR (verde) y C (azul rey) pozo BZ-25

El error cuadrático medio para este pozo con cada una de las relaciones empíricas es de: 99,23 para Greenberg-Castagna, 126,79 para Brocher, 787,58 para Carrol y 208,14 para Castagna. Contrastando cualitativa y cuantitativamente las relaciones Greenberg-Castagna, Brocher y Castagna, la más robusta es la primera ecuación mencionada y le sigue Brocher, cuyo error cuadrático medio es de 27,56 puntos

mayor que el resultado de la relación Greenberg-Castagna. De igual forma ofrece resultados satisfactorios por debajo de la desviación estándar, la última de estas tres, Castagna, no es descartable pero se ve opacada por los resultados de las otras relaciones al superar su error cuadrático medio la desviación estándar en algunos pozos.

Con respecto a la ecuación de Carrol, como se mencionó en el marco teórico se utiliza esta correlación cuando el ratio de V_p/V_s puede estar entre 1,61 y 1,85. A pesar de que en los pozos de los campos estudiados este valor podía llegar a 2,9 se consideró también emplearla porque no necesitaba de un esfuerzo mayor su aplicación y así evaluar el comportamiento de una ecuación logarítmica en esta línea de investigación. Por los resultados obtenidos el rendimiento de esta ecuación es deficiente al ser empleada en estos campos o similares.

5.2 Inteligencia artificial

5.2.1 Redes neuronales

En lo concerniente a redes neuronales artificiales, los primeros ensayos se hicieron con el entrenamiento de una red que incluyó a los pozos BZ-25, BZ-27 y BZ-28, una vez determinada la mejor arquitectura se entrenaron las otras redes con los parámetros establecidos y se obtuvieron los resultados finales de la tabla 1. Para evaluar el rendimiento de las distintas arquitecturas se calculó la raíz del error cuadrático medio de cada pozo que conformaba esa red con respecto al registro DTS.

La primera exploración se efectuó con 10 neuronas en la capa oculta, con los registros que poseían mayor correlación con el registro DTS (DT, RHOB, NPHI) y luego se incluyó el registro de resistividad; en estas pruebas también se realizaron dos reentrenamientos para cada una sin variar los elementos de la arquitectura de la red, los resultados se pueden visualizar en la tabla 1.

Tabla 1 Comparación cuantitativa de la primera prueba de redes neuronales

10 Neuronas		ECM			It	TC (min)	R	EMCF
		BZ-25	BZ-27	BZ-28				
Correlaciones	Rtr	83,19	108,2	101,7	164	0,4		
	1	79,55	108,08	101,55	61	0,15	0,96	9620,6
	2	82,12	109,5	99,68	66	0,16		
Set con todos los registros	Rtr	78,04	89,82	94,41	33	0,1		
	1	75,18	91,75	91,36	111	0,33	0,97	7797,51
	2	78,28	89,78	90,28	91	0,27		

Se realizó sólo el análisis cuantitativo para esta prueba, del cual se puede señalar según la tabla 1 que la arquitectura más efectiva es la que abarca todo el *set* de registros, esto debido a que posee los menores valores de error de cada pozo, de número de iteraciones, de tiempo de cómputo, de coeficiente de correlación de Pearson y de menor error cuadrático medio final. La inclusión del registro de resistividad en el set de registros muestra mejores resultados porque este aporta valores acerca de contenido de fluidos que otros registros no resaltan.

Del mismo modo se puede visualizar que el reentrenamiento de la red no mejora de manera relevante los resultados obtenidos, al contrario, aumenta el número de iteraciones y con ellas el tiempo de cómputo.

La segunda prueba se realizó variando el número de neuronas, colocando una y dos neuronas por *input*, sin reentrenamiento y con todo el *set* de registros como se determinó en la prueba anterior, los resultados cuantitativos fueron los siguientes:

Tabla 2 Comparación cuantitativa de la segunda prueba de redes neuronales

Neuronas por <i>input</i>	ECM			It	TC (min)	R	EMCF
	BZ-25	BZ-27	BZ-28				
1	76,95	89,25	89,97	51	0,21	0,97	7732,29
2	71,95	81,68	84,77	48	0,31	0,97	6620,28

Como se evidencia en la tabla 2 la variación de cada uno de los parámetros es despreciable, así mismo en la siguiente figura N° 20 se observa que las variaciones entre los registros no son considerables.

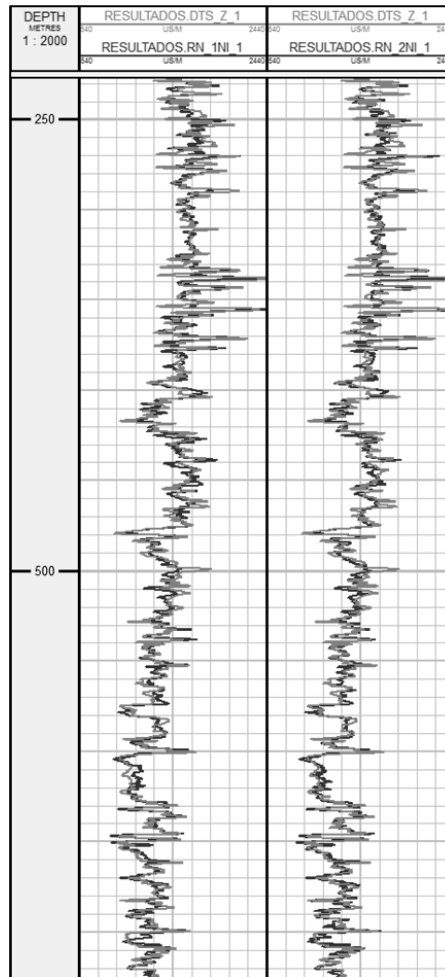


Figura N° 20 Registros DTS y registros sintéticos generados por redes neuronales con una (derecha) y dos (izquierda) neuronas por *output*

Tomando en cuenta lo antes expuesto se hizo una tercera y última prueba, la misma consistió en variar el número de neuronas de forma exponencial, los resultados se muestran en la tabla 3 y en la figura N° 21.

Tabla 3 Comparación cuantitativa de la tercera prueba de redes neuronales

Neuronas	BZ-25	BZ-27	BZ-28	It	TC	R	EMCF
1	139,25	155,47	143,23	409	0,58	0,91	21620,55
10	78,04	89,82	94,41	33	0,10	0,97	7797,51
100	61,16	65,04	66,82	63	5,31	0,98	5480,91

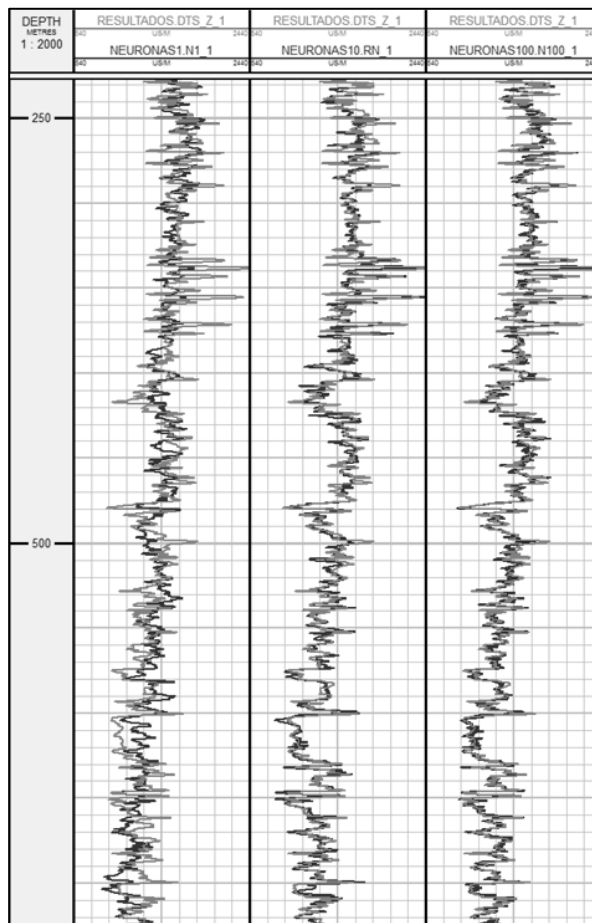


Figura N° 21 Registros con 1 (carril 1), 10 (carril 2) y 100 (carril 3) neuronas en la capa oculta pozo BZ-25

Es notorio que el ajuste visual y el error del registro generado con una capa oculta de 100 neuronas es mejor, sin embargo, otro de los aspectos de importancia es el número de iteraciones y el tiempo de cómputo. Si bien esta arquitectura reflejó buenos resultados, el tiempo de cómputo para su ejecución fue de 5,20 minutos mayor que el requerido para obtener el registro sintético con una arquitectura de 10 neuronas.

Otro experimento que se elaboró fue con 1000 neuronas en la capa oculta, al hacer el entrenamiento de la red la herramienta (*Toolbox* de Redes Neuronales Artificiales de *Matlab*) empleada se consumió los recursos de memoria del ordenador y no fue capaz de procesar los datos.

Con base en todas las pruebas ejecutadas la mejor arquitectura de este método de inteligencia artificial constaba del entrenamiento con todo el *set* de registros, diez neuronas en la capa oculta y sin reentrenamiento. El valor del error del sintético generado con respecto al registro original del pozo modelo fue de 67,667 y en los apéndices B.1, B.2, B.3 y B.4 se aprecia la visualización de los registros sintéticos generados para todos los pozos con este método.

5.2.2 Algoritmo genético

Los resultados obtenidos por esta técnica fueron bastante favorables en términos cuantitativos y cualitativos, el ajuste visual con el registro original es casi perfecto, un ejemplo de esto se puede aseverar en la pista 6 de la figura N° 18 en el caso del pozo modelo. Lo complicado se presentó en el entrenamiento del algoritmo genético que exploró los valores que podían tomar el coeficiente a y la constante b para minimizar la función de costo. El valor del error cuadrático medio del sintético generado con respecto al registro original del pozo modelo fue de 97,05 y los valores de a y b calculados por el método fueron los presentados en las tablas 4 y 5. Es importante recalcar que estos valores están expresados en escala logarítmica de base 10, es decir, para ser aplicados se debe aplicar logaritmo al registro DT y luego de tener el resultado regresar el cambio.

Tabla 4 Coeficientes a y b para cada pozo de siliciclásticos generados por algoritmo genético

Pozo	DTS=a*DT+b	
	a	b
BZ-15	1,6056	-2,0393
BZ-18	1,925	-2,0393
BZ-21	1,7501	-1,5759
BZ-22	1,6502	-1,3175
BZ-23	1,9022	-1,9846
BZ-25	1,942	-2,0601
BZ-27	1,5869	-1,1152
BZ-28	2,0024	-2,2474

Tabla 5 Coeficientes a y b para cada pozo de siliciclásticos generados por algoritmo genético

Pozo	DTS=a*DT+b	
	a	b
ZB-1	1,5908	-1,1594
ZB-3	0,78091	0,7728

5.2.3 Comparación de todos los métodos de estimación

Al realizar una evaluación visual de los resultados obtenidos, en la figura N° 22 se puede deducir que los mejores métodos para estimar el registro sísmico de cizalla son la ecuación propuesta por Greenberg-Castagna, redes neuronales y algoritmo genético. Sin embargo, inferir el método más robusto para la generación de estos registros no depende sólo de una evaluación visual, sino también de la comparación cuantitativa de los resultados, en las tablas 6 y 7 se presentan para cada pozo la raíz del error cuadrático medio de los sintéticos elaborados con respecto al registro DTS.

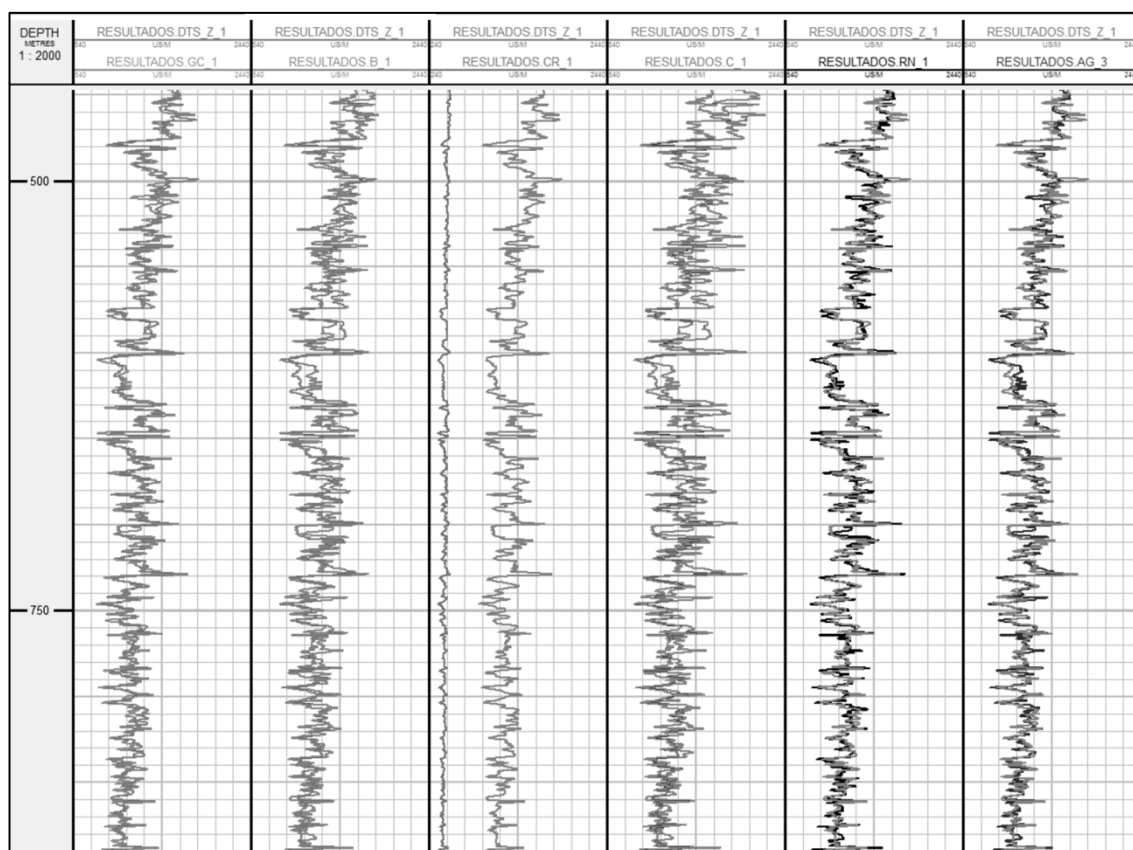


Figura N° 22 Comparación del registro sónico de cizalla (curva roja) con los sintéticos elaborados a partir de la técnica Greenberg-Castagna (curva azul claro), Brocher (curva violeta), Carrol (curva verde), Castagna (curva azul rey), redes neuronales (curva negra) y algoritmo genético (curva marrón) pozo BZ-25

Tabla 6 Error cuadrático medio de los registros sintéticos de pozos de siliciclásticos

Pozo	GC	B	CR	C	RN	AG
BZ-15	194,24	270,11	512,18	286,93	155,30	151,42
BZ-18	75,74	133,63	584,94	141,44	55,99	76,05
BZ-21	98,87	143,15	585,92	164,35	64,90	94,67
BZ-22	120,60	174,08	635,21	191,31	87,64	116,02
BZ-23	88,17	140,21	586,94	148,81	70,56	89,21
BZ-25	99,23	126,79	787,58	208,14	77,67	97,05
BZ-27		143,35	819,54	225,80	104,15	132,75
BZ-28	128,97	199,12	781,54	303,61	154,68	97,05

Tabla 7 Error cuadrático medio de los registros sintéticos de pozos de carbonatos

Pozo	GC	B	CR	C	RN	AG
ZB-1	83,2075	93,7885	556,3745	90,2567	33,6944	48,8113
ZB-3	34,7584	51,3795	194,8706	44,7263	31,8164	21,0335

El menor error de los registros sintéticos producidos se obtuvo con el método de inteligencia artificial de redes neuronales. En las tablas 6 y 7 se puede notar de igual forma que en dos de los pozos de campo siliciclástico el menor error obtenido fue por el método de algoritmo genético. El incremento de este error en esos pozos se debe a que estos fueron los pozos ocultos utilizados sólo para validar la red.

Como se visualiza en la tabla 4 existe similitud entre los valores de a y b generados por el algoritmo genético en siliciclásticos. Con los pozos de carbonatos no ocurre lo mismo, por el contrario si se comparan dichos valores entre los pozos no existe semejanza entre los coeficientes ni las constantes y además en la tabla 7 se expresa que el menor error cuadrático medio obtenido en uno de ellos es mediante redes neuronales y en el otro mediante algoritmo genético. La razón por la que el sintético del pozo ZB-3 no posee el menor error cuadrático medio frente a los resultados de redes neuronales se debe a que los pozos pertenecen a yacimientos distintos debido a que la relación V_p/V_s de este pozo está entre 1,57 y 2,96 y en el pozo ZB-1 está entre 1,14 y 1,96, por lo que aunque muestran resultados satisfactorios con los métodos de inteligencia artificial deben ser analizados como individuos separados y no en conjunto.

El tiempo de cómputo promedio para la generación de los registros sintéticos a partir de los métodos comentados al principio de esta comparación es de máximo 0,3 minutos. A pesar de contar con matrices que poseían dimensiones desde 726x4 hasta 7149x12 muestras, la aplicación de estas técnicas una vez establecidos cada uno de sus parámetros es considerablemente rápida si se está en disposición de un ordenador como el empleado para procesar los datos de esta investigación (procesador Intel(R) Xeon(R), memoria RAM 4,00 GB, 1 núcleo, procesador de 64 bits).

Por último, con respecto a la apreciación de evaluación *versus* costo, el empleo de las técnica para la estimación de registros sísmicos de onda de cizalla ya sea para futuras investigaciones o su implementación en el campo laboral, dependerá

principalmente del tiempo que disponga el usuario para la generación de dichos registros; se hace énfasis en este punto con base en que es posible que existan limitaciones de tiempo, de ser así la técnica más sencilla, rápida y eficaz es la ecuación de Greenberg y Castagna. Si se está en escenarios opuestos donde el tiempo no sea un factor determinante para la generación de registros sintéticos, entonces aplicar las redes neuronales artificiales es la mejor opción debido a su mayor eficacia y obtención de resultados con un bajo nivel de error con respecto al registro DTS original, que oscila entre 31,81 y 155,30 de acuerdo a los resultados obtenidos en este trabajo de investigación.

5.2.4 Resultados aplicados a la geofísica

El objetivo principal de esta investigación es comparar las técnicas de estimación para la generación de los registros de Vs de los campos estudiados, es por ello que a continuación se presentan la comparación del resultado obtenidos vs los originales para el campo de la geofísica.

El manejo de las velocidades de las ondas en el subsuelo es de vital importancia en la caracterización de yacimientos y para la elaboración de los modelos de velocidades, del mismo modo la generación de registros sintéticos de tiempo de viaje de onda de corte son necesarios para la aplicación de atributos de inversión bien sea conjunta o elástica; por lo general estos registros son escalados, esto implica bajar la resolución del registro para llevarlo a una escala de resolución similar a la del volumen sísmico.

Con la finalidad de evaluar la calidad del registro sísmico de cizalla sintético, se realizó una prueba de escalamiento mediante el cálculo de promedios por ventanas cada 12,2m. Esta actividad se realizó para el registro sísmico de cizalla original y para el registro sísmico de cizalla sintético del mismo pozo. Una vez obtenidos ambos registros se realizó la conversión de tiempo de tránsito a velocidad para cada caso y se graficaron *versus* la profundidad. En la figura N° 23 se puede observar el ajuste de ambas velocidades con un coeficiente de correlación de 0,99 y un error cuadrático medio de 0,0309.

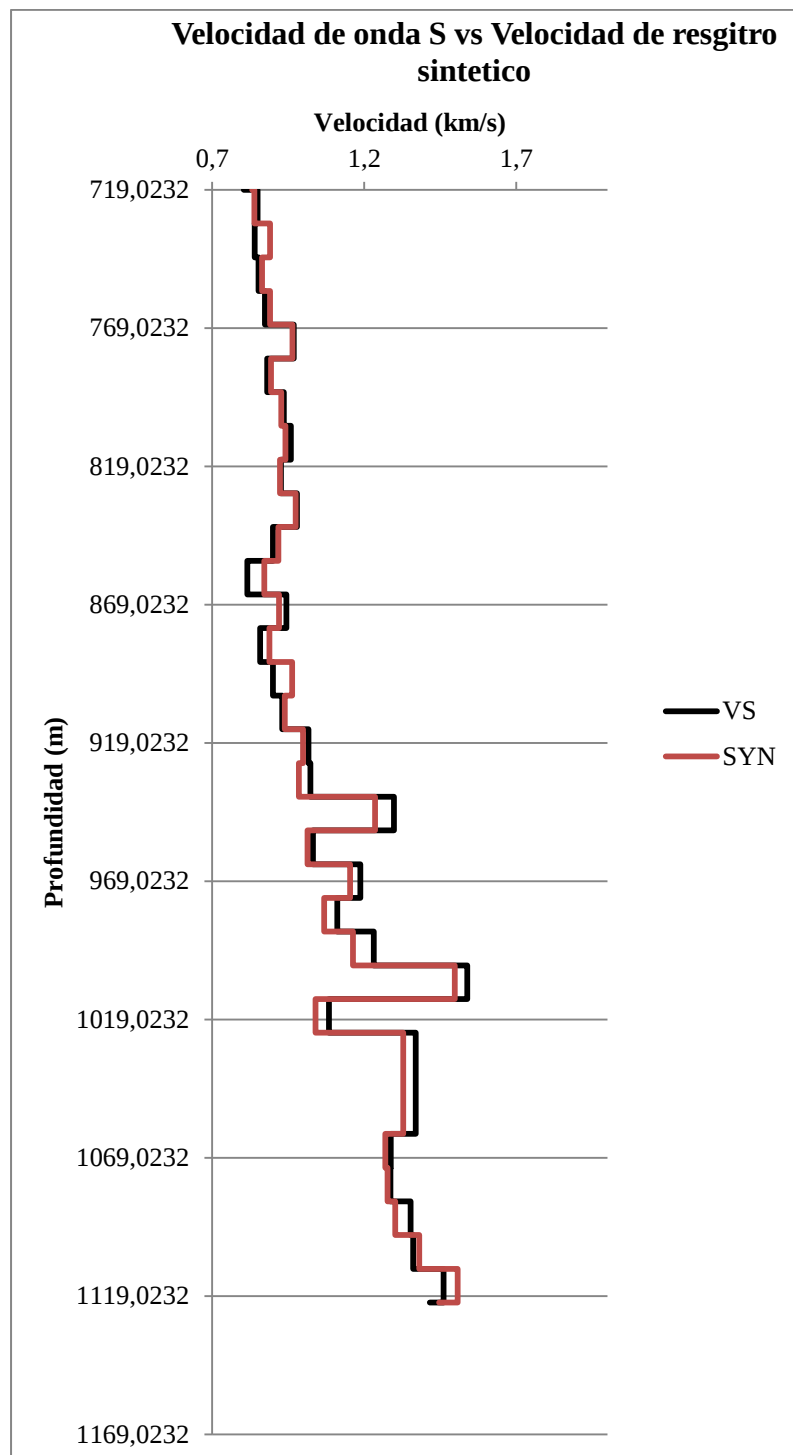


Figura N° 23 Comparación de velocidad de onda S con el registro original (curva negra) y el sintético (curva roja) pozo BZ-25

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES

La compilación, implementación y análisis de métodos establecidos por distintos autores, utilizados en distintos países y empleados en este trabajo de investigación con información de pozos de la Faja Petrolífera del Orinoco y en el Golfo de Venezuela permiten establecer las siguientes conclusiones:

- La implementación de los métodos lineales y no lineales se efectuó a través de la herramienta de lenguaje interpretado de *Matlab*, las relaciones de Greenberg-Castagna, Brocher, Carrol y Castagna se implementaron mediante operaciones matriciales sencillas, mientras que las redes neuronales se entrenaron mediante el *Toolbox* de Redes Neuronales Artificiales de *Matlab* y en el caso del método de algoritmo genético se reestructuró el código propuesto por Haupt y Haupt debido a que el *Toolbox* disponible para este método no permitía la incorporación de tablas en la función objetivo.
- La adaptación de los métodos implementados a plataformas de clastos y carbonatos de campos venezolanos no fue necesaria debido a que los coeficientes predefinidos para las distintas ecuaciones funcionaron para predecir el registro DTS con rangos de error cuadrático medio de 34,76-303,61 con excepción de la ecuación de Carrol cuyos errores estuvieron entre 194,87 y 819,54. En lo concerniente a redes neuronales artificiales y algoritmo genético no fue necesario un proceso de adaptación por ser algoritmos adaptativos.
- Al evaluar estadísticamente la eficiencia de cada uno de los métodos, se dedujo las redes neuronales artificiales son el método eficiente para la generación de registros de cizalla por poseer un promedio de error cuadrático medio de 83,64 de los pozos estudiados, en segundo lugar se encuentra algoritmo genético con un promedio de error cuadrático medio de 92,41, luego la relación de Greenberg-Castagna con 102,64 y a estos le siguen en

orden de eficiencia descendente las relaciones de Brocher con 147,56 , Castagna con 180,54 y en último lugar Carrol con 604,51.

- Como se mencionó anteriormente el mejor criterio para la generación de velocidad de onda de cizalla es el obtenido por el método de redes neuronales artificiales y la arquitectura de la red más idónea a emplearse en los campos de estudio es con todo el set de registros que se dispusieron y con el número predeterminado de neuronas en la capa oculta que tiene el motor (10).
- La relación de Carrol solo es utilizable para campos donde el radio de V_p/V_s esta entre 1,61 y 1,85, en los pozos de la Faja Petrolífera del Orinoco ni en el pozo ZB-1 produjo resultados satisfactorios por su relación V_p/V_s ser mayor al rango establecido. Por otro lado, el pozo ZB-3 posee valores de dicha relación entre 1,14 y 1,99 por lo que la ecuación de Carrol produjo mejores resultados en comparación a los otros pozos con un error cuadrático medio de 44,73.
- La fusión de la ecuación de Greenberg-Castagna y Brocher para arcillas y calizas respectivamente, ofrecen resultados óptimos para este tipo de litologías; se realizó una prueba combinando dichos métodos empíricos en el pozo ZB-1 y se obtuvo un error cuadrático medio de 46,96 el cual es segundo método con menor error dicho pozo (apéndice B.5).
- El registro sísmico dipolar es un registro acústico que en escasas oportunidades se procesa por los considerables costos que esto conlleva, aunque investigaciones similares a esta han desarrollado en distintos países las técnicas implementadas en este trabajo. En Venezuela hasta la fecha no se tienen antecedentes de investigaciones semejantes, cuando es necesaria la información de dichos registros la metodología a seguir es su estimación a partir de otras curvas o tomar dichos registros de pozos de campos vecinos si entre los campos no varía considerablemente la litología. Es por lo antes expuesto y por los resultados presentados que conocer la mejor técnica para la estimación de los registros sísmicos de cizalla es un aporte significativo de

este trabajo de investigación a la industria con las líneas de investigación relacionadas.

RECOMENDACIONES

Al abordar métodos que no poseen antecedentes en campos Venezolanos acerca de la generación de registros sínicos de cizalla surgen algunas recomendaciones para futuros precursores en la misma línea de interés, entre ellas se encuentran:

- Elaborar un análisis estadístico exhaustivo de los datos disponibles.
- Seguir el flujo de trabajo de la presente investigación para la generación de los registros sínicos de cizalla según la técnica que se desee emplear.
- Corroborar que los pozos tienen una cantidad considerable de muestras en el mismo rango de profundidades en caso de aplicar redes neuronales.
- Evaluar el comportamiento del método de algoritmo genético para una población considerable de pozos de yacimientos carbonatados frente a resultados obtenidos por redes neuronales.
- Variar los tipos de selección, cruce y la tasa de mutación a los utilizados en este trabajo con el fin de comparar los resultados obtenidos con los producidos en esta investigación.
- Emplear la técnica de algoritmo genético y contrastar los valores de los coeficientes y las constantes de otros campos con los obtenidos en esta investigación y poder definir así los parámetros de a y b para el establecimiento de una ecuación lineal en campos venezolanos.

BIBLIOGRAFÍA

- Archie, G. E. (1950). Introduction to Petrophysics of Reservoir Rocks. *AAPG Bulletin*, 943-961.
- Banerjee, A., Bakshi, A.(2013). Generation of synthetic shear wave logs for multicomponent seismic interpretation. *10th Biennial International Conference & Exposition*,116.
- Castagna, J. P., Batzle, M. L., y Eastwood, R. L. (1985). Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks. *Geophysics*, 571-581.
- Crain, G. E. (1987). The Log Analysis Handbook. *PenWell Books*, 1-19.
- Curlis, C., Kopper, R., Decoster, E., Guzmán, A., Huggins, C., Knauer, L., y otros. (2002). Yacimientos de petroleo pesado. *Oilfield Review*, 32-55.
- Eskandari, H., Rezaee, M., Javaherian, A., y Mohammadnia, M. (2003). Shear Wave Velocity Estimation Utilizing Wireline Logs for a Carbonate Reservoir, South-West Iran. *Iranian International Journal of Science*, 4 (2), 209-221.
- Glover, P. (2014). The sonic or acoustic log . *Petrophysics MSc Course Notes*.
- González de Juana, C., J. Iturralde, X. Picard (1980). *Geologia de Venezuela y sus cuencas petrolíferas*. Caracas: FONINVES.
- Greenberg, M. J., y Castagna, J. P. (1992). Shear-wave velocity estimation in porous rocks:Theoretical formulation, preliminar and verification and applications. *Geophysical Prospecting*, 195-209.
- Hampson, D., y Russell, B. (2014). *Hampson-Russell Software Services Ltd*. Recuperado en mayo de 2016, de AVO THEORY: www.ipt.ntnu.no
- Hampson, D., y Russell, B. (s.f.). *A case study in the local estimation of shear-wave logs*. Recuperado el mayo de 2016, de www.crewes.org
- Haupt, R. L., y Haupt, S. E. (2004). *Practical Genetic Algorithms*. Nueva Jersey: John Wiley & Sons.
- Horsfall, O., Omubo-Pepple, V., y Tamunobereton-ari, I. (2014). Estimation of Shear Wave Velocity for Lithological Variation in the North-Western Part of the Niger Delta Basin of Nigeria. *American Journal of Scientific and Industrial Research*, 13-22.
- Hudson, M., Hagan, M. y Demuth, H.,(s.f.) *Neuronal Network Toolbox User's Guide*. Matlab. MathWorks.
- Maleki, S., Moradzadeh, A., Riabi, R., Gholami, R., y Farhad Sadeghzadeh. (2014). National Research Institute of Astronomy and Geophysics. *Prediction of shear wave velocity using empirical correlations and artificial intelligence methods*, 70-81.

- Margotta, J. (2010). Análisis tectono estratigráfico del área Caribe Central, Costa Afuera Venezuela. Trabajo de grado de maestría no publicado. Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela. Recuperado de <http://159.90.80.55/tesis/000151164.pdf>.
- Matich, D. (2001). *Redes Neuronales: Conceptos Basicos y Aplicaciones*. Rosario, Argentina.
- Merelo, J. (s.f.). *Informatica evolutiva: Algoritmos genéticos*. Recuperado el 02 de Febrero de 2017
- Padrón, C. (2002). Interpretación estructural en el extremo occidental de la cuenca oriental y costa afuera de Venezuela. Trabajo de grado de maestría no publicado. Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela. Recuperado de <http://saber.ucv.ve:8080/jspui/bitstream/123456789/892/1/tesis.pdf>.
- Parasnis, D. S. (1970). *Principios de geofísica aplicada*. Madrid: Paraninfo.
- Ringo, T. (2012). *Evaluation of shear-wave velocity prediction models at norne field, Norwegian*. Trabajo de grado de maestría no publicado. Universidad de Houston, Houston, EE.UU. Recuperado de https://uh-ir.tdl.org/uhir/bitstream/handle/10657/535/Thesis_Ringo12.pdf?sequence=1&iaAloowed=y.
- Rodriguez, P. T. (s.f.). *Introduccion a los algoritmos geneticos y sus aplicaciones*. Recuperado el 20 de febrero de 2017, de www.uv.es/asepuma/X/J24C.pdf
- Royle, A., y Bezdan, S. (s.f.). Recuperado en mayo de 2016, de www.divestco.com
- Schlumberger. (1983). *Principios/Aplicaciones de la Interpretación de Registros*. Schlumberger Educational Services.
- Schlumberger. (1989). *Cased Hole Log Interpretation Principles / Applications*. Houston Texas: Document N0. SMP-7025.
- Serra, O. (1984). *Fundamentals of well-log interpretation*. New York: ELSEVIER.
- Tabari, K., Orod, T., y Mahsa, T. (2011). A Fast Method For Estimating Shear Wave Velocity By Using Neural Network. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 1429-1434.