

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD SÍSMICA PARA LA  
CONSTRUCCIÓN DE MAPAS LITOLÓGICOS DE RIESGO  
A PARTIR DE REGISTROS DE POZO Y SÍSMICA  
MULTICOMPONENTE**

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela para  
optar al título de Ingeniero Geofísico  
Por el Br. Suniaga Suniaga, José Francisco

Caracas, Noviembre de 2004

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

# **ESTUDIO DE FACTIBILIDAD SÍSMICA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE MAPAS LITOLÓGICOS DE RIESGO A PARTIR DE REGISTROS DE POZO Y SÍSMICA MULTICOMPONENTE**

**Tutor académico:** Prof. Franklin Ruiz

**Tutor industrial:** Ing. Héctor Pineda

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela para  
optar al título de Ingeniero Geofísico  
Por el Br. Suniaga Suniaga, José Francisco

Caracas, Noviembre de 2004

Caracas, 19 de Noviembre de 2004

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Geofísica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Suniaga Suniaga, José Francisco, titulado:

**“Estudio de factibilidad sísmica para la construcción de mapas litológicos de riesgo a partir de registros de pozo y sísmica multicomponente”**

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 el autor, lo declaran APROBADO.

Prof. José Cavada

Jurado

Prof. José Luis Perdomo

Jurado

Prof. Franklin Ruiz

Tutor Académico

Ing. Héctor Pineda

Tutor Industrial

*Hemos aprendido a volar como los pájaros, a nadar como los peces;  
pero no hemos aprendido el sencillo arte de vivir como hermanos.*

*Martin Luther King*

*Dedicado a todo aquel que supera las adversidades  
con la finalidad de ver realizados sus sueños.*

*José Francisco Suniaga Suniaga*

## AGRADECIMIENTOS

*A la Universidad Central de Venezuela por enseñarme el profesionalismo, por enseñarme lo lindo de la educación y por enseñarme a querer y a luchar por lo que es nuestro...*

*A mis padres Amanda y José Francisco, seres espectaculares que lograron encontrar la forma de saber educar en un mundo tan corrompido, sin dejar a un lado la humildad, la honestidad, sencillez y el respeto por los demás...*

*A mis hermanos Nadeska, Nadia y Leonardo, por el día a día y porque sencillamente no me imagino la vida sin ustedes...*

*A mi hija Natasha, porque aun cuando es pequeña para comprender algunas cosas, todo lo que he logrado hasta ahora ha sido por ella y para ella...*

*A mis tíos, especialmente a “Yiya”, Germán, “Negra”, “Chuchú”, Armando, Lisbeth, Vicente, Blanca, Goyo, “Kike”, Alida, Hilario, Petra, Juana, “Liopa” y a mis primos, especialmente a Jesús, “El Negro”, Adriana, Alejandra, Patricia, Germania, “Gaby”, Keila, por enseñarme el concepto de familia y por ser tan especiales...*

*A mis amigos de toda la vida Karla Salas, Sergio Jiménez y José Ron por su amistad y por portarse siempre a la altura...*

*A mis amigos de la universidad, Alexander Díaz, Felixavier Mendoza, Pedro Camacho, Luis Moros, Laura Torres, Hernando Aponte, Francisco Moreno, Rafael Azuaje, Enrique Figueroa, Daniel Romero, Alberto Rodríguez, José Ortega, Susana Carrasco, Leonardo Morgado, Rafael y Harold Castillo, Emgelberth Vargas, Jozsef*

*Hetch, Roberto Alvarez y Pedro Gallardo por compartir tan gratos momentos con todos ustedes, dentro y fuera de los salones de clase...*

*A la Familia Pérez Mendoza, especialmente a Maxlyn por todas las atenciones que han tenido conmigo y sobre todo por la paciencia...*

*A Carla Castillo y a Teresa Mujica por recibirme en su casa de la manera que lo hicieron, las quiero mucho...*

*A la Familia Cragno Magnani, especialmente a Analia, por toda su ayuda y por todos los momentos compartidos...*

*A las Familias Camacho Dugarte y Moreno Figuera por soportar mi presencia durante todo este tiempo...*

*A Teresa Camacho, Luis Camacho y Ramón González por ser todos tan “buena gente”, creo que nunca me voy a aburrir de ir a White Tucker...*

*A mis compañeros tesistas de Intevep, ahora ingenieros, Gabriela Zambrano, Joanny Gutiérrez, Kerly Sánchez, Raúl Cova y Martha Martínez por su valiosa ayuda y por los buenos momentos que compartimos por allá...*

*A Ana Cordova y a Yeissy Sánchez, no saben lo complacido que estoy de haber conocido a personas tan especiales como ustedes, tan atentas y tan serviciales, de verdad muchas gracias por tan lindos momentos...*

*A Andrey Ortega, Ricardo Plata y Jhonny Calderon por su valiosa colaboración...*

*A Humberto Sánchez, Luisa Figueroa y Gustavo Malavé por la oportunidad que me dieron...*

*A los panas Bryson y Tatiana, me hubiese gustado que llegaran antes a la oficina ...*

*Al Departamento de Geofísica por los gratos y amargos momentos que pase en sus salones de clase...*

*A todos los profesores de la facultad por su enseñanza, especialmente a Franklin Ruíz, Miguel Bosch, Michael Schmitz, José Sanz, Orlando Méndez e Inírida Rodríguez...*

*Es bastante difícil recordar a todas las personas que me han ayudado durante todo este tiempo, de verdad si se me olvidó alguien espero me disculpe, gracias de todas formas...*

## ÍNDICE GENERAL

CONSTANCIA DE APROBACIÓN

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

	pp.
LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABLAS	vii
RESUMEN	viii
CAPÍTULO	
I    INTRODUCCIÓN	1
Ubicación del área de estudio	2
Planteamiento del problema	3
Justificación	4
Objetivo General	4
Objetivos Específicos	4
II   MARCO GEOLÓGICO	6
Geología Regional	7
Generalidades	7
Sistemas Petroleros	7
Evolución Tectónica Regional	9
Evolución Estructural Local	15
Geología Local	18
Formación Pagüey	18
Formación Gobernador	19
Formación Burgüita	20

	Formación Navay	21
	Formación Escandalosa	23
	Miembro Guayacán (Caliza “O”)	23
III	MARCO TEÓRICO	26
	Sísmica Multicomponente	26
	Registros de Pozo	30
	Registro Gamma Ray	30
	Registro Sónico	31
	Registro de Densidad	32
	Simulación de Monte Carlo	33
	Estadística	34
	Funciones de Probabilidad	34
	Funciones continuas de probabilidad	35
	Incertidumbre y Teoría de Información	37
	Funciones de densidad de probabilidad ( <i>pdfs</i> )	38
	Modelos Determinísticos	39
	Modelos Probabilísticos	40
	Teoría de Decisión de Bayes	40
	Error de Estimación de Bayes	41
	Teoría de Información	43
	Entropía de Información de Shannon	44
	Relación de Pickett (1963) y Castagna <i>et al.</i> (1985)	45
IV	METODOLOGÍA	47
	Edición de los registros de pozo	47
	Interpretación de las secciones sísmicas	50
	Control de calidad de los datos	52
	Correlación de la relación $V_p/V_s$ extraída de los registros de pozo con la obtenida del levantamiento sísmico	54
	Simulación de Monte Carlo	54

	Cálculo de Incertidumbre y Entropía de Información de Shannon	56
	Construcción de los mapas de riesgo	56
V	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	58
	Interpretación de las secciones sísmicas	58
	Control de calidad de los datos	59
	Correlación de la relación $V_p/V_s$ extraída de los registros de pozo con la obtenida del levantamiento sísmico	70
	Simulación de Monte Carlo	72
	Cálculo de Incertidumbre y Entropía de Información de Shannon	79
	Construcción de los mapas de riesgo	83
VI	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	92
VII	BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS CITADAS	96
VIII	APÉNDICES	101
	Apéndice A. Registros de pozo tomados para el estudio	101
	Apéndice B. Transectos y correlación $V_p/V_s$ vs $V_{sh}$ y $V_p/V_s$ vs Porosidad	109
	Apéndice C. Rectas de ajuste, velocidades simuladas e histogramas de frecuencia	113
	Apéndice D. Tablas de media y desviación estándar para $V_s$ y $V_p/V_s$	141
	Apéndice E. Distribuciones Bivariadas $V_p/V_s$ vs $V_s$	142

## LISTA DE FIGURAS

Figura N°	pp.
1. Ubicación del área de estudio	3
2. Mapa de Venezuela con sus cuencas petrolíferas	6
3. Columna estratigráfica del occidente de Venezuela	8
4. Sección NO-SE de la Cuenca Barinas-Apure	9
5. Marco estructural del Flanco Surandino-Barinas Norte	16
6. Columna generalizada del área de Barinas Tradicional desde el Cretácico hasta el Plioceno	25
7. Movimiento de las partículas para ondas P, SV y SH	27
8. Modelo asumido para obtener a partir de los tiempos de viaje de las ondas PP y PS el valor de la relación $V_p/V_s$	29
9. Funciones de densidad de probabilidad ( <i>pdfs</i> ) de porosidad en los yacimientos A y B	38
10. Funciones de densidad de probabilidad ( <i>pdfs</i> ) de $V_p$ para una arena saturada de agua y una saturada de petróleo obtenida con la ecuación de Gassmann	39
11. <i>Pdfs</i> de $V_p$ para una arena saturada de agua y una saturada de petróleo	42
12. Relaciones obtenidas por Pickett (1963), para dolomitas calizas y areniscas	46
13. “Castagna’s mud rock line”	46
14. Registro Gamma Ray antes y después de editar del pozo A	48
15. Registro sísmico de onda S corregido y suavizado del pozo E	49
16. Sismograma sintético y la calibración con la información sísmica	50
17. Espectro de amplitud extraído de los datos sísmicos	51
18. Ubicación de los pozos seleccionados y sus trayectorias	53
19. <i>Pdfs</i> antes y después de la simulación para valores de $V_p/V_s$ pertenecientes a la Caliza “O” en el pozo G	56
20. Topes de las formaciones Gobernador y Escandalosa interpretados, marcadores y correlación entre los eventos de ambas secciones	58
21. Gráfico de Pickett. Formación Gobernador	59
22. Gráfico de Pickett. Caliza “O” (Fm. Escandalosa)	60
23. Gráfico de Pickett. Arenas P1, P2 y R1 (Fm. Escandalosa)	60
24. Valores de $V_p$ y $V_s$ para todos los intervalos seleccionados en el pozo A junto con la relación obtenida por Castagna <i>et al.</i> (1985)	62
25. Valores de $V_p$ y $V_s$ para todos los intervalos seleccionados en el pozo B junto con la relación obtenida por Castagna <i>et al.</i> (1985)	63
26. Valores de $V_p$ y $V_s$ para todos los intervalos seleccionados en el pozo C junto con la relación obtenida por Castagna <i>et al.</i> (1985)	63

Figura N°	pp.
27. Valores de Vp y Vs para todos los intervalos seleccionados en el pozo D junto con la relación obtenida por Castagna <i>et al.</i> (1985)	64
28. Valores de Vp y Vs para el intervalo seleccionado en el pozo Y junto con la relación obtenida por Castagna <i>et al.</i> (1985)	64
29. Valores de Vp y Vs para todos los intervalos seleccionados en el pozo E junto con la relación obtenida por Castagna <i>et al.</i> (1985)	65
30. Valores de Vp y Vs para todos los intervalos seleccionados en el pozo F junto con la relación obtenida por Castagna <i>et al.</i> (1985)	65
31. Valores de Vp y Vs para todos los intervalos seleccionados en el pozo G junto con la relación obtenida por Castagna <i>et al.</i> (1985)	66
32. Gráfico Vp/Vs del levantamiento sísmico vs Vp/Vs de los registros de pozo para la Fm. Gobernador	71
33. Gráfico Vp/Vs del levantamiento sísmico vs Vp/Vs de los registros de pozo para la Fm. Escandalosa	72
34. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Fm. Gobernador (Pozo B)	73
35. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Fm. Gobernador (Pozo B)	73
36. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Fm. Gobernador (Pozo B)	73
37. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Fm. Navay (Pozo E)	74
38. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Fm. Navay (Pozo E)	74
39. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Fm. Navay (Pozo E)	74
40. Pdfs de Vp/Vs (Pozo A)	76
41. Pdfs de Vp/Vs (Pozo B)	76
42. Pdfs de Vp/Vs (Pozo C)	77
43. Pdfs de Vp/Vs (Pozo D)	77
44. Pdfs de Vp/Vs (Pozo E)	78
45. Pdfs de Vp/Vs (Pozo F)	78
46. Pdfs de Vp/Vs (Pozo G)	79
47. Mapa de Isoprobabilidades (p(arena arena)). Tope de la Formación Gobernador	84
48. Mapa de Isoprobabilidades (p(caliza caliza)). Tope de la Caliza “O”	84
49. Mapa de Isoprobabilidades (p(arena arena)). Tope de la Arena “P1”	85
50. Mapa de Entropía de Información de Shannon. Tope de la Formación Gobernador	85
51. Mapa de Entropía de Información de Shannon. Tope de la Caliza “O”	86
52. Mapa de Entropía de Información de Shannon. Tope de la Arena “P1”	86
53. Mapa de la relación Vp/Vs extraída de los datos sísmicos. Fm. Gobernador	88
54. Mapa de la relación Vp/Vs extraída de los datos sísmicos. Fm. Escandalosa	90

Figura N°	pp.
55. Registros petrofísicos del pozo A	101
56. Registros petrofísicos del pozo B	102
57. Registros petrofísicos del pozo C	103
58. Registros petrofísicos del pozo D	104
59. Registros petrofísicos del pozo E	105
60. Registros petrofísicos del pozo F	106
61. Registros petrofísicos del pozo G (Hasta 11650 pies)	107
62. Continuación de los registros petrofísicos del pozo G	108
63. Transecto N-S (Fm. Gobernador)	109
64. Transecto N45°E (Fm. Gobernador)	109
65. Transecto N-S (Fm. Escandalosa)	110
66. Transecto N45°E (Fm. Escandalosa)	110
67. Vp/Vs obtenido de la sismica vs Vsh (Fm. Gobernador)	111
68. Vp/Vs obtenido de la sismica vs Vsh (Fm. Escandalosa)	111
69. Vp/Vs obtenido de la sismica vs Porosidad (Fm. Gobernador)	112
70. Vp/Vs obtenido de la sismica vs Porosidad (Fm. Escandalosa)	112
71. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Fm. Gobernador (Pozo A)	113
72. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Fm. Gobernador (Pozo A)	113
73. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Fm. Gobernador (Pozo A)	113
74. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Fm. Gobernador (Pozo B)	114
75. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Fm. Gobernador (Pozo B)	114
76. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Fm. Gobernador (Pozo B)	114
77. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Fm. Gobernador (Pozo C)	115
78. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Fm. Gobernador (Pozo C)	115
79. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Fm. Gobernador (Pozo C)	115
80. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Fm. Gobernador (Pozo D)	116
81. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Fm. Gobernador (Pozo D)	116
82. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Fm. Gobernador (Pozo D)	116
83. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Fm. Gobernador (Pozo E)	117
84. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Fm. Gobernador (Pozo E)	117
85. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Fm. Gobernador (Pozo E)	117
86. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Fm. Gobernador (Pozo F)	118

Figura N°	pp.
87. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Fm. Gobernador (Pozo F)	118
88. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Fm. Gobernador (Pozo F)	118
89. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Fm. Gobernador (Pozo G)	119
90. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Fm. Gobernador (Pozo G)	119
91. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Fm. Gobernador (Pozo G)	119
92. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Fm. Navay (Pozo A)	120
93. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Fm. Navay (Pozo A)	120
94. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Fm. Navay (Pozo A)	120
95. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Fm. Navay (Pozo B)	121
96. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Fm. Navay (Pozo B)	121
97. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Fm. Navay (Pozo B)	121
98. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Fm. Navay (Pozo C)	122
99. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Fm. Navay (Pozo C)	122
100. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Fm. Navay (Pozo C)	122
101. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Fm. Navay (Pozo D)	123
102. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Fm. Navay (Pozo D)	123
103. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Fm. Navay (Pozo D)	123
104. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Fm. Navay (Pozo E)	124
105. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Fm. Navay (Pozo E)	124
106. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Fm. Navay (Pozo E)	124
107. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Fm. Navay (Pozo F)	125
108. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Fm. Navay (Pozo F)	125
109. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Fm. Navay (Pozo F)	125
110. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Fm. Navay (Pozo G)	126
111. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Fm. Navay (Pozo G)	126

Figura N°	pp.
112. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Fm. Navay (Pozo G)	126
113. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Caliza “O” (Pozo A)	127
114. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Caliza “O” (Pozo A)	127
115. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Caliza “O” (Pozo A)	127
116. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Caliza “O” (Pozo B)	128
117. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Caliza “O” (Pozo B)	128
118. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Caliza “O” (Pozo B)	128
119. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Caliza “O” (Pozo C)	129
120. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Caliza “O” (Pozo C)	129
121. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Caliza “O” (Pozo C)	129
122. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Caliza “O” (Pozo D)	130
123. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Caliza “O” (Pozo D)	130
124. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Caliza “O” (Pozo D)	130
125. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Caliza “O” (Pozo E)	131
126. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Caliza “O” (Pozo E)	131
127. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Caliza “O” (Pozo E)	131
128. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Caliza “O” (Pozo F)	132
129. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Caliza “O” (Pozo F)	132
130. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Caliza “O” (Pozo F)	132
131. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Caliza “O” (Pozo G)	133
132. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Caliza “O” (Pozo G)	133
133. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Caliza “O” (Pozo G)	133
134. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Arena “P1” (Pozo A)	134
135. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Arena “P1” (Pozo A)	134
136. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Arena “P1” (Pozo A)	134
137. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Arena “P1” (Pozo B)	135

Figura N°	pp.
138. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Arena “P1” (Pozo B)	135
139. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Arena “P1” (Pozo B)	135
140. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Arena “P1” (Pozo C)	136
141. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Arena “P1” (Pozo C)	136
142. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Arena “P1” (Pozo C)	136
143. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Arena “P1” (Pozo D)	137
144. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Arena “P1” (Pozo D)	137
145. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Arena “P1” (Pozo D)	137
146. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Arena “P1” (Pozo E)	138
147. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Arena “P1” (Pozo E)	138
148. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Arena “P1” (Pozo E)	138
149. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Arena “P1” (Pozo F)	139
150. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Arena “P1” (Pozo F)	139
151. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Arena “P1” (Pozo F)	139
152. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Arena “P1” (Pozo G)	140
153. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Arena “P1” (Pozo G)	140
154. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Arena “P1” (Pozo G)	140
155. Distribución Bivariada Vp/Vs vs Vp (Pozo A)	142
156. Distribución Bivariada Vp/Vs vs Vp (Pozo B)	142
157. Distribución Bivariada Vp/Vs vs Vp (Pozo C)	143
158. Distribución Bivariada Vp/Vs vs Vp (Pozo D)	143
159. Distribución Bivariada Vp/Vs vs Vp (Pozo E)	144
160. Distribución Bivariada Vp/Vs vs Vp (Pozo F)	144
161. Distribución Bivariada Vp/Vs vs Vp (Pozo G)	145

## LISTA DE TABLAS

Tabla N°	pp.
1. Probabilidades de las predicciones correctas y falsas estimadas a partir de las <i>pdfs</i> , $p(V_p, \text{Fluido})$	43
2. Intervalos escogidos para cada uno de los pozos	52
3. Rangos teóricos de $V_p/V_s$ para distintas rocas sedimentarias	69
4. Rangos de $V_p$ , $V_s$ y $V_p/V_s$ obtenidos para los diferentes intervalos	69
5. Matriz de confusión de Bayes en la discriminación litológica empleando las arenas de Gobernador. Pozo A	80
6. Matriz de confusión de Bayes en la discriminación litológica empleando las arenas de Gobernador. Pozo B	80
7. Matriz de confusión de Bayes en la discriminación litológica empleando las arenas de Gobernador. Pozo C	80
8. Matriz de confusión de Bayes en la discriminación litológica empleando las arenas de Gobernador. Pozo D	81
9. Matriz de confusión de Bayes en la discriminación litológica empleando las arenas de Gobernador. Pozo E	81
10. Matriz de confusión de Bayes en la discriminación litológica empleando las arenas de Gobernador. Pozo F	81
11. Matriz de confusión de Bayes en la discriminación litológica empleando las arenas de Gobernador. Pozo G	81
12. Matriz de confusión de Bayes en la discriminación litológica empleando la Arena "P1". Pozo A	82
13. Matriz de confusión de Bayes en la discriminación litológica empleando la Arena "P1". Pozo B	82
14. Matriz de confusión de Bayes en la discriminación litológica empleando la Arena "P1". Pozo C	82
15. Matriz de confusión de Bayes en la discriminación litológica empleando la Arena "P1". Pozo D	82
16. Matriz de confusión de Bayes en la discriminación litológica empleando la Arena "P1". Pozo E	83
17. Matriz de confusión de Bayes en la discriminación litológica empleando la Arena "P1". Pozo F	83
18. Matriz de confusión de Bayes en la discriminación litológica empleando la Arena "P1". Pozo G	83
19. Resumen con los valores a partir de los cuales se generaron los valores aleatorios de $V_s$	141
20. Resumen con los valores promedio y de desviación estándar de los $V_p/V_s$ obtenidos de la simulación	141

Suniaga S., José F.

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD SÍSMICA PARA LA  
CONSTRUCCIÓN DE MAPAS LITOLÓGICOS DE RIESGO  
A PARTIR DE REGISTROS DE POZO Y SÍSMICA  
MULTICOMPONENTE**

**Tutor Académico: Prof. Franklin Ruiz. Tutor Industrial: Ing. Héctor Pineda.  
Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Geología,  
Minas y Geofísica. 2004, 145 p.**

**Palabras Claves:**

Registros de pozo, Relación Vp/Vs, Sísmica Multicomponente, *pdfs*, Incertidumbre.

Todas las etapas en la exploración geofísica que involucren la estimación de propiedades físicas en el subsuelo, están asociadas a errores y a una inherente incertidumbre, de aquí surge la necesidad de emplear técnicas y metodologías que involucren análisis de riesgo, en este caso en particular, el riesgo que se deriva en la predicción de litologías, empleando como propiedad física la relación Vp/Vs, de igual forma surge la necesidad de combinar la información de los registros de pozo con la información sísmica para generar mapas de riesgo que contengan las características mas resaltantes de cada uno de estos.

El análisis de factibilidad consiste en aplicar técnicas estadísticas, probabilísticas y de teoría de información que permiten cuantificar de manera confiable la incertidumbre derivada de la estimación de las propiedades del subsuelo. Para ello, en este trabajo se emplea la relación Vp/Vs como posible discriminador de litologías, empleando para ello registros de pozo e información sísmica multicomponente en un campo petrolero del Estado Barinas.

En el mismo se muestra como las funciones de densidad de probabilidad (*pdfs*) obtenidas de los registros de pozo, son el punto de partida en la cuantificación de la incertidumbre, las técnicas involucradas en el proceso de cuantificación incluyen simulación de Monte Carlo, teoría de decisión Bayesiana y entropía de información de Shannon.

Los mapas de riesgo generados a partir de los registros de pozo y elaborados mediante el uso de la geoestadística muestran como se distribuyen espacialmente los valores de probabilidad asociados a la identificación de litologías, denotando zonas que podrían ser de interés prospectivo, pero a su vez muestran la necesidad de incluir mayor número de pozos, con la finalidad de extender mas el área de estudio.

## CAPÍTULO I

### INTRODUCCIÓN

“Numerosas técnicas de interpretación han emergido para construir mapas de la variabilidad espacial de las rocas y los fluidos. Estas técnicas incluyen estimados de litología, porosidad y saturación, hechas a partir de la geología, registros y datos sísmicos. Muchas de estas técnicas emplean poderosas técnicas estadísticas multivariadas” (Mukerji *et al.*, 1998).

“Algunos de los métodos usados en la caracterización sísmica de yacimientos son puramente estadísticos, basados en técnicas multivariadas. Otros son determinísticos, basados en modelos físicos (teóricos o de laboratorio)” (Mukerji *et al.*, 2002).

Partiendo de estas premisas se puede considerar el enfoque estadístico y probabilístico aplicado a los datos sísmicos que está siendo usado desde hace algunos años en la exploración geofísica, de manera general, los registros de pozo proporcionan una buena resolución vertical y corresponden a la medida más directa de una formación que se puede llevar a cabo en la prospección geofísica, es por esto que en muchos casos se hace necesario evaluar la factibilidad en la identificación tanto de litologías como contenidos de fluidos obtenidos de dichos registros. Los métodos estadísticos de discriminación, como por ejemplo, el criterio de decisión de Bayes, permite no sólo cuantificar la incertidumbre a la hora de llevar a cabo la identificación, sino también minimizar el error asociado a la interpretación.

Lamentablemente la continuidad lateral que se deriva de los registros de pozo es muy pobre, por lo que una manera mas provechosa de extender el estudio de factibilidad llevado a cabo a partir de los registros es emplear la continuidad lateral de los estratos que proporcionan los levantamientos sísmicos, de aquí que se busque la forma de correlacionar la información de los registros de pozo con la información de los levantamientos sísmicos para optimizar la interpretación sísmica.

El aspecto de mayor importancia en este trabajo es cuantificar la incertidumbre que se deriva de la identificación litológica; para esto se empleará la

relación  $V_p/V_s$  como indicador de litologías, obtenida tanto de los registros de pozo como del levantamiento sísmico, se llevará a cabo un estudio de factibilidad sísmica empleando métodos estadísticos y probabilísticos (simulación de Monte Carlo, estimación de las funciones de densidad de probabilidad, error de Bayes, Entropía de Información de Shannon) para finalmente obtener los mapas de riesgo en la identificación litológica.

### **Ubicación del área de estudio**

El proyecto se desarrolló en un sector al suroeste de la ciudad de Barinas, Estado Barinas. El área del proyecto sísmico está en un campo petrolero (Figura 1), en el Estado Barinas con una extensión de 25 Km<sup>2</sup>. Esta es un área de topografía plana, cuyo suelo es predominantemente arcilloso con intercalaciones de arena fina.

Fisiográficamente, el área está conformada por pequeñas penillanuras, con vegetación baja en la parte Noreste y vegetación montañosa en la parte noroeste y gran cantidad de ríos y caños que lo atraviesan de norte a sur. Por su topografía baja, ésta sufre de inundaciones continuas, cuyas aguas percolan muy rápidamente por la alta permeabilidad de estos suelos.

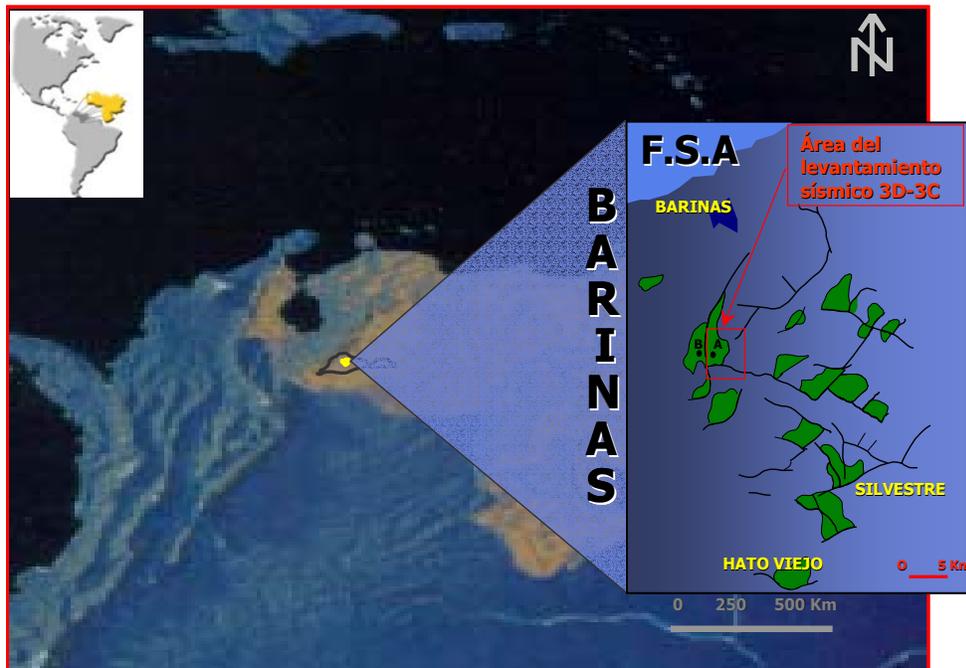


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

### Planteamiento del problema

De este campo se contó con 12 pozos que lamentablemente no se encuentran distribuidos de manera uniforme dentro del área del levantamiento sísmico 3D. De estos pozos sólo 6 cuentan con registro sísmico dipolar, registro empleado en este estudio para la cuantificación de la incertidumbre; esta limitación reduce la efectividad en la estimación de las propiedades físicas del campo y en el posterior estudio de factibilidad.

La incertidumbre que se deriva de la identificación litológica mediante el empleo de los registros de pozo es un problema que se pretende atacar mediante el empleo de técnicas estadísticas multivariadas, con la finalidad de poder estimar dicha incertidumbre y así reducir la ambigüedad en la interpretación.

## **Justificación**

El estudio de factibilidad es una herramienta que está siendo ampliamente usada en muchos campos de la investigación. La prospección geofísica no está exenta de ello, este tipo de estudios permite, en la mayoría de los casos, minimizar el riesgo en la localización de los nuevos prospectos y permite también reducir la incertidumbre en la caracterización de los yacimientos, de manera de garantizar un mayor éxito tanto en la exploración como en la producción de hidrocarburos.

En el campo en estudio se hace necesario un análisis estadístico y probabilístico que proporcione, mediante la elaboración de mapas de riesgo de los topes de las formaciones de interés, una idea de la incertidumbre que se presenta a la hora de discriminar litologías mediante el uso de la relación  $V_p/V_s$ , de igual forma se hace necesario establecer si existe alguna correlación entre los registros de pozo y el levantamiento sísmico, para extrapolar el estudio de factibilidad realizado con los pozos por medio del levantamiento sísmico.

## **Objetivo General**

- Construir mapas de riesgo en la identificación litológica basados en teoría estadística y probabilística utilizando para ello registros de pozo y sísmica multicomponente en un campo petrolero en el Estado Barinas.

## **Objetivos Específicos**

- Determinar la correlación de la relación  $V_p/V_s$  obtenida de los registros de pozo con la relación  $V_p/V_s$  obtenida del levantamiento sísmico multicomponente llevado a cabo en la zona de estudio.
- Calcular el valor de incertidumbre en la predicción de litologías a partir de la información de los registros de pozo.

- Generar los mapas de riesgo en función de la relación  $V_p/V_s$  mediante el uso de la geoestadística.

## CAPÍTULO II

### MARCO GEOLÓGICO

La Cuenca de Barinas-Apure, la tercera de Venezuela por su volumen de recursos petrolíferos, es una depresión estructural situada en la región suroccidental del país (Figura 2). En lo que a recursos petrolíferos se conoce, está limitada al noroeste por los contrafuertes de la cadena de los Andes venezolanos; al norte por la prolongación occidental de la Serranía del Interior Central y al este y noreste por el levantamiento de El Baúl; al sur está separada de la cuenca de los llanos colombianos por un alto gravimétrico situado entre los ríos Apure y Arauca, según Hospers y Van Wijnen (1959) (González de Juana *et al.*, 1980).

La Cuenca de Barinas-Apure incluye dos subcuencas menores que Feo Codecido (1972) ha denominado Barinas, la cual ocupa las mayores extensiones en los estados Barinas y Apure, y Uribante sobre parte de Apure occidental, separadas entre sí, por el Arco de Santa Bárbara, que en la cuenca constituye una extensión del Macizo de Colorado (González de Juana *et al.*, 1980).

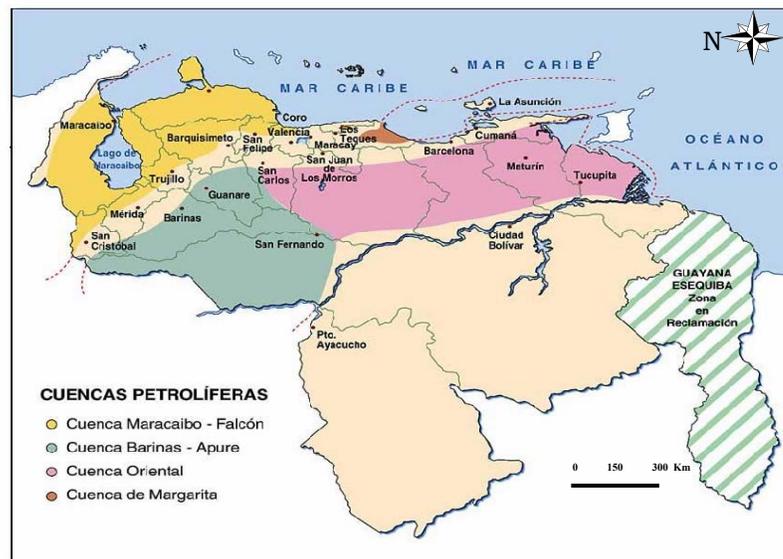


Figura 2. Mapa de Venezuela con sus cuencas petrolíferas. (Tomado de [www.a-venezuela.com](http://www.a-venezuela.com)).

## **Geología Regional**

### **Generalidades**

La roca madre por excelencia es la Formación Navay, de edad Cretácico Tardío, cuyas facies son equivalentes laterales a las de la Formación La Luna. Se han encontrado rocas madre de importancia secundaria en el Grupo Orocué (Formación Los Cuervos), pero éstas sólo habrían generado en los depocentros más profundos, asociados con la acumulación de grandes espesores de molasa por el levantamiento andino. Las principales rocas yacimientos clásticas son las Formaciones Escandalosa, Burgüita (Cretácico), Grupo Orocué (Paleoceno), Mirador-Guafita (Miembro Arauca) (Eoceno-Oligoceno) (Figura 3).

El yacimiento carbonático más relevante lo constituyen las calizas con porosidad secundaria del Miembro Guayacán (Caliza “O”) de la Formación Escandalosa. Los sellos regionales más importantes son los intervalos lutíticos de las Formaciones Burgüita (Cretácico Tardío), Pagüey (Eoceno) y Guafita (Miembro Guardulio), (Figura 4). La mayoría de los campos petroleros se encuentra al sur de la ciudad de Barinas, como San Silvestre, Sinco y en este caso, el campo objeto de este estudio, Borburata. La Victoria y Guafita están ubicados cerca de la frontera con Colombia.

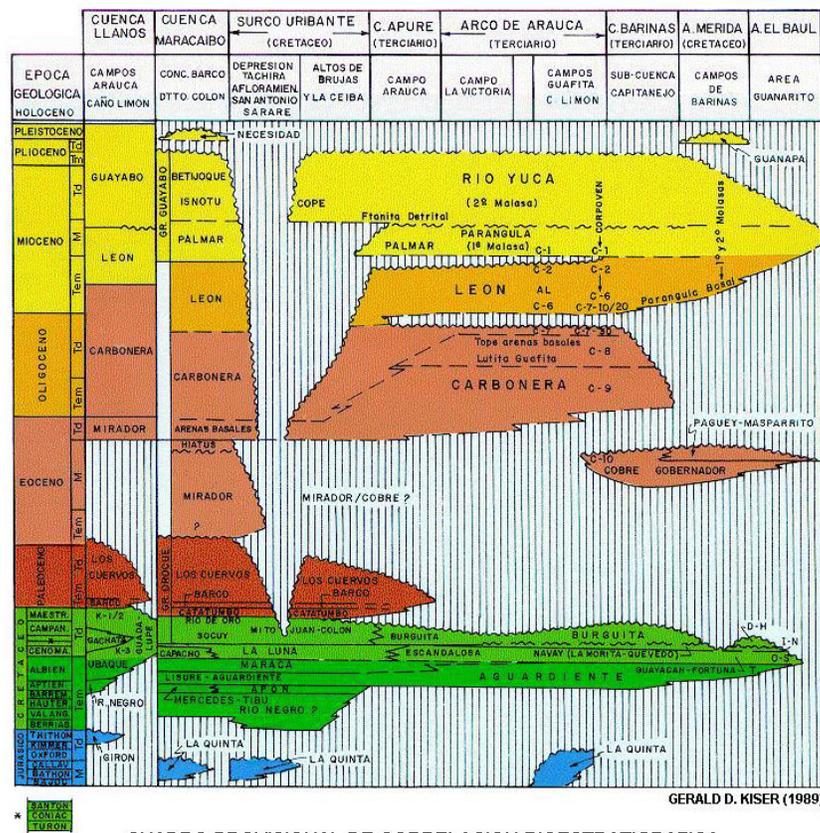
La gravedad de los crudos ha sido registrada entre 22 y 28°API en los campos del Estado Barinas, mientras que en los campos de Guafita y La Victoria, Estado Apure, se han encontrado crudos entre 30 y 36°API.

### **Sistemas petroleros**

Se han identificado dos eventos para la generación, migración y entrapamiento. El primero se relaciona con el sistema La Luna-Burgüita debido a la generación de petróleo en la Cuenca de Maracaibo y su migración al sur-sureste. En este caso, el sello lo constituyen unidades cretácicas: el superior, la lutita basal de la

Formación Burgüita, y el inferior, las lutitas del Miembro La Morita (Formación Navay).

El yacimiento principal estaría constituido por unidades cretácicas, como las Formaciones Aguardiente, Escandalosa (la Caliza “O” o Miembro Guayacán) y las arenas basales de la Formación Burgüita. El segundo evento se relaciona con el depocentro del flanco surandino, el cual tiene su momento crítico hoy en día. La roca madre sigue siendo cretácica y el yacimiento llega a incluir unidades eocenas como las Formaciones Gobernador y Pagüey, siendo el Miembro Guardulio de la Formación Guafita el sello Oligoceno de mayor importancia regional. En este segundo evento, pudo haber habido re-migración de crudos entrampados durante el pulso Eoceno del sistema La Luna-Burgüita.



CUADRO PROVISIONAL DE CORRELACION BIOESTRATIGRAFICA

Figura 3. Columna estratigráfica del occidente de Venezuela. (Tomado del código estratigráfico de las cuencas de Venezuela).

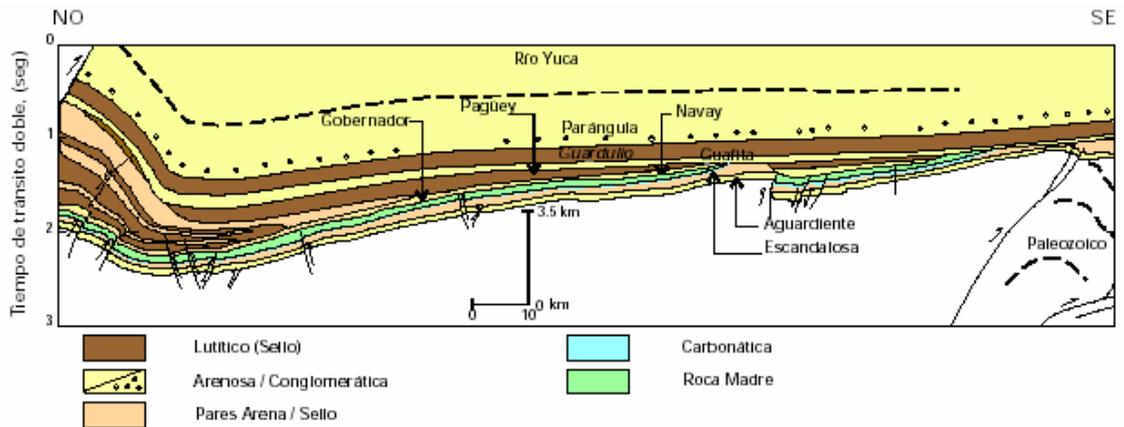


Figura 4. Sección NO-SE de la Cuenca Barinas-Apure. (Tomado de WEC 1997).

### Evolución tectónica regional

Muchos autores han planteado distintas teorías acerca de la evolución tectónica del Caribe. De la misma manera se han planteado diversos trabajos específicos de la evolución tectónica del norte de Suramérica. Sin embargo, todos los modelos tectónicos del norte de Venezuela coinciden con la rotura o “rifting” del continente durante el Jurásico y la formación de estructuras importantes que posteriormente influyeron en la evolución de las cuencas venezolanas.

A partir de los episodios distensivos del Jurásico, las cuencas del occidente de Venezuela estuvieron enmarcadas dentro de un contexto geodinámico activo, acentuándose durante el Mesozoico Tardío-Cenozoico. La evolución geodinámica de la región es producto de la interacción entre las placas litosféricas mayores del Pacífico, Caribe y Suramericana, y de una microplaca al oeste de la Falla de Boconó, dentro de la cual se ubica el Lago de Maracaibo (De Toni *et al.*, 1991).

### Compresión paleozoica

En la Cuenca de Barinas-Apure el Paleozoico se evidencia como un sistema de pliegues y cabalgamientos transportados hacia el sur-sureste, Estas estructuras, que

son típicas de frentes de deformación, se encuentran erosionadas y selladas por debajo de secuencias cretácicas. Aunque ningún pozo ha penetrado estas unidades para así permitir su datación, éstas se encuentran recubiertas por una secuencia transgresiva cretácica, lo que implica con claridad que fueron deformadas por un evento tectónico pre-Jurásico (De Toni, *et al.*, 1991).

Yoris *et al.* (1996) señalan que durante este periodo se reconoce una fase compresiva asociada a la acreción de terrenos al continente Gondwana. Esta fase se evidencia por una serie de cinturones orogénicos emplazados que fueron suturados secuencialmente a la cuenca autóctona del Paleozoico Inferior, durante el Ordovícico-Silúrico, Carbonífero y a finales del Mesozoico hasta el presente. Estos terrenos constituyen en gran parte el basamento de la Cuenca Barinas-Apure.

### **Apertura jurásica (rifting entre Norte y Suramérica)**

La representación de este periodo esta dada por la ruptura de Pangea, la cual trajo como consecuencia la generación de valles de extensión o “half grabens” con orientación noreste rellenos sintectónicamente por las formaciones La Quinta y Río Negro. Ostos (1992) plantea que durante este evento la separación entre la placa suramericana y los bloques Chortis, Oaxaca y Yucatán está relacionada a la apertura del Golfo de México o Proto-Caribe.

De Toni *et al.* (1991) sugiere que gran parte de las estructuras jurásicas se originaron a partir de la reactivación de cabalgamientos paleozoicos en forma de despegues extensionales. Las direcciones de las alineaciones distensivas jurásicas van a influir ampliamente en las deformaciones posteriores, estas alineaciones representan estructuras de dirección NNE-SSO que fueron reactivadas por transgresión, transtensión e inversión.

La extensión jurásica induce un adelgazamiento de la corteza continental en el borde de la placa suramericana, el cual es todavía visible al comparar los espesores de la corteza entre las cuencas de Maracaibo y Barinas-Apure (Ramírez, 2000).

González de Juana *et al.* (1980) reconocen la existencia de un margen pasivo tipo Atlántico durante el Cretácico al norte de Suramérica y señalan la existencia del Arco de Mérida, el cual, constituía predominantemente una zona positiva.

Lugo (1995) define el Arco de Mérida como un contrafuerte tectónico de edad Pensilvaniense y de naturaleza alóctona que se mantuvo expuesto durante el Mesozoico Tardío al Cretácico Temprano y del Paleoceno Temprano hasta el Eoceno Medio.

### **Subsidencia termal cretácica**

La culminación de la ruptura de Pangea ocurrió durante el Jurásico Tardío y tal vez abarcó parte del Cretácico Temprano. La transgresión marina cretácica marca el comienzo de un largo período de subsidencia y relajación termal del borde septentrional de la placa suramericana. Durante este tiempo en el occidente de Venezuela se desarrolla una cuenca marginal que se comunica al oeste con una cuenca posterior a un arco volcánico (“back arc basin”), mientras que al norte y noreste predominan condiciones de margen pasivo (Ramírez, 2000).

Lugo (1995) mencionó que el noroccidente de Venezuela experimenta, desde el Jurásico, una subsidencia termal exponencial. Este evento trae como consecuencia la generación de un mar epicontinental transgresivo sobre Venezuela occidental, el cual termina su desarrollo en el Aptiense cuando culmina la sedimentación de la Formación Río Negro.

También se ha sugerido que ningún evento importante de deformación perturbó las unidades cretácicas durante su sedimentación. Durante el Maestrichtiense-Paleoceno Temprano se evidencian los primeros efectos de una deformación compresiva al oeste de la actual Sierra de Perijá. Simultáneamente se inicia el levantamiento del Arco de Mérida que va a permanecer como zona positiva hasta el Eoceno Medio en la Cuenca de Barinas.

## **Compresión Caribe y flexión antepaís**

Durante el Paleoceno Tardío-Eoceno Medio, se inicia en forma progresiva y oblicua la acreción del Terreno Caribe contra el borde septentrional de placa suramericana. La deformación asociada produce el emplazamiento en dirección sureste de las Napas de Lara. La deformación compresiva asociada al emplazamiento de las Napas de Lara origina simultáneamente una cuenca flexural de antepaís (“foredeep basin”), en la cual se depositan espesas secuencias de sedimentos detríticos. Al producirse la flexura litosférica, se desarrollan localmente fallas normales hacia el borde periférico de la cuenca (Ramírez, 2000).

Lugo (1995) menciona que en este período se produce una deformación paulatina dando pie a una colisión y sutura de los terrenos asociados a la convergencia de la placa del Caribe con el margen continental pasivo de Suramérica y cuya expresión más hacia el sur lo constituyen las Napas de Lara; dicha colisión fue diacrónica de sur a norte en el oeste de Venezuela y de oeste a este en el norte de Venezuela.

Ostos (1992) menciona el cambio de la orientación del movimiento de la placa del Caribe hacia el este, como consecuencia de la colisión de la misma con la plataforma de Las Bahamas, esto causó la rotación en sentido horario del terreno transpresional al norte de Venezuela, compuesto por el Arco de Tiara, el Complejo de Sebastopol, la Faja de Villa de Cura, el Cinturón Caucagua-El Tinaco y las Ofiolitas de Siquisique.

Audemard (1991) señala que la interacción de terrenos transpresionales generó por carga tectónica el desarrollo de cuencas tipo antepaís (foreland), cuyas antifosas (foredeep) migraron hacia el este, también indica que el engrosamiento de las unidades se desplaza y se hace más joven al este de Venezuela desde el Cretácico Tardío hasta el presente, en este proceso estuvieron involucradas las cuencas de Maracaibo y Barinas en el occidente del país.

Parnaud *et al.* (1995) ratificaron el desarrollo de cuencas tipo “foreland”, durante el Paleoceno Tardío-Eoceno Medio, frente al arco volcánico Pacífico,

producida como consecuencia de la flexura cortical debido a la carga de los terrenos Caribe. Ésta cuenca se caracteriza principalmente porque la fuente de aporte de sedimentos es el frente de corrimientos.

### **Extensión paleógena de Falcón-Zulia oriental**

En el Eoceno Tardío-Oligoceno se registra un periodo importante de erosión en la parte centro y oriental de las cuencas de Maracaibo y Barinas-Apure, simultáneamente ocurre una redistribución de los depocentros hacia el oeste del área, lo que implica el levantamiento de la Proto-Sierra de Perijá y una reorganización del contexto geodinámico regional, de igual forma ocurrió un evento de extensión y/o transtensión que afectó Falcón y Zulia oriental, este evento distensivo modificó la configuración estructural de esta área.

Esta fase de extensión podría ser el resultado de:

- Colapso orogénico de la zona de colisión de la placa suramericana o
- Rebote elástico-isostático del basamento cristalino debido a un cambio en el vector del movimiento relativo a las placas del Caribe y de Suramérica.

Ostos (1992) resalta el desplazamiento del bloque de Santa Marta-Maracaibo hacia el norte a través de las fallas de Boconó y Santa Marta-Bucaramanga en lo que se conoce como tectónica de escape. También señala la formación de cuencas extensionales asociadas a transcurrancia, especialmente al norte del Estado Falcón y de tipo antepaís (Barinas-Apure), evolucionando paulatinamente a medida que la Placa del Caribe avanza hacia el este. Esto permite en el borde noroccidental de Venezuela la generación de extensas zonas positivas por la colisión del arco de Panamá.

Figueroa *et al.* (1996) mencionan la existencia de una fase compresiva sur-sureste en el Eoceno Tardío, probablemente asociada al último empuje de las Napas

de Lara, y al inicio del levantamiento de los Andes orientales colombianos, en este periodo se origina un fallamiento inverso con una orientación preferencial este-oeste, noreste-suroeste.

Lugo (1995) menciona que el levantamiento de los Andes venezolanos y la Sierra de Perijá es una consecuencia de la subducción Caribe-Nazca e interpreta un periodo de transgresión que avanzó hacia el norte, a lo largo de las fallas de Icotea y Pueblo Viejo; a medida que avanzaba la Placa del Caribe la influencia de los frentes de corrimiento se alejaba.

### **Compresión neógena andina**

La colisión del terreno de Panamá contra la esquina noroccidental de Suramérica, produce un evento compresivo de importancia en el occidente de Venezuela en el Mioceno Tardío-Holoceno.

En el frente suroriental andino y en la Cuenca de Barinas, las estructuras asociadas con la tectónica Caribe fueron deformadas pasivamente y reactivadas (Ramírez, 2000).

Las diferentes fases de deformación que afectaron el occidente de Venezuela, implican una historia estructural compleja y polifásica que se manifiesta a través de distintos estilos estructurales con excepción de aquellos asociados con tectónica de sal. Para cada evento se observa tanto una sobreimposición tectónica con reactivación de estructuras pre-existentes (estructuras heredadas) como formación de nuevas estructuras (estructuras neoformadas). La cronología relativa de los episodios tectónicos así como su reconstrucción, se basa en la relación que existe entre los marcadores sedimentarios y la estructura.

Los mismos autores interpretan el sistema estructural de los Andes venezolanos como corrimientos del basamento, que se imbrican en despegues profundos en la corteza, con transporte hacia el noroeste y retrocorrimientos menores con vergencia opuesta, sin embargo Audemard (1991) los asocia con inversiones mayores de los grabens jurásicos.

Lugo (1995) señala la generación-reactivación de corrimientos con dirección norte-sur en la Sierra de Perijá, así como en el este y oeste de la Cuenca de Maracaibo.

Figuroa *et al.* (1996) mencionan que durante esta fase orogénica se reactivan o invierten estructuras preexistentes y la Cuenca Barinas-Apure adquiere la configuración estructural actual.

### **Evolución estructural local**

Los rasgos estructurales presentes en el Flanco Surandino-Barinas Norte se pueden dividir en tres sectores bien diferenciados, los cuales de norte a sur se denominan I, II y III (Figura 5). El sector I se encuentra al norte del frente de deformación Caribe (Fm. Pagüey) o corrimiento frontal sellado bajo la discordancia neógena. El sector II, al sur del sector I, se localiza entre el frente de deformación Caribe y el sinclinal del piedemonte neógeno y el sector III se localiza al sur del sinclinal del piedemonte neógeno, presenta en general fallas normales de edad eocena e incluye las estructuras identificadas en el área Barinas Norte y los campos tradicionales de Barinas. Los efectos del levantamiento andino se atenúan en sentido NW-SE, de manera tal que el sector I presenta la mayor influencia tectónica de este evento y el sector III presenta una influencia casi nula del mismo (Anka *et al.*, 1998).

El control stratigráfico del Cretácico se establece a partir de la información proveniente de los pozos perforados en la región, los cuales muestran una sedimentación cretácica bastante homogénea en los tres sectores estructurales identificados, pese a la existencia de una discordancia intra-cretácica que afectó en su mayoría, al Miembro Quevedo de la Formación Navay (Anka *et al.*, 1998).

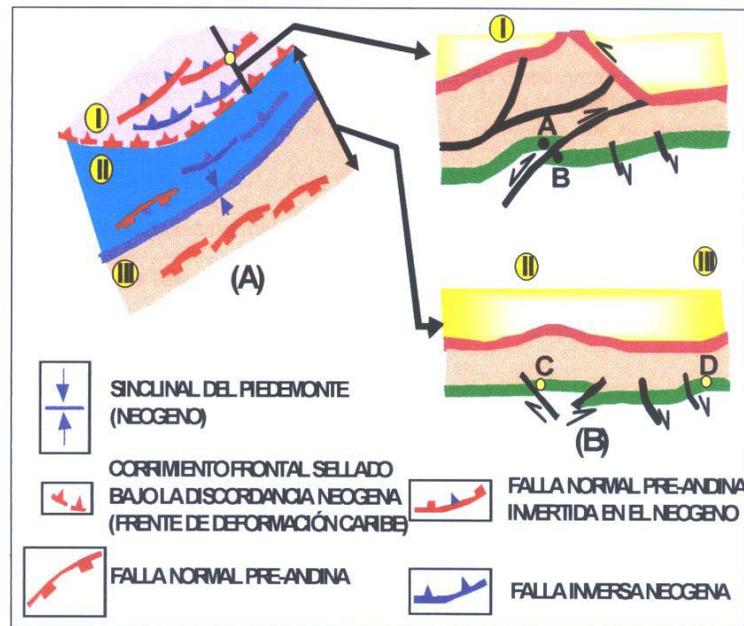


Figura 5. Marco estructural del Flanco Surandino-Barinas Norte. (Tomado de Anka *et al.*, 1998).

El miembro La Morita de la Formación Navay presenta un espesor variable (20-30 m) en toda la región. Los espesores erosionados correspondientes a la discordancia en el tope del Cretácico se han estimado en 6 y 140 m, por lo que en algunos pozos la Formación Burgüita está totalmente erosionada (Anka *et al.*, 1998).

Durante el Eoceno Medio se produce una fase extensional, producto del emplazamiento del alóctono en inicios de la formación de la cuenca flexural, que da origen al fallamiento normal. Por otra parte, la sedimentación del Eoceno Medio se inicia con la Formación Gobernador hace 45 m.a., lo que no es del todo claro y la información disponible no permite discernir claramente si esta estructuración fue contemporánea con la sedimentación de la Formación Gobernador o posterior a ésta. De haber sido contemporánea, la considerable variación en el espesor de la Formación Gobernador (de 50 a más de 300 pies) podría ser explicada por el efecto sintectónico de las fallas normales eocenas. Sin embargo, en estudios anteriores, las zonas de mayores espesores han sido interpretadas como producto de la existencia de

valles incisos de orientación aproximadamente sureste-noroeste (Sturrow y Mónaco, 1998).

Posterior a la Formación Gobernador se deposita la Formación Pagüey hace 43 m.a. La información sísmica permite deducir que la depositación de la Formación Pagüey estuvo controlada, al menos en sus inicios, por el fallamiento normal Eoceno en el sector I. Esto produjo que los mayores espesores de esta formación se depositaran en este sector, en contraste con los sectores II y III. Una vez depositada la Formación Pagüey los cabalgamientos que avanzaban desde el noroeste, alcanzaban hace aproximadamente 40 m.a. el sector I. Uno de los efectos más notables de este evento es que profundiza aún más la secuencia sedimentada en las zonas de grabens eocenos. A partir de la interpretación sísmica se estimaron los espesores paraúctonos de la Formación Pagüey, los mismos alcanzan valores de hasta 3000 m (Anka *et al.*, 1998).

La sedimentación oligocena ha sido reportada hacia el sur por la presencia de aproximadamente 2000 pies de la Formación Parángula basal, su edad fue asumida en 30 m.a., posterior a esta depositación hace 25 m.a., se localiza la discordancia que marca la base del Neógeno.

La sedimentación de la molasa abarca los tres sectores estructurales y a medida que avanza el levantamiento andino hacia el sector I, los sectores II y III continúan recibiendo sedimentos molásicos. El espesor de la molasa andina debió decrecer paulatinamente desde el sector III, donde los espesores actuales son cercanos a los originales, hasta el núcleo ígneo-metamórfico expuesto en Los Andes, donde debería hacerse cero (Anka *et al.*, 1998).

El avance del levantamiento andino llega al sector I hace 5 m.a. y está evidenciado por la reactivación de fallas de basamento, la inversión de fallas eocenas normales y la creación de fallamiento inverso de edad neógena. En el sector II, los efectos del levantamiento andino se expresan como inversión de fallas normales eocenas y aún cuando este efecto es considerablemente menos marcado que en el sector I, se produce la erosión local de 300 a 1600 m de sedimentos molásicos. El

sector III no sufrió efectos notables de levantamiento y exposición para este periodo (Anka *et al.*, 1998).

Cuando el sector I sufre exposición por el levantamiento andino, se incrementa el aporte de molasa andina a los otros dos sectores estructurales (II y III). La erosión máxima en el bloque levantado de las fallas inversas en el sector I se estimó en el orden de los 2000 m. En tanto que los espesores totales restituidos de molasa andina en los sectores II y III alcanzan valores de 3150 m (Anka *et al.*, 1998).

### **Geología Local**

Los intervalos de interés identificados mediante los registros de pozo presentes en el Campo Borburata son los siguientes:

### **Formación Pagüey**

Formación de edad Eoceno medio, la descripción litológica de esta formación básicamente consiste en lutitas marinas grises a negras, duras, astillosas, bien laminadas, muy foraminíferas, en su parte inferior, de unos 130 m de espesor, consiste en una secuencia cíclica de lutitas que gradan hacia arriba a limolitas y areniscas de grano fino. En la parte superior, las areniscas son ferruginosas, carbonáceas, ocasionalmente calcáreas, grises a grises oscuras, frecuentemente meteorizando a pardo, de grano fino a medio, lamosas y con rizaduras; éstas alternan con lutitas y limolitas fosilíferas, en estratos irregulares, grises oscuras a negras. Autores como Aguasuelos (1990) y Kiser (1997) separan la formación, en orden ascendente, en tres miembros:

Arandia: compuesto de "lutitas arcilíticas, con frecuentes intercalaciones de concreciones ferruginosas o dolomíticas en forma de rosario, de colores grises verdosos o parduscos; las lutitas son negras, microfossilíferas y localmente presentan intercalaciones de capas de cuarzoarenitas de grano fino".

La California: "una alternancia monótona de limolitas gris verdosas, impuras con subgrauvacas de color verde oscuro que meteorizan a pardo y pardo rojizo, más arriba en la secuencia aumentan gradualmente los espesores de las subgrauvacas, hasta llegar a capas métricas."

Higüerones: "una alternancia monótona de lutitas y areniscas, menos frecuentemente limolitas y calizas impuras lenticulares". Las estructuras sedimentarias que comunmente se encuentran son moldes de carga, con estratificación cruzada, paralela y ondulada.

En cuanto al espesor de esta formación, Aguasuelos (1990) estimó 2200 m para Pagüey en el área Calderas-Altamira-Río Yuca, de los cuales unos 500 m pertenecen al "miembro Arandia", 1000 m al "miembro La California" y 700 m al "miembro Higüerones". Regionalmente, el espesor de Pagüey aumenta, desde el Area Mayor Sinco-Silvestre, hacia el norte y noreste, en dirección del Surco de Trujillo al este del Lago de Maracaibo. Se acuña erosionalmente contra el flanco suroeste del Arco El Baúl. Desaparece al suroeste por interdigitación con la facies arenosas de la Formación Cobre.

Las lutitas de Pagüey constituyen el sello principal de los yacimientos petrolíferos de la Cuenca de Barinas. En el campo Mingo, en donde las lutitas están desplazadas por areniscas del litotipo Gobernador, algunas areniscas basales de la Formación Pagüey producen cantidades comerciales de petróleo (PDVSA-Intevp, 1997).

### **Formación Gobernador**

Formación de origen Terciario al igual que la Formación Pagüey, específicamente Eoceno Medio, esta comprende las clásticas basales, depositadas discordantemente encima del Cretácico, por la transgresión marina que se inició en la Cuenca de Barinas en el Eoceno Medio. Pierce (1960) describe a la formación con 80% de areniscas cuarzosas, a veces cuarcíticas, de color gris claro a pardo, manchadas por óxido de hierro cuando están meteorizadas, localmente

conglomeráticas, en capas de espesor medio a grueso, y con estratificación cruzada. Tienen un 20% de intercalaciones de limolitas en colores claros, y laminaciones lutíticas carbonáceas gris oscuro a gris azulado. Schubert (1968) describe la Formación Gobernador del área de Santo Domingo, como capas macizas muy espesas de areniscas de colores gris oscuro, negro, marrón o rosado, de grano fino a grueso, localmente conglomeráticas, redondeado a subredondeado, generalmente de cuarzo lechoso, con óxido de hierro intersticial. Tienen buena compactación y estratificación cruzada, con láminas finas carbonáticas de color negro. Los moldes de carga son comunes y tubos de gusano ocurren en la base de la formación.

Los espesores medidos de Gobernador son muy variables pero en promedio rondan los 350 metros, por ejemplo Pierce (1960) midió unos 300 m de Gobernador en la sección tipo, 320 m en la cercana quebrada Bellaca y 450 m en el río Boconó; Schubert (1968) reporta espesores variables de 90 m a 369 m en el área Barinitas-Santo Domingo, y Campos (1977) describió 100 m en el cerro Azul, 300 m al norte de Masparrito y unos 575 m de su equivalente Formación El Santuario del área del Río Boconó. Gobernador se acuña erosionalmente en los pozos de Guanarito, hasta desaparecer contra el flanco suroeste del Arco de El Baúl. Se adelgaza ligeramente sobre el Arco de Mérida y aumenta nuevamente hacia el suroeste, hasta confundirse con la Formación Cobre.

Las areniscas de Gobernador son segundas en importancia, después del Cretácico, como productor de petróleo en el área mayor de Sinco-Silvestre (PDVSA-Intevep, 1997).

### **Formación Burgüita**

Formación de edad Cretácico Tardío (Santoniense-Maastrichtiense). Renz (1959) la describe como areniscas micáceas limolíticas, parcialmente glauconíticas y frecuentemente calcáreas, de grano fino y color gris claro, con interlaminaciones de lutitas gris oscuro y arcilita de color gris claro. Incluye la presencia de una caliza conchífera en la base. Las areniscas son masivas, muy lenticulares, además se hacen

más delgadas y presentan lutitas interestratificadas de mayor espesor hacia el tope, son de color gris o marrón, plásticas o duras, carbonáticas, piríticas y no calcáreas.

En el área de Burgúa, la formación se inicia con un paquete de areniscas, calizas y lutitas, referido informalmente como Burgüita Basal, cuyo tope conforma un buen reflector sísmico en esa área. Las areniscas presentan similar descripción y las calizas son de color crema, gris y marrón claro, duras, microcristalinas, glauconíticas, carbonáticas y piríticas (Kiser, 1989). Es evidente el aumento del carácter arenoso de la formación, de base a tope.

En la sección tipo y sección de referencia (Río Mucupatí) los espesores son de 420 m y 350 m respectivamente (Renz, 1959). Feo-Codecido (1972) menciona que en el subsuelo tiene un espesor variable entre 0 y 177 m con un promedio de 73 m, ya que su tope ha sido erosionado desigualmente en toda su extensión, además menciona que en el Campo Silvestre, el espesor promedio es de unos 21 m y decrece gradualmente al este, hasta desaparecer por truncamiento sobre el flanco oriental de la Cuenca Barinas-Apure. Kiser (1989) menciona un espesor mínimo de 10 m en el área de Burgúa, 412 m en el Campo Sinco y 46 m en el área de Guafita.

### **Formación Navay**

Formación de edad Cretácico Tardío (Coniaciense-Maastrichtiense). Pierce (1960), la describe en la localidad tipo como compuesta de lutitas silíceas, blandas, duras, quebradizas, amarillo claro a crema y a blanco; lutitas muy porosas, pardo claro a gris claro, lenticulares, pardo claro, y lutitas calcáreas, carbonáticas, gris a gris oscuro. Como constituyentes menores de la formación, se presentan areniscas lenticulares de grano angular, calcáreas a silíceas, pardo claro a gris claro. Estas areniscas, muy calcáreas a veces, se han definido como calizas clásticas, probablemente por su contenido fosilífero.

Esta formación se subdivide en dos miembros, La Morita y Quevedo. El Miembro La Morita consiste en una sección esencialmente lutítica, en la sección tipo en la quebrada Agua Fría, donde consiste casi exclusivamente en una lutita gris

oscura, calcárea a parcialmente limolítica, con intercalaciones de horizontes fosfáticos, hacia el flanco suroriental de la Cuenca de Barinas, cambia gradualmente a una facies compuesta casi totalmente de areniscas, con intercalaciones menores de lutitas y ocasionalmente calizas. Kiser (1961), la describe como compuesta de lutitas arcillosas suaves, gris claro a oscuro, con abundancia local de restos de peces.

El Miembro Quevedo fue introducido por Renz (1959), para designar una secuencia de rocas silíceas, duras, quebradizas, de fractura concoidea, predominantemente lutíticas, de color gris claro que meteorizan a blanco, que incluye además intercalaciones de areniscas gruesamente estratificadas, lutitas negras, calizas fosfáticas y capas de fanita que constituyen hasta un 40% de la sección. Kiser (1961) lo describe como compuesto de lutitas silíceas, calizas silíceas y fanitas con areniscas, lutitas y limolitas interestratificadas.

El espesor de la formación varía desde cero en el Área Mayor de Sinco-Silvestre y el área de Guanarito hasta 772 metros en el área de Burgua, el espesor tiende a aumentar rápidamente al acercarse al Surco de Uribante y se acuña hasta extinguirse hacia el Sur de Apure y los llanos colombianos. El Miembro La Morita tiene un espesor de 12 a 18 metros en los pozos de Barinas (Von Der Osten, 1966). Según Renz (1959) el espesor en el área de Burgua es de 150 metros y 180 metros en la sección tipo de la quebrada Agua Fría. El Miembro Quevedo mantiene un espesor estratigráfico aproximadamente constante de unos 96 metros, con variaciones entre 56 y 157 metros.

Feo-Codecido (1972) afirma que algunas zonas productoras de hidrocarburos de los campos de Silvestre y Sinco en el Estado Barinas, corresponden a las rocas del Miembro Quevedo. Las lutitas del miembro La Morita son el sello vertical de los yacimientos petrolíferos cretácicos en Barinas y Apure; en donde está ausente por erosión, permite la comunicación de las areniscas de Escandalosa y Gobernador, suprayacente. Cárdenas (1985) menciona reservas de fosfato de 20 millones de toneladas, en areniscas fosfáticas del Miembro Quevedo, en el área de Los Monos, Táchira suroriental (PDVSA-Intevep, 1997).

## **Formación Escandalosa**

Formación de edad Cretácico Tardío (Cenomaniense-Turonense), compuesta por areniscas macizas, cuarzosas y muy glauconíticas, con cantidades menores de lutitas negras calcáreas. Las areniscas son de color gris oscuro a marrón claro y verdoso, de grano fino a medio, bien escogidas, micáceas y carbonáceas. Se presentan en capas delgadas a masivas, con estratificación cruzada en las capas más gruesas. Las lutitas son gris oscuro, algo arenosas, calcáreas y carbonáceas. En el tope de la sección se encuentra una caliza de unos 4 m de espesor, gris oscura, masiva, y coquinoidea, con manchas de dolomita microcristalina. Emite olor a petróleo al ser golpeada y se ha correlacionado con la Caliza Guayacán del piedemonte andino (Kiser, 1989). Como espesor tiene aproximadamente 300 m en la sección tipo, entre 150 y 427 m en otras localidades. Desde el Arco de El Baúl, la formación aumenta su espesor desde el acuñaamiento hasta unos 100 m en los pozos de Guanarito, un promedio de 150 m a través de la cuenca, 150 m en el Campo Guafita, 120 m en el Campo La Victoria y 240 m en el afloramiento del área de Nula. Aumenta de espesor aún más hacia el Surco de Uribante. En la represa La Vueltona, la formación tiene un espesor de 186 m, incluyendo 18 m de la Caliza Guayacán. En la represa Borde Seco, la formación tiene un espesor de 177 m, estando ausente o cubierta por la Caliza Guayacán (Kiser, 1997).

Las arenas de esta unidad son bastante cuarzosas y constituyen un magnífico material para la construcción, y las arcillas que constituyen el cemento de éstas, son bastante caoliníticas. En el subsuelo de los campos petrolíferos de Barinas y Apure, las arenas P-1/P-2 constituyen un importante reservorio de petróleo (campos Silvestre, Sinco y Guafita) (PDVSA-Intevep, 1997).

## **Miembro Guayacán (Caliza “O”)**

El Miembro Guayacán consiste en capas gruesas de calizas bioclásticas macizas, muy fosilíferas, de color gris, intercaladas con lutitas no calcáreas gris

oscuro a negro, micáceas y cantidades menores de limolita arcillosa gris (González de Juana *et al.*, 1980). Según Renz (1959) hacia el norte de Mérida, las capas individuales de caliza disminuyen en número y se hacen gradualmente más gruesas. Entre Las Cruces y La Carbonera, a lo largo de la carretera de Ejido a la Azulita, dos capas con litología típica de Guayacán encierran una intercalación de caliza densa, gris oscuro, y concreciones con "litología La Luna". Más hacia el noreste, en los estados Trujillo y Lara, el Miembro Guayacán desaparece completamente y es reemplazado por la Formación La Luna, que es más pelágica. En el subsuelo de Barinas las calizas del Miembro Guayacán marcan el límite entre las formaciones Escandalosa y La Morita infrayacente y suprayacente.

En la sección de referencia de Venezuela, el Miembro Guayacán tiene un espesor de 60 metros; en Táchira, esto varía normalmente entre los 40 y 50 m. En el río Santo Domingo y en la Quebrada Bellaca (Estado Barinas) el espesor del Miembro Guayacán aumenta hasta alcanzar los 125 m a expensas de las lutitas de Seboruco, el cual prácticamente desaparece (Renz, 1959). Según González de Juana *et al.* (1980) este miembro constituye en Barinas un horizonte guía en los perfiles de reflexión sísmica y registros de pozos, y se conoce informalmente como caliza "O" de la Formación Escandalosa (PDVSA-Intevep, 1997).

En resumen, la columna estratigráfica del área de Barinas Tradicional comienza con un basamento pre-Cretácico sobre el cual se depositó una columna que contiene sedimentos cretácicos, terciarios y recientes (Figura 6).

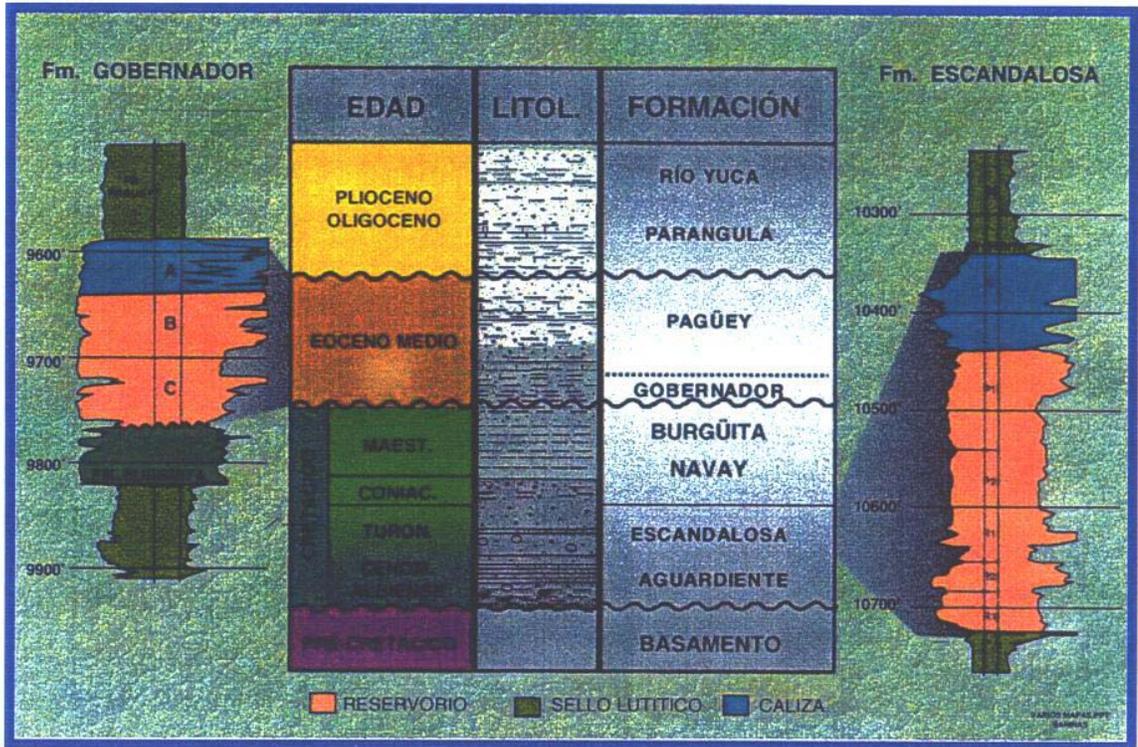


Figura 6. Columna generalizada del área de Barinas Tradicional desde el Cretácico al Plioceno. (Tomado de Vignali, 1999).

## **CAPÍTULO III**

### **MARCO TEÓRICO**

Con el fin de comprender los conceptos que se manejan en este trabajo de grado a continuación se dará una breve definición y descripción de los principales tópicos considerados. Se mencionarán las características más importantes de los levantamientos sísmicos multicomponente, se definirán algunos de los registros de pozo más importantes y comúnmente empleados en tareas de identificación litológica, como lo son: el registro gamma ray, registro sísmico dipolar (ondas P y S en una sola herramienta) y el registro de densidad, ya por último se mencionarán los conceptos estadísticos que ayudarán a entender la metodología aplicada a los datos con el fin de cuantificar la incertidumbre en la predicción de litologías.

#### **Sísmica Multicomponente**

La sísmica de reflexión para ondas compresionales ha sido la herramienta por excelencia en la prospección geofísica, en los últimos tiempos la sísmica multicomponente ha venido ganando importancia gracias a las ventajas que posee con respecto a la sísmica convencional de onda P.

En los levantamientos sísmicos multicomponente se conservan las mismas características que en los levantamientos sísmicos convencionales, aunque existen algunas diferencias entre ellos, la sísmica multicomponente requiere fuentes que generen ondas P, SV y SH para ser captadas por los receptores 3C, en este caso se denominan “full multicomponente” mientras que en los levantamientos sísmicos convencionales se requieren fuentes que generen, por lo general, ondas P. En el caso del levantamiento sísmico Borburata se empleó una fuente convencional de onda P, por lo que el carácter multicomponente se basa en el principio de ondas convertidas.

Las secciones puras de onda S (SV-SV y SH-SH) han recibido mayor atención debido a su fácil análisis ya que éstas tienen trayectorias simétricas y se pueden

aplicar los procedimientos convencionales de procesamiento sísmico, tales como CMP Binning, análisis de velocidad hiperbólico, entre otros (Álvarez, 1998).

Las ondas S pueden contener mayor información que las ondas P (Tatham y McCormack, 1991). Más aún, cuando se estudian ambos tipos de ondas, se tiene una situación similar a usar ecuaciones simultáneas con las que se pueden despejar múltiples incógnitas. La información adicional de las ondas S puede ser descrita en términos de su polarización. Para medios isótropos, el movimiento de las partículas de ondas P está orientado en la dirección de propagación, de aquí que se llamen también ondas compresionales, el movimiento de las partículas de las ondas S está orientado en el plano perpendicular a la dirección de propagación de la onda, por ello también son llamadas ondas transversales. Como el movimiento de las partículas está orientado perpendicular a la dirección de propagación, se tienen dos direcciones posibles, tales direcciones van a producir una polarización de la onda S, una en cada dirección del plano (Tatham y McCormack, 1991).

Considerando un plano que se genera por una fuente, un punto de reflexión en la base de una capa plana y un receptor se puede explicar de manera gráfica el comportamiento de las ondas convertidas. La figura 7 presenta un esquema del movimiento de las partículas de las ondas P y S, si la fuente genera onda P, el movimiento de la partícula estará contenido en la dirección del rayo y siempre en el plano definido por la fuente, el punto de reflexión y el receptor, en algunos casos, el movimiento de la partícula puede ser totalmente vertical.

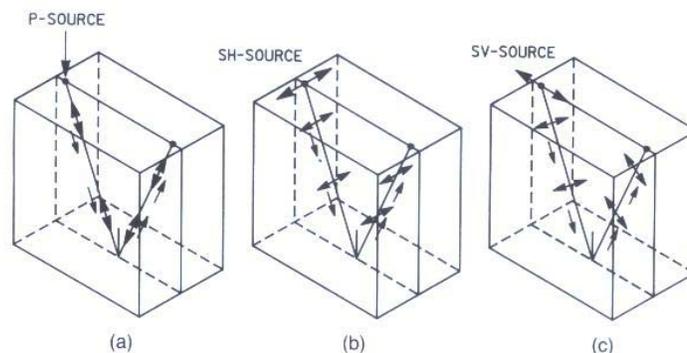


Figura 7. Movimiento de las partículas para ondas P, SV y SH.  
(Tomado de Tatham y McCormack, 1991)

Para una onda S que se genere en la superficie, la orientación de la fuente tiene gran importancia en la polarización de la onda. La orientación de la fuente generalmente se describe con respecto a la dirección de la línea sísmica comprendida por la fuente y el receptor. Si la fuente de onda S está orientada perpendicularmente a la dirección de la línea sísmica se generará una onda SH (Figura 7), el movimiento de la partícula en este caso es puramente horizontal, perpendicular a la propagación de la onda y normal al plano definido por la fuente, el punto de reflexión y el receptor. Si la fuente se orienta en dirección paralela a la línea sísmica se generará entonces una onda SV (Figura 7), en este caso el movimiento de la partícula también será puramente horizontal, perpendicular a la propagación de la onda pero contenida en el plano definido por la fuente, el punto de reflexión y el receptor. Por lo tanto, las ondas S se pueden definir a partir de la polarización del movimiento de las partículas, las ondas SV son radiales (In-Line) y las SH son transversales (Cross-Line) con respecto a la dirección de la línea sísmica.

Por otro lado, el uso de fuentes de onda S incrementa considerablemente el costo de los levantamientos sísmicos, siendo una alternativa viable el uso de fuentes de onda compresional y receptores multicomponentes, con el fin de explotar el fenómeno de conversión de energía de ondas P a SV en las interfases del subsuelo.

Hay algunas ventajas que se deben mencionar con respecto a la prospección geofísica con ondas convertidas:

- Usa fuentes convencionales de onda P
- Se puede grabar simultáneamente un levantamiento de onda P
- Las ondas convertidas se graban en el canal radial y transversal del receptor

Las técnicas de procesamiento de datos multicomponente (3C) se han desarrollado y mejorado durante los últimos años, permitiendo obtener secciones sísmicas de ondas convertidas P-SV con alta relación señal/ruido y correlacionables con las secciones de onda P.

La onda convertida ha sido utilizada para resolver diversos problemas relativos a la caracterización de yacimientos, tales como estimación de orientación de fracturas, determinación de litologías usando la relación  $V_p/V_s$ , mejor definición estructural en zonas gasíferas e identificación de calizas/anhidritas/dolomitas (Donati, 1997).

En la práctica, se utilizó el principio de onda convertida para obtener, a partir de los tiempos de viaje de las ondas, un valor aproximado de la relación  $V_p/V_s$ .

Supongamos un modelo de dos estratos planos (Figura 8), en el cual se hace incidir de manera normal una onda P generada por una fuente, supongamos también que bajo incidencia normal, dicha onda es capaz de generar una onda S reflejada.

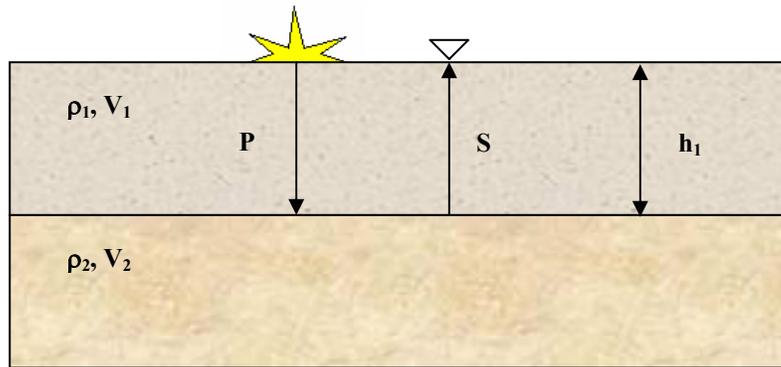


Figura 8. Modelo asumido para obtener a partir de los tiempos de viaje de las ondas PP y PS el valor de la relación  $V_p/V_s$

A partir del modelo se pueden obtener los tiempos de viaje para las ondas PP y PS:

$$t_{pp} = \frac{2h_1}{V_{p1}} \quad (1)$$

$$t_{ps} = \frac{h_1}{V_{p1}} + \frac{h_1}{V_{s1}} \quad (2)$$

donde  $V_{p1}$ : velocidad de la onda compresional en la capa 1.

$V_{s1}$ : velocidad de la onda de corte en la capa 1.

$t_{pp}$ : tiempo doble de viaje de la onda compresional.

$t_{ps}$ : tiempo de viaje de la onda convertida.

$h_1$ : espesor de la capa 1.

Despejando  $h_1$  de tpp se obtiene:

$$h_1 = \frac{t_{pp}}{2} V_{p1} \quad (3)$$

Sustituyendo  $h_1$  en tps:

$$t_{ps} = \frac{t_{pp}}{2} + \frac{t_{pp}}{2} \frac{V_{p1}}{V_{s1}} \quad (4)$$

De donde finalmente se obtiene la relación  $V_p/V_s$  para la capa 1:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{2t_{ps}}{t_{pp}} - 1 \quad (5)$$

Esta relación fue empleada por Stewart *et al.* (2002), Todorov (2000), entre otros, la cual permite obtener un valor aproximado de la relación  $V_p/V_s$  a partir de los tiempos interválicos obtenidos de las secciones PP y PS de la sísmica, pero hay que tomar en consideración que aun cuando, el modelo supone incidencia normal, no es posible físicamente que exista conversión de ondas, sin embargo, en la práctica no se obtienen secciones sísmicas con incidencia normal, por lo que se asume que dicha conversión se lleva a cabo.

## **Registros de Pozo**

### **Registro Gamma Ray**

El registro de rayos gamma o GR es, básicamente, una medida de la radioactividad natural de las formaciones en el subsuelo, contra profundidad. Esta radioactividad proviene de las emisiones del Uranio, Torio y Potasio presentes en las rocas. Los rayos gamma son capaces de penetrar unas pocas pulgadas en la roca y una fracción de ellos, que se originan cerca del hoyo, lo atraviesan pudiendo ser detectados por un sensor de rayos gamma, este detector produce un pulso eléctrico

discreto por cada rayo gamma detectado y el parámetro registrado es el número de pulsos captados por unidad de tiempo (García, 1993).

El registro GR puede distinguir zonas permeables por el hecho de que los elementos radioactivos tienden a ser abundantes en las lutitas, las cuales son impermeables, y mucho menos en los carbonatos y en las arenas, los cuales generalmente son permeables.

Normalmente el registro GR puede separar arenas limpias y carbonatos de las arcillas bastante bien, es por esto que es usado extensamente por los geólogos como un registro de correlación, asociando la estratigrafía de un pozo a la de los vecinos o a la encontrada en trabajos de superficie en los alrededores de la cuenca, sin embargo, existen áreas localizadas donde arenas y dolomitas, aunque estén bastante libres de arcilla, son lo suficientemente radioactivas como para dificultar el proceso (García, 1993).

Entre las formaciones menos comunes, el carbón, la sal y el yeso dan respuestas bastante bajas. Cenizas volcánicas y capas de potasio, por el contrario, dan lecturas sumamente altas (García, 1993).

### **Registro Sónico**

La herramienta sónica mide la velocidad del sonido en las formaciones penetradas por un pozo. El principio físico de medición consta de un transmisor y dos receptores que están colocados en la herramienta con un espaciamiento típico de 1 m entre el transmisor y el receptor mas cercano, y de 1 m entre los receptores (García, 1993).

Cuando un pulso de corriente o voltaje es aplicado al transmisor, éste genera un pulso de presión corto y oscilatorio a una frecuencia que puede variar entre 2 - 25 KHz en el lodo. Esto inicia seis diferentes ondas viajando hacia arriba y hacia abajo en el hoyo, dos ondas refractadas a través de la formación, compresional y de cizalla, dos ondas directas a lo largo de la herramienta y del lodo, y dos ondas superficiales a

lo largo de la pared del hoyo, pseudo-Rayleigh y Stoneley. Estas ondas viajan a diferentes velocidades, las cuales varían entre 1300 y 8000 m/seg (García, 1993).

Las herramientas sónicas estándar miden sólo el tiempo de viaje o de tránsito de las ondas compresionales, pero gracias a las nuevas tecnologías han emergido nuevas herramientas sónicas que permiten llevar a cabo las mediciones de los tiempos de tránsito de las ondas de cizalla. El resultado es presentado en un registro como tiempo de tránsito en la formación, en microsegundos/pie ( $\mu\text{seg}/\text{pie}$ ). La precisión de la medida es bastante buena, aproximadamente de más o menos  $0.25 \mu\text{seg}/\text{pie}$  (García, 1993).

### **Registro de Densidad**

El núcleo de un átomo, cargado positivamente, consiste de protones y neutrones y está rodeado de electrones con carga negativa, orbitando a su alrededor. Un fotón de un nivel de energía determinado, interactuará con el núcleo o con los electrones, dependiendo de la sección transversal del material involucrado (García, 1993).

La herramienta de densidad percibe la densidad de la formación al medir la atenuación de los rayos gamma entre una fuente y un detector, situados en una barra de aproximadamente 1 m de largo, que es forzada contra la pared del hoyo por un brazo hidráulico. Los rayos gamma emitidos continuamente por la fuente (típicamente con energías de 0.66 MeV provenientes de Cesio-137) son canalizados dentro de la formación, sufriendo múltiples colisiones con electrones, las cuales las hacen perder energía y moverse en todas direcciones (García, 1993).

El detector de largo espaciamiento, el principal y más lejano a la fuente, genera un pulso eléctrico discreto por cada rayo gamma incidente (García, 1993).

La densidad de una formación es la relación entre su masa y el volumen que ella ocupa, en las formaciones con densidad baja la mayor parte de los rayos gamma producidos por la fuente llegan hasta el receptor y son contados, a medida que aumenta la densidad menos y menos rayos llegan al receptor.

## Simulación de Monte Carlo

La simulación de Monte Carlo es una técnica que combina conceptos estadísticos (muestreo aleatorio) con la capacidad que tienen los ordenadores para generar números pseudo-aleatorios y automatizar cálculos. Los orígenes de esta técnica están ligados al trabajo desarrollado por Stan Ulam y John Von Neumann a finales de los 40 en el laboratorio de Los Alamos, cuando investigaban el movimiento aleatorio de los neutrones. En años posteriores, la simulación de Monte Carlo se ha venido aplicando a una infinidad de ámbitos como alternativa a los modelos matemáticos exactos o incluso como único medio de estimar soluciones para problemas complejos. Así, en la actualidad es posible encontrar modelos que hacen uso de simulación Monte Carlo en las áreas informática, empresarial, económica, industrial e incluso social (Judge, 1999). En otras palabras, la simulación de Monte Carlo está presente en todos aquellos ámbitos en los que el comportamiento aleatorio o probabilístico desempeña un papel fundamental, de hecho, el nombre de Monte Carlo proviene de la famosa ciudad de Mónaco, donde abundan los casinos de juego y donde el azar, la probabilidad y el comportamiento aleatorio conforman todo un estilo de vida.

¿Qué es la simulación de Monte Carlo?

La simulación de Monte Carlo es una técnica cuantitativa que hace uso de la estadística y los ordenadores para imitar, mediante modelos matemáticos, el comportamiento aleatorio de sistemas reales no dinámicos (por lo general, cuando se trata de sistemas cuyo estado va cambiando con el paso del tiempo, se recurre bien a la simulación de eventos discretos o bien a la simulación de sistemas continuos).

La clave de la simulación de Monte Carlo consiste en crear un modelo matemático del sistema, proceso o actividad que se quiere analizar, identificando aquellas variables (*inputs* del modelo) cuyo comportamiento aleatorio determina el comportamiento global del sistema. Una vez identificados dichos *inputs* o variables aleatorias, se lleva a cabo un experimento consistente en (1) generar (con ayuda del

ordenador) muestras aleatorias (valores concretos) para dichos *inputs*, y (2) analizar el comportamiento del sistema ante los valores generados. Tras repetir  $n$  veces este experimento, dispondremos de  $n$  observaciones sobre el comportamiento del sistema, lo cual será de utilidad para entender el funcionamiento del mismo, obviamente, nuestro análisis será tanto más preciso cuanto mayor sea el número  $n$  de experimentos que llevemos a cabo (Faulín y Juan, 2002). El método de Monte Carlo no es sólo fácil de usar sino también es poderoso en practica, debido a que toma en cuenta la variación estadística en las propiedades de las rocas y de los fluidos (Sengupta, 2000).

Autores como Mukerji *et al.* (2002), González, *et al.* (2002) y Mavko y Mukerji (1998), entre otros, han aplicado esta metodología para simular valores aleatorios de cualquier propiedad física de las rocas, generalmente velocidades sísmicas, impedancias acústicas y elásticas, para luego mediante técnicas estadísticas llevar a cabo estudios de incertidumbre y análisis de factibilidad sísmica en distintos yacimientos de todo el mundo, incluso en Venezuela.

## **Estadística**

### **Funciones de probabilidad**

Hay dos tipos de funciones de probabilidad:

- Funciones discretas: cuando el número de valores  $x$  que puede tomar una variable aleatoria  $X$  es finito, se dice que la variable aleatorias  $X$  es discreta (por ejemplo, el arrojar un dado).
- Funciones continuas: cuando el número de valores  $x$  que puede tomar una variable aleatoria  $X$  es infinito se dice que dicha variable aleatoria es continua.

## Funciones continuas de probabilidad

Cuando el número de valores que puede tomar una variable aleatoria  $X$  es infinito, se dice que dicha variable aleatoria es continua, y la función que describe su comportamiento se llama función de densidad de probabilidad o *pdfs*.

En la función densidad, la probabilidad de que una variable aleatoria continua tome un valor exacto es cero  $P(X = x) = 0$ . Sólo es posible hablar de probabilidades diferentes a cero para intervalos finitos.

$$\begin{aligned}P(a \leq X \leq b) &\neq 0, \\a &< b, \\a &> x_0, \\b &< x_1\end{aligned}$$

$(x_1, x_0)$  es el intervalo de definición de la variable aleatoria  $X$ .

Si queremos conocer la probabilidad de que una variable aleatoria continua  $X$  tome un valor menor o igual que  $x$  tenemos:

$$F(x) = P(X \leq x) \quad (6)$$

En términos de densidad de probabilidad  $f(x)$ :

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x)dx \quad (7)$$

Comúnmente llamada función de distribución de probabilidad o *cdfs*. Sin embargo se debe cumplir que:

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} \quad (8)$$

Y para encontrar la probabilidad de que una variable aleatoria continua  $X$  tome un valor entre  $a$  y  $b$ :

$$P(a \leq X \leq b) = P(X \leq b) - P(X \leq a)$$

$$P(a \leq X \leq b) = \int_{-\infty}^b f(x)dx - \int_{-\infty}^a f(x)dx = F(b) - F(a) \quad (9)$$

Las funciones de distribución de probabilidad comúnmente usadas son:

- Normal
- Ji-cuadrado
- “t” de Student

### **Distribución Normal**

La distribución normal se representa como una curva suave y simétrica en forma de campana, los extremos de esta curva se extienden indefinidamente en ambas direcciones a partir del centro, se aproximan, pero sin alcanzar nunca al eje horizontal. La media, la mediana y la moda coinciden en este tipo de distribuciones (Rickmers y Todd, 1971). La función de densidad de probabilidad normal se define como:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (10)$$

y la función de distribución de probabilidad normal como:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx \quad (11)$$

donde:  $x$  = variable aleatoria.

$\mu$  = media de la población.

$\sigma$  = desviación estándar de la población.

### **Distribución ji-cuadrado ( $X^2$ ) de Pearson**

La distribución ji-cuadrado es una suma de normales al cuadrado, más o menos se puede definir así ya que si se calcula la distribución de una variable normal al cuadrado no se puede aplicar cambio de variable y a partir de su función de distribución se llega a una función de densidad de una gamma con parámetros  $1/2$  y  $1/2$  que es una ji-cuadrado con 1 grado de libertad. La gamma es reproductiva respecto al primer parámetro por lo que sumas de normales (0,1) proporcionan

gammas de parámetros  $n/2$  y  $1/2$  o lo que es lo mismo ji-cuadrado con  $n$  grados de libertad.

### **Distribución “t” de Student**

La “t” de Student se crea a partir de una normal (0,1) y una ji-cuadrado con  $n$  grados de libertad independientes. Una variable se distribuye bajo una t de Student si se puede definir como normal (0,1) dividido por la raíz cuadrada de una ji-cuadrado partida por sus grados de libertad.

La “t” de Student tiene las siguientes características:

- Las curvas se asemejan de forma general a la distribución normal reducida.
- Las curvas tienen mayores desviaciones típicas que la distribución normal reducida (que tiene una desviación típica de 1).
- La forma exacta de la curva varía con los grados de libertad, la curva de la distribución “t” es muy diferente de la distribución normal si los grados de libertad son de valores pequeños, y se aproxima más a la distribución normal cuando éstos crecen, de hecho se asume que cuando los grados de libertad tienden a infinito la distribución “t” es igual a la normal.

### **Incertidumbre y Teoría de Información**

La estimación de las propiedades del subsuelo a partir de medidas geofísicas está siempre sujeta a incertidumbre, debido a las inevitables dificultades en la adquisición de los datos, procesamiento e interpretación (Takahashi, 2000).

En esta parte del estudio se presentan las definiciones y métodos necesarios para expresar cuantitativamente el valor de incertidumbre en la predicción de litologías a partir de la relación  $V_p/V_s$ , así como también la cantidad de información que se deriva de dicha predicción.

## Funciones de densidad de probabilidad (*pdfs*)

En problemas de estimación, las funciones de densidad de probabilidad (*pdfs*) proveen una descripción cuantitativa completa del “estado de conocimiento”, información e incertidumbre de nuestros objetivos (Feynman *et al.*, 1963; Gouveia *et al.*, 1996; Gouveia, 1996; Takahashi, 2000). El “estado de conocimiento” lo podríamos definir como “que tan bien conocemos las propiedades del subsuelo y que tan inciertas son”.

En la figura 9 se presentan dos *pdfs* obtenidas de yacimientos diferentes, usando como propiedad la porosidad. Los valores de densidad de probabilidad representan la probabilidad que tiene cada valor de porosidad de ocurrir en cada yacimiento mientras que en el eje X se encuentran los rangos posibles de porosidad. Los picos de las funciones corresponden a las porosidades mas probables, el yacimiento A presenta una *pdfs* mas suavizada y ancha mientras que la distribución presenta el pico mas alto y es mas estrecha en el yacimiento B, por lo que la incertidumbre es mayor en el yacimiento A en comparación con el yacimiento B, dado que los valores de porosidad cercanos al pico tienen mayor densidad en B, mientras que las posibles porosidades tienen un rango mas ancho en A.

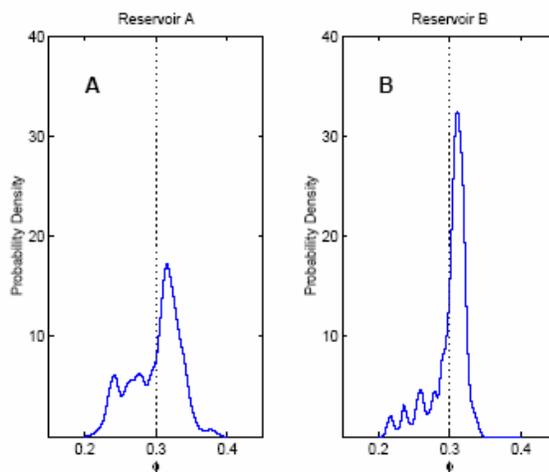


Figura 9. Funciones de densidad de probabilidad (*pdfs*) de porosidad en los yacimientos A y B. (Tomado de Takahashi, 2000).

## Modelos Determinísticos

Si las relaciones entre datos observados y los no observados en diferentes condiciones son descritos por ecuaciones teóricas, como en el caso de la Ecuación de Gassmann en problemas de sustitución de fluidos se habla de modelos determinísticos, por ejemplo, estudiemos el caso de la estimación de  $V_p$  de una arena saturada de petróleo (*oil*) a partir de datos de una arena saturada de agua (*brine*), ambas pertenecientes al mismo yacimiento, la  $V_p$  en la arena saturada de petróleo es una función determinística de  $V_p$  en la arena saturada de agua, tal que:  $V_{p_{pet}} = G(V_{p_{agua}})$ , siendo  $G$  la ecuación de Gassmann, esto es valido si la porosidad, densidad y los parámetros elásticos tanto de los fluidos como de la matriz son exactamente conocidos, la figura 10 muestra un ejemplo de una *pdfs* construida a partir de datos observados y una *pdfs* derivada del modelaje con la ecuación de Gassmann.

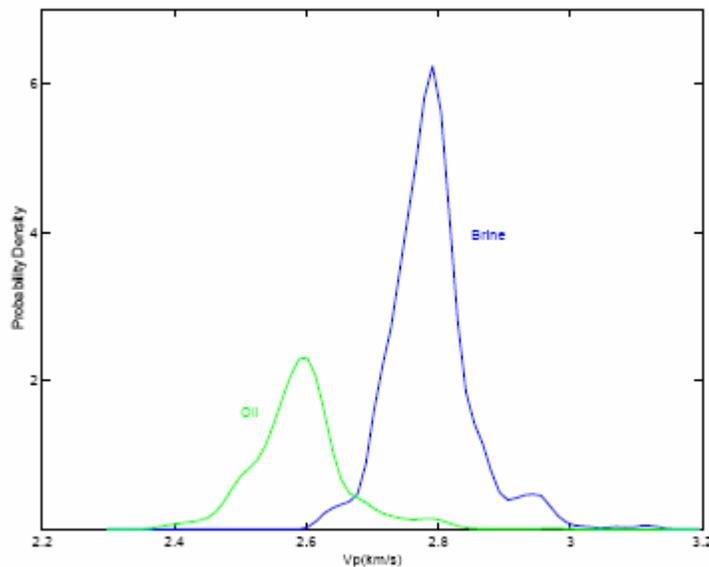


Figura 10. Funciones de densidad de probabilidad (*pdfs*) de  $V_p$  para una arena saturada de agua y una saturada de petróleo obtenida de la anterior con la ecuación de Gassmann. Nótese que  $p(\text{agua}) > p(\text{pet})$ . (Tomado de Takahashi, 2000).

## Modelos Probabilísticos

Generalmente las relaciones en las propiedades de las rocas se pueden definir por la combinación de muchas teorías o por relaciones experimentales, cuando las propiedades físicas en condiciones no observadas,  $\mathbf{m}$ , se modelan a partir de las condiciones observadas,  $\mathbf{n}$ , la relación entre  $\mathbf{m}$  y  $\mathbf{n}$  se pueden expresar por una *pdfs* multidimensional  $p(\mathbf{m},\mathbf{n})$  (Tarantola y Valette, 1982; Tarantola, 1987). La *pdfs* de propiedades físicas obtenidas en condiciones no observadas se puede definir tomando la *pdfs* marginal de la *pdfs* multivariada,

$$p(m) = \int \cdots \int p(m, n) dn = \int \cdots \int p(m|n)p(n)dn \quad (12)$$

En la práctica, cuando las *pdfs* tienen forma arbitraria, la integración de la ecuación anterior puede estar acompañada por simulaciones de Monte Carlo (Omre y Tjelmeland, 1997; Tjelmeland y Omre, 1997; Takahashi *et al.*, 1999a).

## Teoría de Decisión de Bayes

Las *pdfs* proveen no sólo la más probable predicción de ciertas propiedades en las rocas sino también la confiabilidad de las predicciones y la probabilidad de sus errores (Duda y Hart, 1973; Box y Tiao, 1992; Houck, 1999). El siguiente ejemplo describe el criterio de decisión de Bayes y el error cuando se discrimina una arena saturada de petróleo de una saturada de agua usando  $V_p$ .

Cada curva en la figura 10 muestra la *pdfs* de  $V_p$  para la arena saturada de agua y para la saturada de petróleo,  $p(V_p, \text{Fluido}=\text{agua})$  y  $p(V_p, \text{Fluido}=\text{petróleo})$ , proveniente de un yacimiento del Mar del Norte. El área bajo cada curva representa la probabilidad marginal de cada fluido,

$$p(\text{agua}) = \int p(V_p, \text{Fluido} = \text{agua}) dV_p \quad (13)$$

$$p(\text{petróleo}) = \int p(Vp, \text{Fluido} = \text{petróleo}) dVp \quad (14)$$

El área bajo la curva es mayor en la *pdfs* de la arena saturada de agua que en la *pdfs* de la arena saturada de petróleo,  $p(\text{agua}) > p(\text{petróleo})$ , de aquí una asunción previa, el contenido de fluido mas probable que exista es el agua, sin observaciones de velocidad.

La *pdfs* condicional del fluido dada cualquier observación de Vp sería,

$$p(\text{Fluido}|Vp) = \frac{p(Vp, \text{Fluido})}{p(Vp)} = \frac{p(Vp, \text{Fluido})}{\sum_i p(Vp, \text{fluido}_i)} \quad (15)$$

En el ejemplo de la figura 10 existen dos tipos de fluidos posibles, agua y petróleo, la probabilidad de cada fluido para cualquier Vp dada es,

$$p(\text{agua}|Vp) = \frac{p(Vp, \text{Fluido} = \text{agua})}{p(Vp, \text{Fluido} = \text{agua}) + p(Vp, \text{Fluido} = \text{petróleo})} \quad (16)$$

$$p(\text{petróleo}|Vp) = \frac{p(Vp, \text{Fluido} = \text{petróleo})}{p(Vp, \text{Fluido} = \text{agua}) + p(Vp, \text{Fluido} = \text{petróleo})} \quad (17)$$

### **Error de Estimación de Bayes**

El solape de las *pdfs* en la figura 10 implica que las rocas con los dos diferentes contenidos de fluido pueden tener el mismo Vp, por lo tanto la correcta predicción de los fluidos a partir de Vp solamente es imposible. Esto es cierto para la estimación de cualquier propiedad de las rocas, es decir, la estimación exacta a partir de una sola propiedad; los datos geofísicos no permiten predicciones perfectas, siempre hay errores inevitables en la interpretación. El criterio de decisión de Bayes en la selección de la máxima probabilidad en propiedades de rocas garantiza errores

mínimos en la predicción, en comparación con otros criterios de decisión (Takahashi, 2000).

En la figura 11 las zonas coloreadas debajo de cada *pdfs* representan las probabilidades de error para el ejemplo de la figura 10, en el caso A se predice agua cuando el fluido verdadero es petróleo o en el caso B se predice petróleo cuando el fluido verdadero es agua, en este caso la probabilidad de error es,

$$p(error|Vp) = p(agua|Vp), \quad si \quad p(petróleo|Vp) > p(agua|Vp) \Rightarrow Vp < 2.67$$

$$p(error|Vp) = p(petróleo|Vp), \quad si \quad p(agua|Vp) > p(petróleo|Vp) \Rightarrow Vp > 2.67$$

La probabilidad de cometer cualquier error en la predicción puede ser resumida como sigue,

$$p(error) = \int_{Vp < 2.67} p(Vp, Fluido = agua) dVp + \int_{2.67 < Vp} p(Vp, Fluido = petróleo) dVp \quad (18)$$

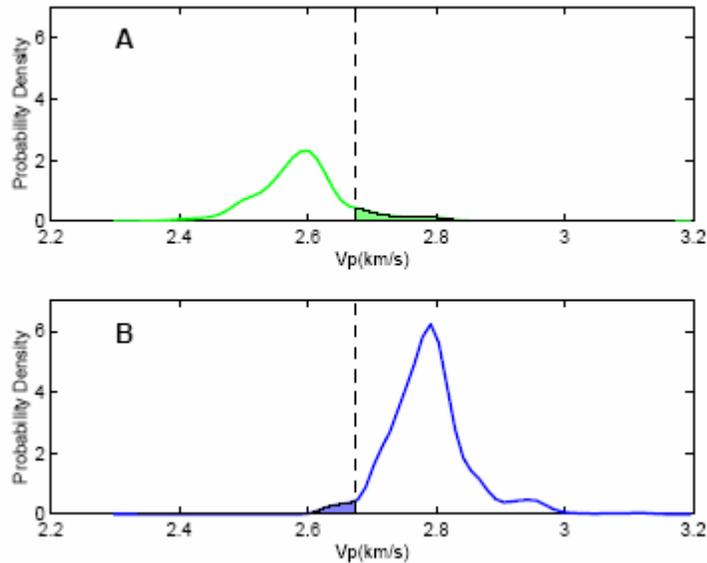


Figura 11. *Pdfs* de  $V_p$  para una arena saturada de agua y una saturada de petróleo. (Tomado de Takahashi, 2000).

La línea punteada corresponde al límite de decisión en la predicción del tipo de fluido (2.67 Km/s), los errores ocurren cuando se predice agua siendo el fluido verdadero petróleo (caso A) y cuando se predice petróleo siendo el fluido verdadero agua (caso B).

La tabla 1 resume las probabilidades de las predicciones correctas y falsas del ejemplo anterior. El error de Bayes puede ser considerado como una medida negativa de la dependencia entre las propiedades físicas del yacimiento y las observadas, cuando las propiedades observadas dependen completamente de las del yacimiento no existe error, por otra parte, un error de Bayes de 0.5 en este ejemplo de dos posibles categorías, implica que no hay información acerca del yacimiento provista por las observaciones (Takahashi, 2000).

Velocidad Observada	$V_p < 2.67 \text{ Km/s}$	$2.67 < V_p \text{ Km/s}$	p(fluido)
	$p(\text{petróleo}   V_p) > p(\text{agua}   V_p)$	$p(\text{agua}   V_p) > p(\text{petróleo}   V_p)$	
Fluido Predicho	Petróleo	Agua	
Verdadero: Petróleo	0.267 Correcto	0.033 Falso	<b>0.300</b>
Verdadero: Agua	0.017 Falso	0.683 Correcto	<b>0.700</b>
<b>Total</b>	<b>0.284</b>	<b>0.716</b>	<b>1.000</b>

Tabla 1. Probabilidades de las predicciones correctas y falsas estimadas a partir de las *pdfs*,  $p(V_p, \text{Fluido})$ . (Modificado de Takahashi, 2000).

## Teoría de Información

La teoría de información introducida por Shannon en 1948 ha sido ampliamente desarrollada en la industria de las comunicaciones, donde se emplea en la compresión y transmisión de datos, dada su versatilidad, esta se ha extendido al área de la física y de la estadística, al igual que en la computación y economía (Gouveia *et al.*, 1996).

Dado que desde cierto punto de vista, la prospección geofísica es un proceso de incrementar la información acerca de las propiedades de los yacimientos, muchas ideas en teoría de información ayudan a entender y describir los problemas que se presentan en la interpretación, dicha teoría proporciona una simple pero poderosa herramienta para cuantificar la información que cada propiedad física brinda para discriminar diferentes objetivos de interés, por lo que es empleada en los cálculos de incertidumbre en la estimación de las propiedades de los yacimientos.

### **Entropía de Información de Shannon**

La entropía de información es un método que se emplea para cuantificar la incertidumbre, ya que esta permite determinar de cierta forma, cuan confiables resultan los cálculos de incertidumbre, por ejemplo, en la figura 9 el valor de entropía en el yacimiento A es 4.17 y 3.63 en el yacimiento B, mostrando una vez mas que la incertidumbre es mayor en A, lo que permite decir que mientras mayor sea el valor de la entropía de información existirá mayor incertidumbre en las predicciones.

Cuando se emplean atributos sísmicos en la interpretación, con este concepto es posible seleccionar el mejor atributo que permita reducir la incertidumbre en la identificación de las propiedades (Mukerji *et al.*, 2001).

La cantidad de información de la propiedad “**X**” de un yacimiento que un atributo “**A**” tiene se define como

$$I(X|A) = H(X) - H(X|A) \quad (19)$$

Donde  $H(\mathbf{X})$  es la entropía de información de Shannon, un parámetro estadístico que cuantifica la variabilidad intrínseca de  $\mathbf{X}$  sin el conocimiento del atributo  $\mathbf{A}$ .  $H(\mathbf{X})$  se puede calcular a partir las *pdfs*.

$$H(X) = -\sum_i p(x_i) \log[p(x_i)] \quad (20)$$

$H(\mathbf{X}|\mathbf{A})$  es la entropía condicional de  $\mathbf{X}$  dado  $\mathbf{A}$ , o lo que es lo mismo, la incertidumbre en  $\mathbf{X}$  después de observar  $\mathbf{A}$ . La información  $I(\mathbf{X}|\mathbf{A})$  se puede interpretar como la reducción en la incertidumbre de la propiedad  $\mathbf{X}$  del yacimiento debido a las observaciones del atributo  $\mathbf{A}$ , por lo tanto, el mejor atributo que se podría seleccionar es aquel que maximice  $I(\mathbf{X}|\mathbf{A})$  (Takahashi *et al.*, 1999b).

### **Relación de Pickett (1963) y Castagna *et al.* (1985)**

Pickett en 1963 publicó un trabajo en el que basado en registros de pozo, datos tomados de la literatura y muestras de núcleos provenientes de varios yacimientos de diferentes partes del mundo, pudo determinar valores de la relación  $V_p/V_s$  para rocas clásticas (areniscas, areniscas calcáreas, dolomitas y calizas), dichas relaciones han sido usadas como medio de control y de referencia para tales litologías. Por su parte Castagna *et al.* En 1985 publicó un trabajo similar, pero con la diferencia de que en él se incluyeron muestras de otras litologías (lutitas y limonitas, entre otras). El resultado final de Castagna *et al.* es una recta, conocida comúnmente en la literatura como “Castagna’s mud rock line”, que se ajusta de manera importante con las diferentes litologías analizadas. Esta recta es frecuentemente usada para estimar valores de  $V_s$  a partir de  $V_p$ . Ambas relaciones se muestran en las figuras 12 y 13.

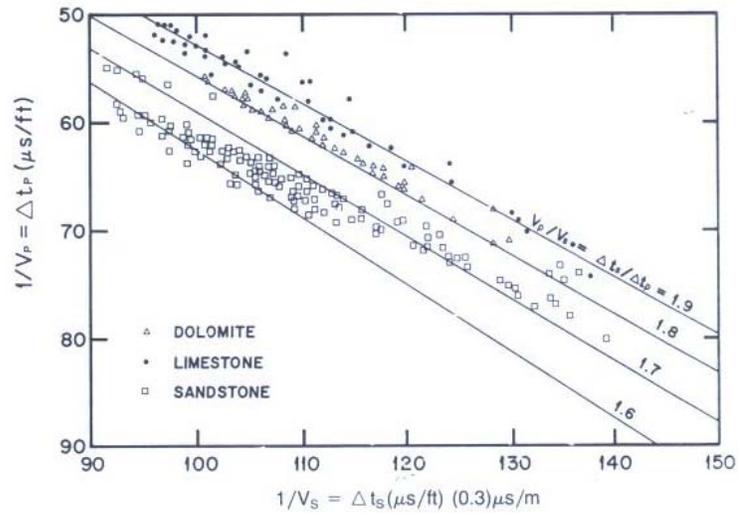


Figura 12. Relaciones obtenidas por Pickett (1963), para dolomitas calizas y areniscas. (Modificado de Pickett, 1963).

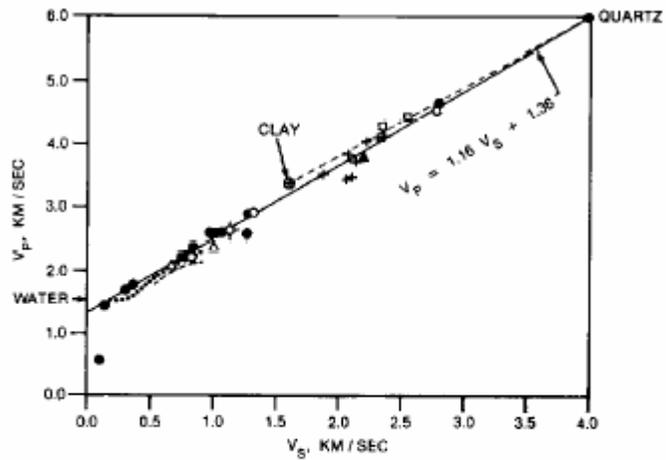


Figura 13. "Castagna's mud rock line". (Tomado de Castagna *et al.*, 1985).

## **CAPÍTULO IV**

### **METODOLOGÍA**

#### **Edición de los registros de pozo**

Para comenzar el estudio se hizo necesario extraer los datos de la relación  $V_p/V_s$  tanto del levantamiento sísmico como de los registros de pozo, en el caso de los registros no se encontró ningún problema ya que estos se encontraban previamente interpretados y con sus marcadores debidamente identificados (Apéndice A). Todos estos registros fueron editados antes de comenzar a trabajar con ellos con la finalidad de eliminar valores anómalos, que estuviesen fuera del rango de los valores posibles y filtrar la presencia de “ruido” (Cova, 2004). El editaje consistió de un suavizado con el cual se eliminaron las altas frecuencias, mientras que los picos anómalos se eliminaron, al mismo tiempo se le asignó manualmente un valor promedio que siguiera con la tendencia del registro (Figura 14).

Cova (2004) menciona que en el caso de los registros sísmicos los valores de tiempo tránsito erróneos se corrigieron con otros registros auxiliares que proporciona la herramienta, es decir, estas herramientas, poseen 2 arreglos de fuentes, una monopolar y una dipolar, igualmente poseen 2 arreglos de receptores de manera que las lecturas por cada combinación fuente receptor son utilizadas por la herramienta para corregir los errores producto de la falta de centralización de la misma, de esta forma las lecturas mencionadas anteriormente pueden ser utilizadas para comparar cada combinación fuente-receptor y detectar posibles errores en el registro. En la figura 15 se muestran tres registros sísmicos de onda S tomados del pozo E. El primero de izquierda a derecha es el producido por una fuente monopolar denominado DTRS, el segundo es el producido por la fuente dipolar denominado DTS mientras que el tercero es el registro final corregido.

En la misma figura se observa como a 11260 pies se presenta un valor anómalo en el registro DTS que no está presente en el DTRS, esto sirvió de ayuda

para corregir tal error, simplemente sustituyendo el tiempo de transito del DTS por el del DTRS.

Finalmente, el valor de la relación  $V_p/V_s$  se obtuvo a partir de los registros sónicos, empleando la siguiente relación a partir de los tiempos de transito:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{\Delta t_s}{\Delta t_p} \quad (21)$$

Donde  $\Delta t_s$ : Tiempo de transito de la onda S

$\Delta t_p$ : Tiempo de transito de la onda P

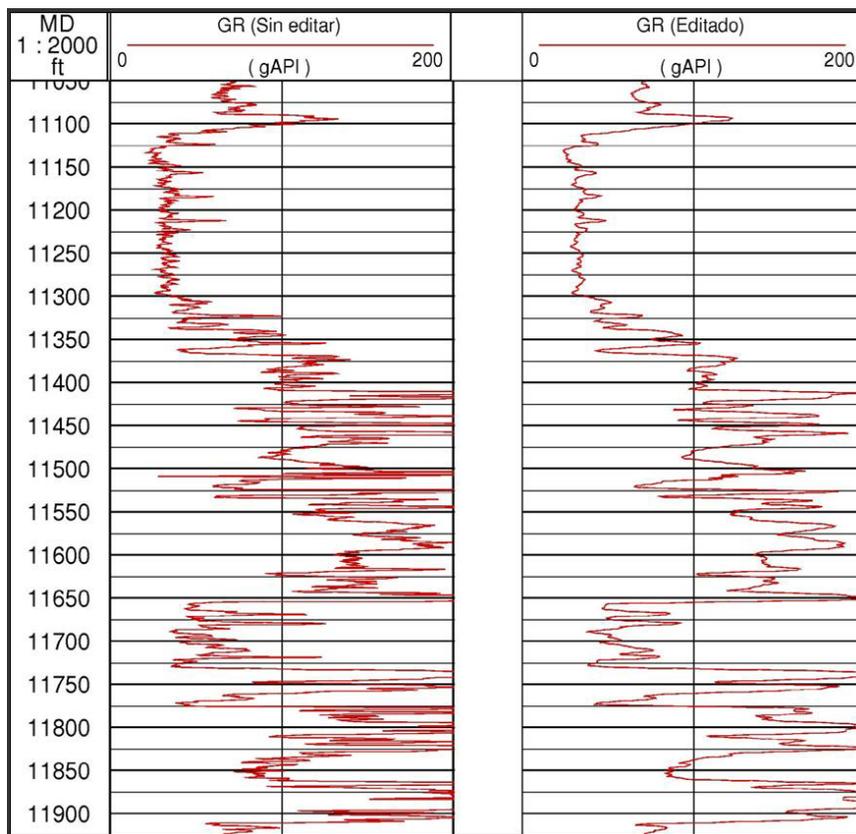


Figura 14. Registro Gamma Ray antes y después de editar del pozo A.  
(Modificado de Cova, 2004).

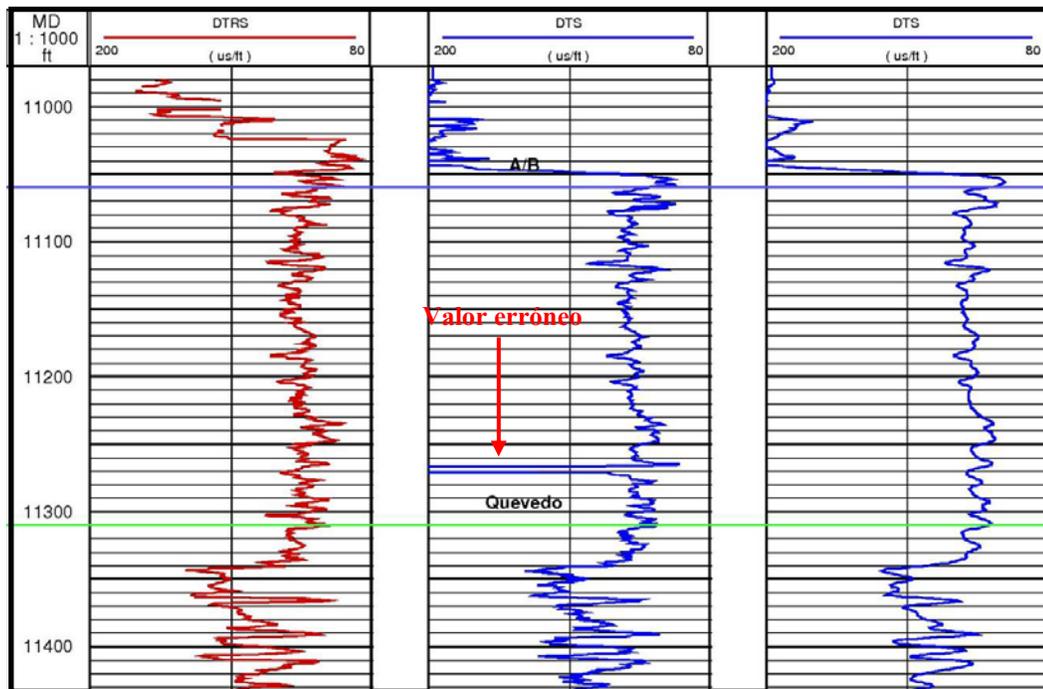


Figura 15. Registro sónico de onda S corregido y suavizado del pozo E.  
(Modificado de Cova, 2004).

En el caso del levantamiento sísmico se presentó una limitación, de las tres secciones que se obtienen de los levantamientos multicomponente (vertical, transversal y radial), la única que se encontraba completamente procesada, incluso migrada e interpretada correspondió a la sección vertical. Como se demostró en el Capítulo III, para obtener la relación  $V_p/V_s$  de los datos sísmicos, es necesario obtener los tiempos de las ondas PP y los de las ondas PS (convertidas), dado que los objetivos del presente trabajo y los presentados por Cova (2004) no incluían el procesamiento completo (hasta el proceso de migración) de las secciones multicomponente y en vista de la necesidad de determinar los tiempos de viaje de las ondas convertidas, se decidió interpretar directamente cada una de las secciones (vertical y transversal) sin migrar, esto con la finalidad de mantener la analogía entre los tiempos obtenidos de las secciones verticales y horizontales.

Cabe destacar que las secciones obtenidas de la componente radial no se tomaron en cuenta en esta fase del estudio debido a la poca resolución que estas presentaban.

## Interpretación de las secciones sísmicas

Para comenzar con la interpretación fue necesario primero ubicar los eventos de interés, para generar el sismograma sintético se construyó el registro de impedancias acústicas y la serie de reflectividad empleando para ello el registro de densidad y el sísmico de onda P procedentes de pozo A, la ondícula necesaria para la convolución se extrajo directamente de los datos sísmicos, esto con la finalidad de obtener un traza sintética lo mas semejante posible a las trazas reales y finalmente, la conversión tiempo-profundidad se llevó a cabo a partir del check shot disponible en el pozo A.

Una vez elaborado el sismograma sintético se empleó para calibrar la sísmica usando para ello, los topes interpretados de los registros del mismo pozo. La figura 16 muestra todos los elementos necesarios para generar el sismograma sintético y la calibración con la información sísmica.

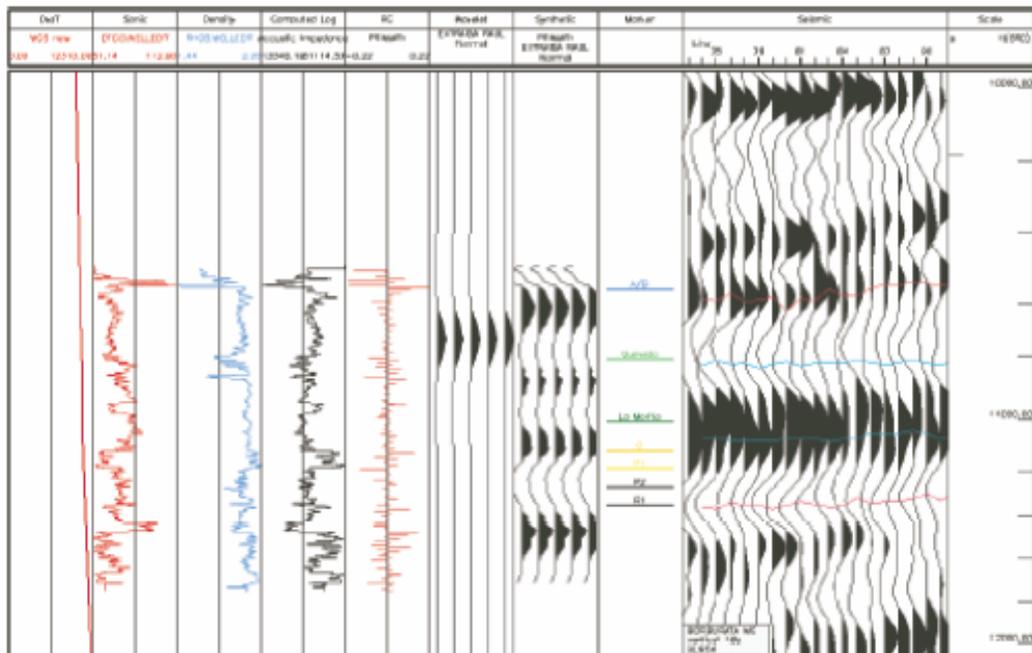


Figura 16. Sismograma sintético y la calibración con la información sísmica.  
(Tomado de Cova, 2004).

La resolución sísmica ( $\lambda/4$ ) resultó ser 49.81 m (163.8 pies), este valor fue calculado con una velocidad intervállica tomada del check shot igual a 3984.4 m/s y una frecuencia dominante de aproximadamente 20 Hz. En la figura 17 se observa el espectro de amplitud extraído de los datos sísmicos de donde se puede observar el valor aproximado de la frecuencia dominante.

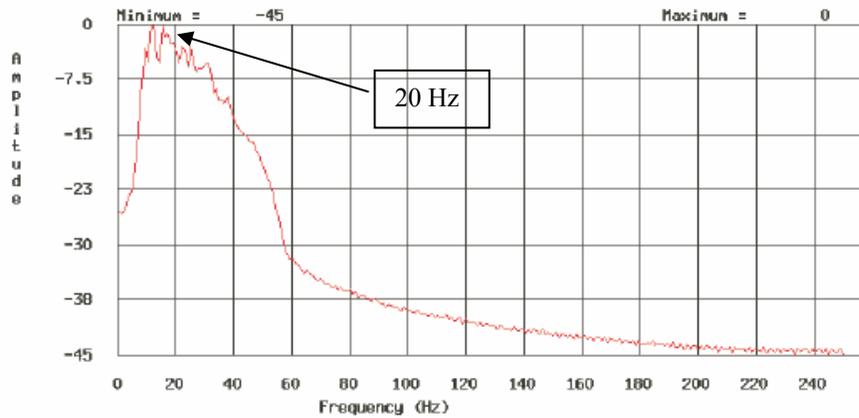


Figura 17. Espectro de amplitud extraído de los datos sísmicos. (Tomado de Cova, 2004).

Para generar el mallado de la relación  $V_p/V_s$  a partir de los tiempos de viaje de las ondas se interpretaron las “inlines” de la siguiente manera; en las zonas que presentaron buena resolución se llevó a cabo cada 5 líneas mientras que en las zonas que presentaron mala resolución la interpretación se llevó a cabo cada línea.

La correlación de los eventos tanto en las secciones verticales como en las horizontales se determinó usando la metodología empleada por Gaiser (1996), de manera resumida esta consiste en determinar un valor promedio de la relación  $V_p/V_s$  que permite escalar los tiempos de viaje de las ondas convertidas en tiempos de viaje de ondas compresionales, con este factor de escala se puede ubicar el mismo evento en cualquiera de las secciones que se tomen, logrando así la correspondencia del mismo evento pero con escalas de tiempo diferente. Cabe destacar que este procedimiento fue llevado a cabo por Cova (2004), pero los resultados obtenidos se incluyeron en el presente trabajo.

## Control de calidad de los datos

Una vez editados los registros de pozo e interpretadas las secciones PP y PS del levantamiento sísmico multicomponente, se llevó a cabo el control de calidad de los datos, este se realizó para los registros de pozo solamente, para esto fue necesario primero extraer los valores de  $V_p$  y  $V_s$  de los intervalos de interés, correspondientes a cada una de las formaciones. Los intervalos seleccionados para cada uno de los pozos se pueden verificar en la tabla 2. La ubicación espacial de los pozos se muestra en la figura 18.

		Prof. (ft)	A	B	C	D	Y	E	F	G	
Fm. Pagüey	Topo						8464		11780	10520	
	Base						10170		11978	12011	
Fm. Gobernador	Topo	11114	11610	11080	11096			11060	12120	12045	
	Base	11350	11900	11337	11350			11309	12371	12310	
Fm. Burguita	Topo		11915								
	Base		11957								
Fm. Nava y	Quevedo	Topo	11372	11968	11348	11379		11313	12415	12314	
		Base	11558	12165	11553	11580		11530	12701	12530	
	La Morita	Topo	11567	12173	11562	11597		11540	12712	12543	
		Base	11650	12251	11642	11687		11624	12816	12626	
Fm. Escandola	Caliza "O"	Topo	11658	12257	11651	11693		11630	12821	12630	
		Base	11728	12317	11706	11759		11688	12886	12687	
	Arena "P1"	Topo	11739	12330	11716	11771		11701	12896	12698	
		Base	11820	12510	11760	11849		11734	12980	12791	
	Arena "P2"	Topo	11824								12796
		Base	11906								12820
	Arena "R1"	Topo	11913	12517							
		Base	12266	12540							

Tabla 2. Intervalos escogidos para cada uno de los pozos.

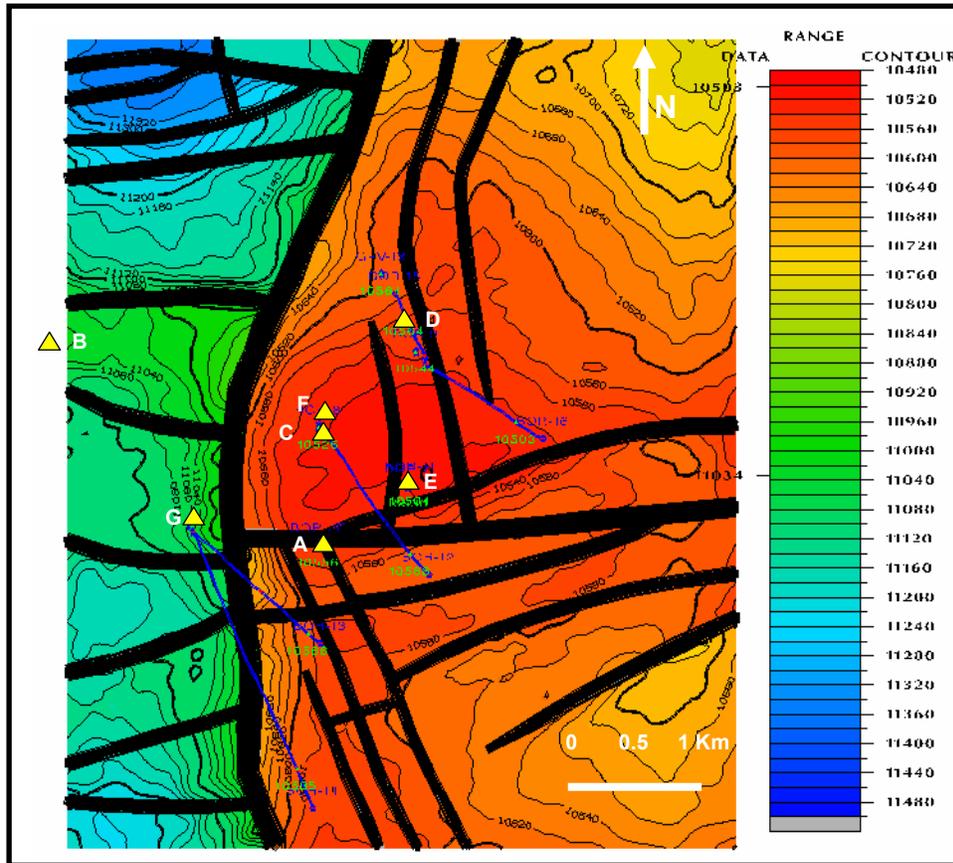


Figura 18. Ubicación de los pozos seleccionados y sus trayectorias (en azul).

Para llevar a cabo el control de calidad de los datos se hizo uso de las relaciones empíricas de Pickett (1963) y Castagna *et al.* (1985) de la siguiente manera; primero se tomaron todos los valores de  $V_p$  y  $V_s$  correspondientes a las formaciones Gobernador y Escandalosa de todos los pozos y se graficaron con la finalidad de comparar la relación  $V_p/V_s$  obtenida de los registros con los resultados obtenidos por Pickett (1963).

Luego, dado que los estudios llevados a cabo por Pickett (1963) no consideraron muestras de otras litologías, como es el caso de las lutitas, lutitas arenosas, limolitas, arenas arcillosas, entre otras, se hizo necesario emplear la relación de Castagna *et al.* (1985) (Figura 13) como modelo de control de calidad de los datos para los intervalos no analizados mediante las relaciones por Pickett (1963). En este

caso los gráficos se obtuvieron para todas las formaciones muestreadas de forma separada en cada uno de los pozos.

Esta relación ha sido ampliamente usada por muchos investigadores, cuyos resultados han corroborado la adaptabilidad y funcionalidad de dicha relación a yacimientos de todo el mundo, inclusive en yacimientos de Venezuela.

### **Correlación de la relación $V_p/V_s$ extraída de los registros de pozo con la obtenida del levantamiento sísmico**

Para determinar la correlación entre las relaciones  $V_p/V_s$  obtenidas del levantamiento sísmico y de los registros de pozo se tomaron los valores de  $V_p/V_s$  extraídos de los registros, correspondientes a cada intervalo de interés y se promediaron. Los valores de  $V_p/V_s$  correspondientes a la sísmica se calcularon a partir de los tiempos de las reflexiones de las ondas PP y PS mediante la ecuación (5). Este cálculo se llevó a cabo en las coordenadas exactas en la cual el pozo intersecta a la formación de interés en cada uno de los casos.

Una vez obtenidos los valores de  $V_p/V_s$  para las formaciones Gobernador y Escandalosa, tanto para los registros de pozo como para la sísmica, construyeron gráficos que permitieron mediante un ajuste lineal por mínimos cuadrados establecer la correlación entre la relación  $V_p/V_s$  para cada formación. Esto se llevó a cabo con la finalidad de extrapolar espacialmente mediante la sísmica, el cálculo de incertidumbre obtenido a partir de los registros de pozo.

### **Simulación de Monte Carlo**

Como se mencionó anteriormente esta es una técnica ampliamente usada en muchos campos de la investigación, en este caso se empleó la simulación como paso previo al cálculo de la incertidumbre en la predicción de litologías. Para producir los números aleatorios que permitieran hacer de manera mas robusta los cálculos probabilísticos además de aumentar el muestreo, fue necesario primero establecer la

metodología a usar, para ello fue necesario construir los gráficos  $V_p$  vs  $V_s$ , estos se generaron de manera separada para la formaciones Gobernador, Navay y para los miembros “O” y “P1” de la Formación Escandalosa en cada uno de los pozos, una vez obtenidos dichos gráficos se les llevó a cabo un ajuste lineal por mínimos cuadrados, de la recta obtenida para cada uno de los casos, se fijo  $V_p$ , luego con el generador de números aleatorios (para el cual fue necesario diseñar un código en el programa Matlab versión 6.5) se obtuvieron valores de  $V_s$ , un total de 10000, para luego por medio de las rectas de ajuste “devolver” el procedimiento y así obtener los nuevos valores de  $V_p$ , de esta manera se construyeron aleatoriamente un total de 10000 pares  $V_p$ - $V_s$ , los cuales satisfacen en cada uno de los casos las rectas de ajuste, estos valores se añadieron a los datos ya existentes.

Los números aleatorios se construyeron siguiendo una distribución normal, siendo el eje de simetría la media de la población de  $V_s$  de cada formación en cada uno de los pozos, el valor de la desviación estándar también se empleó de manera similar en dicha construcción.

En la figura 19 se muestra un ejemplo de una función de densidad de probabilidad (*pdfs*), obtenida antes y después de la simulación para los valores de  $V_p/V_s$  pertenecientes a la Caliza “O”, en el pozo G. Nótese el solapamiento de las curvas obtenidas con los valores simulados y con los valores luego de añadir los datos sin simulación, esto se debe a que la contribución de los datos sin simulación es despreciable en comparación con los datos generados, en este caso en particular, los datos muestreados previamente son 114 (correspondientes al intervalo “O” de 57 pies de espesor, muestreados cada 0,5 pies), mientras que los generados corresponden a 10000.

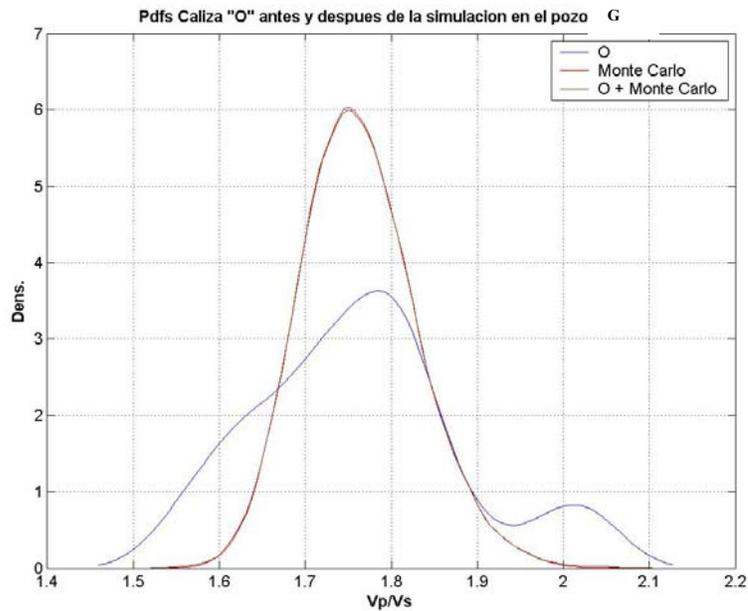


Figura 19. Pdfs antes y después de la simulación para valores de Vp/Vs pertenecientes a la Caliza “O” en el pozo G.

### **Cálculo de Incertidumbre y Entropía de Información de Shannon**

Una vez generadas las *pdfs* se procedió a calcular la incertidumbre en la predicción empleando la teoría de decisión Bayesiana (Ec. 18), tal cual se describió en el Capítulo III, de la misma forma se calculó la entropía de información de Shannon mediante el uso de la ecuación 20.

### **Construcción de los mapas de riesgo**

Los mapas de riesgo se construyeron tomando los valores de las probabilidades calculadas por el método de Bayes, para ello se tomaron las probabilidades de la diagonal principal de la matriz de confusión, es decir, la correspondiente a la probabilidad de la predicción dada la verdadera,  $p(\text{predicción}|\text{verdadero})$ . Con los valores de probabilidad y conociendo las

coordenadas exactas de la ubicación de cada uno de los pozos se interpolaron con el uso del kriging cada uno de los valores de probabilidad.

Se construyeron 3 mapas, dos que presentan los valores de probabilidad en la predicción de las arenas dado que verdaderamente son arenas ( $p(\text{arenas}|\text{arenas})$ ), este procedimiento se llevó a cabo de manera separada tanto para las arenas de la Formación Gobernador como para la Arena “P1”. De manera análoga se construyó el mapa correspondiente al tope de Caliza “O”, pero empleando  $p(\text{caliza}|\text{caliza})$ .

Empleando los valores calculados de la entropía de información de Shannon ( $H(x)$ ), y empleando el kriging como método de interpolación, se generaron los mapas de los topes de la Formación Gobernador, Caliza “O” y Arena “P1”, con la finalidad de integrar dichos mapas con los mapas de isoprobabilidades para minimizar el riesgo en la interpretación además de facilitarla.

Dado que no es de interés prospectivo elaborar un mapa del tope de una formación lutítica, no se generaron los mapas correspondientes al tope de la Formación Navay, pero hay que aclarar que dicha formación se tomó en cuenta para el cálculo de incertidumbre y de entropía de información de Shannon.

## CAPÍTULO V RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

### Interpretación de las secciones sísmicas

En la figura 20 se muestran una sección sísmica de la componente vertical y una de la componente transversal extraída del levantamiento sísmico, en la cual se pueden observar los topes de las formaciones Gobernador y Escandalosa interpretados, los marcadores y una traza sintética en color rojo que representa el factor de escalamiento propuesto por Gaiser (1996), el cual permitió correlacionar los tiempos interpretados en las secciones verticales con los tiempos interpretados en las transversales.

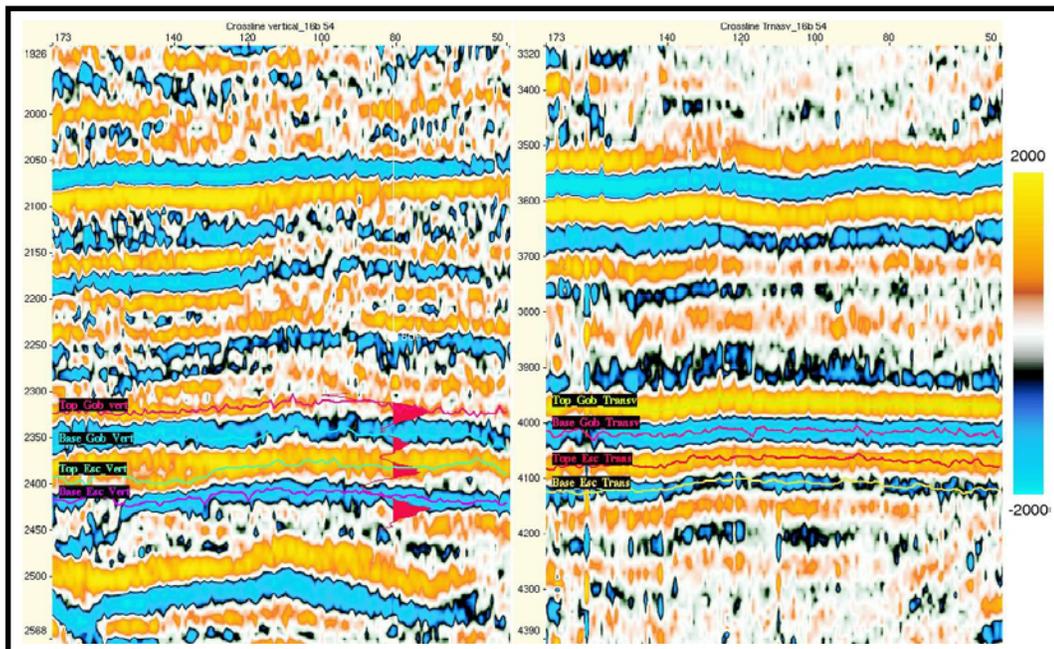


Figura 20. Topes de las formaciones Gobernador y Escandalosa interpretados, marcadores y correlación entre los eventos de ambas secciones. (Tomado de Cova, 2004).

## Control de calidad de los datos

De los valores de  $V_p$  y  $V_s$  obtenidos de los registros de pozo se muestran los siguientes gráficos de Pickett (1963), para las formaciones Gobernador y Escandalosa,( Figuras 21 a la 23).

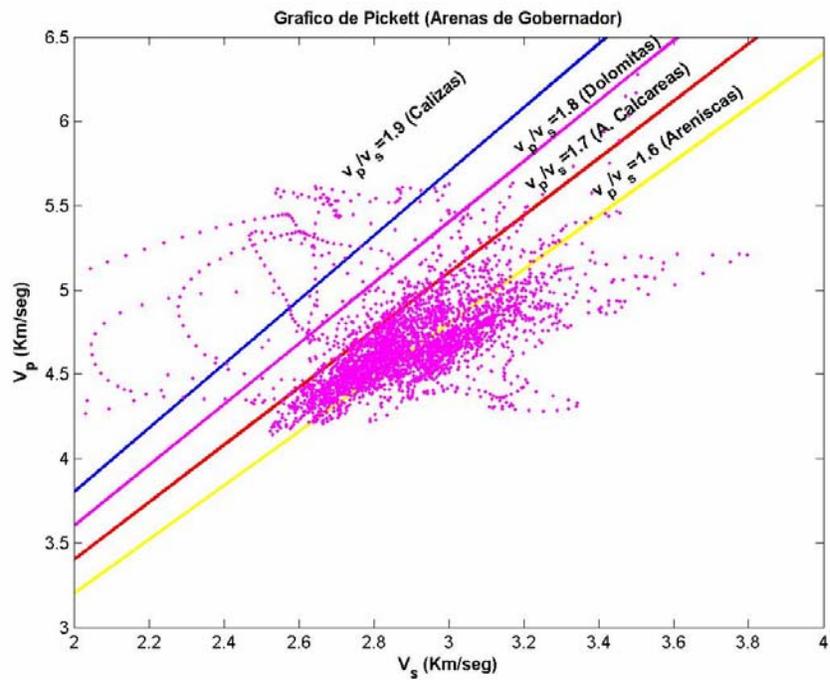


Figura 21. Gráfico de Pickett. Formación Gobernador.

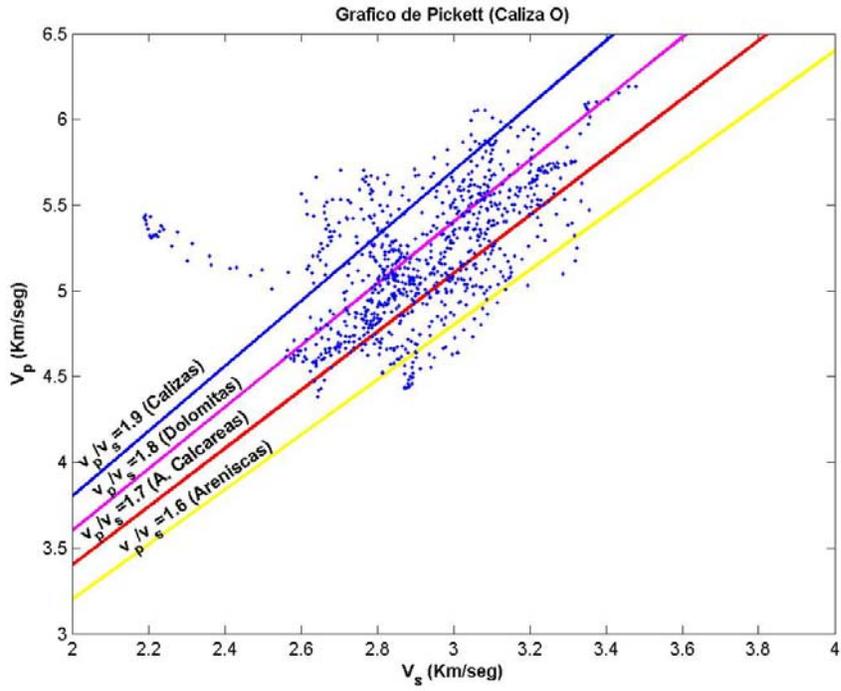


Figura 22. Gráfico de Pickett. Caliza "O" (Fm. Escandalosa).

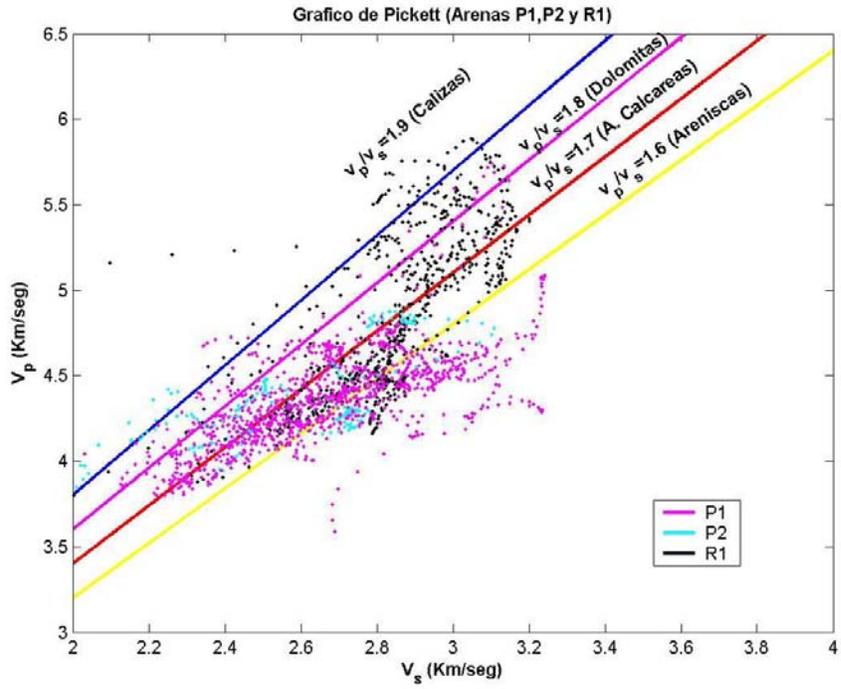


Figura 23. Gráfico de Pickett. Arenas P1, P2 y R1 (Fm. Escandalosa).

Cabe mencionar que el control de calidad se llevó a cabo para las diferentes litologías de interés pertenecientes a cada formación, es decir, se tomaron los valores de  $V_p$  y  $V_s$  para el intervalo correspondiente a la Formación Gobernador (Figura 21). Se puede apreciar como la nube de puntos se ubica alrededor de las rectas determinadas por Pickett (1963), para las arenas limpias y arenas calcáreas. Se observa la existencia de puntos que caen inclusive fuera de las rectas, esto puede ser atribuido a que el espesor total de la Formación Gobernador no está constituido esencialmente de arenas limpias, allí se encuentran presentes intercalaciones con limolitas y lutitas, las cuales podrían estar afectando a las velocidades sísmicas de manera tal, que se produzcan este tipo de respuestas.

El control de calidad de los datos pertenecientes a la Formación Escandalosa (Figuras 22 y 23) también se llevó a cabo de manera separada, esto se hizo con la finalidad de observar de manera más detallada el comportamiento de la relación  $V_p/V_s$  en intervalos calcáreos, como es el caso de la Caliza "O" o Miembro Guayacán, como se conoce en la literatura, y para intervalos arenosos como es el caso de las arenas P1, P2 y R1. De manera análoga al análisis anterior, se puede apreciar como los puntos se ubican dentro de las rectas obtenidas por Pickett, observándose solo una pequeña cantidad de puntos que caen fuera de las rectas. Es de gran importancia acotar que, aun cuando las arenas P1, P2 y R1 presentan intercalaciones de menor orden con lutitas, la distribución de los valores de  $V_p$  y  $V_s$  es aceptable. En el caso de la Caliza "O", se aprecia como la mayor cantidad de puntos se ubican más hacia la parte superior del gráfico, cercano a las rectas obtenidas para las dolomitas y las calizas lo cual es consistente con los resultados obtenidos por Pickett (1963).

Un aspecto que se debe tener en consideración es que las muestras analizadas por Pickett estaban constituidas por arenas limpias, arenas calcáreas, calizas y dolomitas. Él a estos núcleos de roca, le realizó análisis de laboratorio muy bien controlados, y adicionalmente los registros de pozo que utilizó fueron cuidadosamente seleccionados. En general este tipo de tendencias observadas por Pickett dependen sólo de la litología y son independientes de la porosidad y de la presión ejercida por la columna estratigráfica. Por lo que, aun cuando, se puede

observar de la figura 21 a la 23, que los puntos no se ubican a lo largo de las rectas bien definidas, las litologías presentes en la zona de estudio permiten constatar que los datos son consistentes y apropiados para el estudio.

Los resultados obtenidos por Pickett (1963) no consideraron muestras de lutitas, limolitas, entre otras, por esta razón se debe emplear la relación de Castagna *et al.* (1985), sabiendo que la Formación Pagüey y los miembros Quevedo y La Morita, pertenecientes a la Formación Navay están constituidos esencialmente por lutitas. La Formación Burgüita consiste de areniscas limolíticas con intercalaciones lutíticas, mientras que las ya mencionadas anteriormente, Gobernador y Escandalosa están constituidas esencialmente por arenas excepto la Caliza “O” de la Formación Escandalosa.

Con la finalidad de apreciar en su totalidad los intervalos seleccionados para cada pozo se construyeron los gráficos  $V_p$  vs  $V_s$  siguiendo como modelo la relación obtenida por Castagna *et al.* (1985), (Figuras 24 a 31).

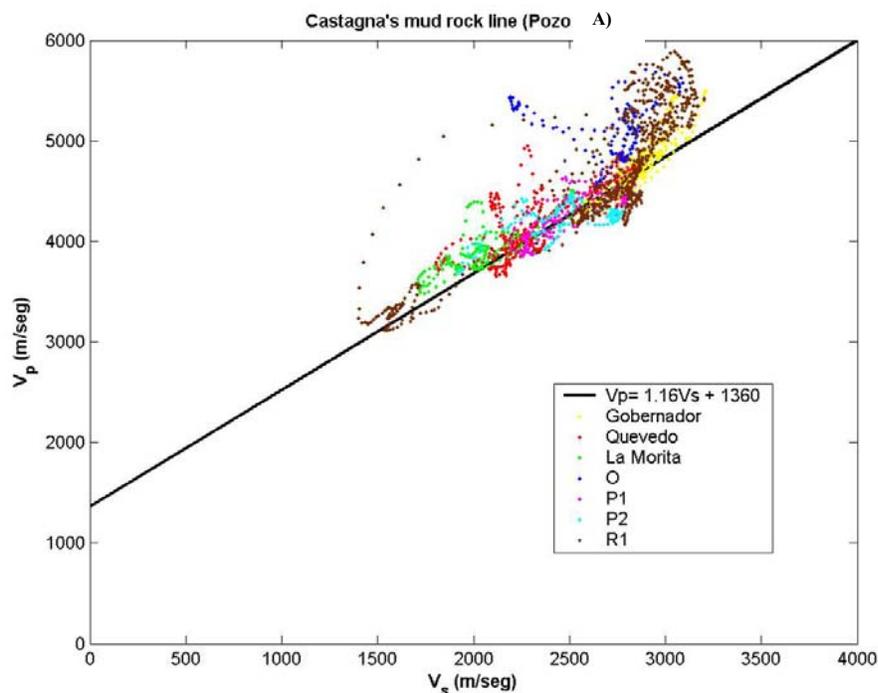


Figura 24 Valores de  $V_p$  y  $V_s$  para todos los intervalos seleccionados en el pozo A junto con la relación obtenida por Castagna *et al.* (1985).

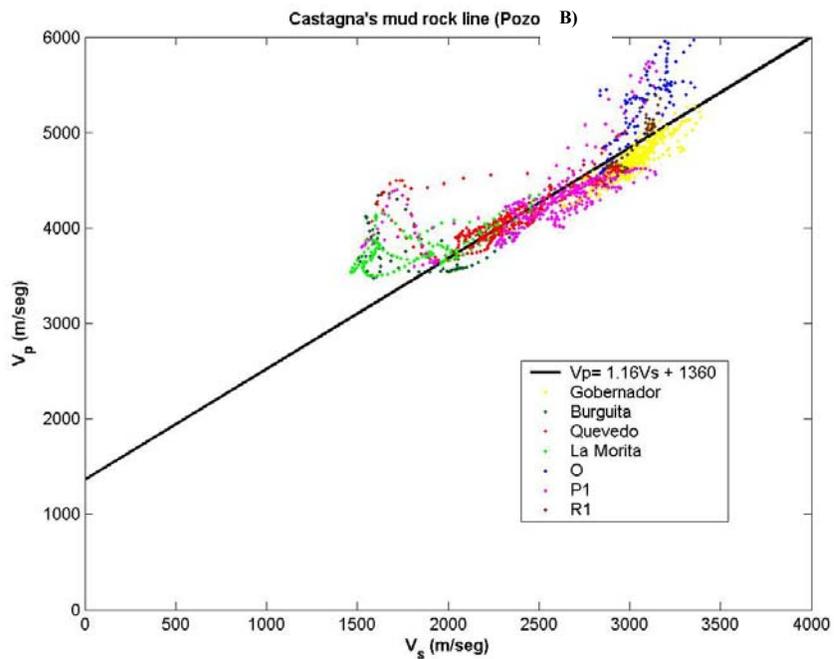


Figura 25 Valores de  $V_p$  y  $V_s$  para todos los intervalos seleccionados en el pozo B junto con la relación obtenida por Castagna *et al.* (1985).

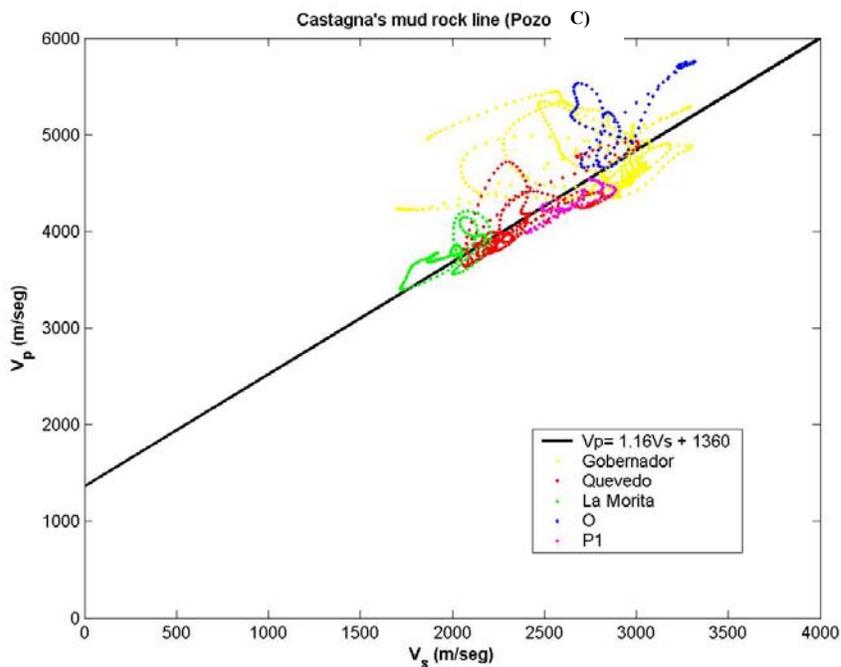


Figura 26 Valores de  $V_p$  y  $V_s$  para todos los intervalos seleccionados en el pozo C junto con la relación obtenida por Castagna *et al.* (1985).

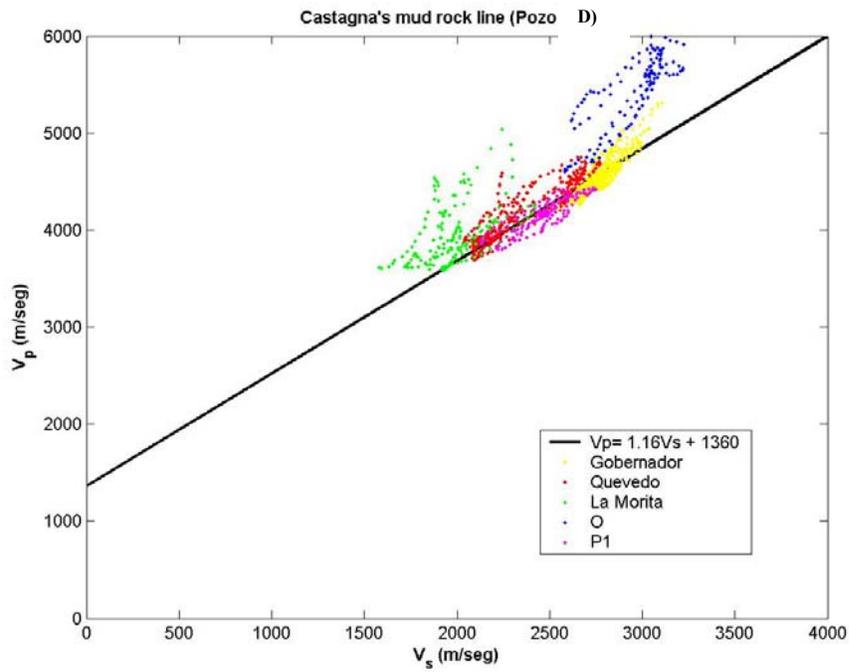


Figura 27 Valores de  $V_p$  y  $V_s$  para todos los intervalos seleccionados en el pozo D junto con la relación obtenida por Castagna *et al.* (1985).

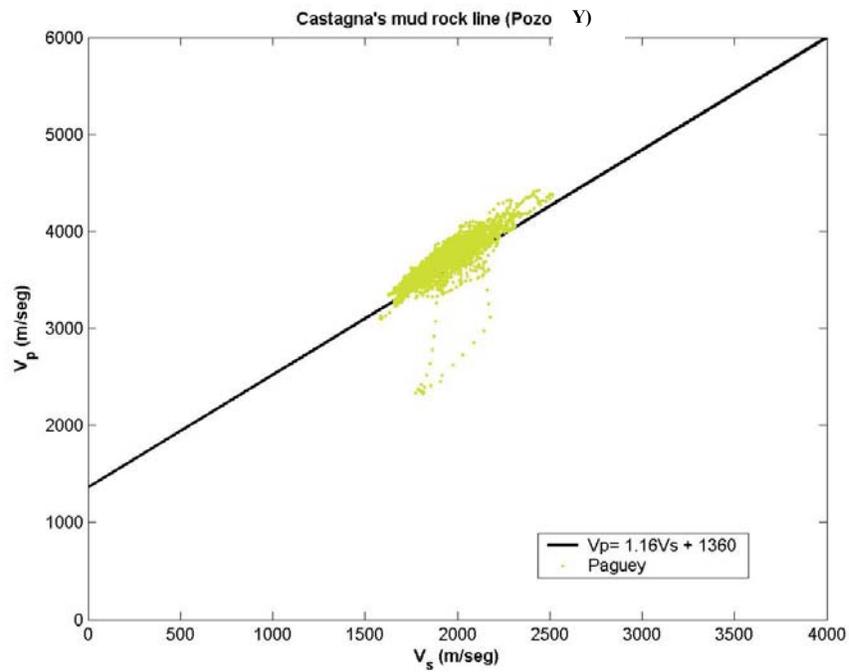


Figura 28 Valores de  $V_p$  y  $V_s$  para el intervalo seleccionado en el pozo Y junto con la relación obtenida por Castagna *et al.* (1985).

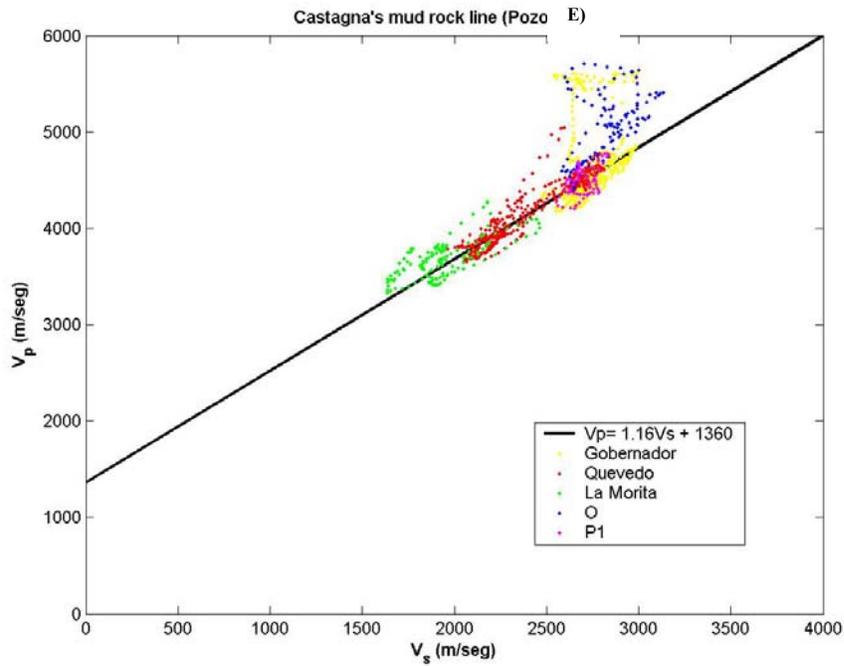


Figura 29 Valores de  $V_p$  y  $V_s$  para todos los intervalos seleccionados en el pozo E junto con la relación obtenida por Castagna *et al.* (1985).

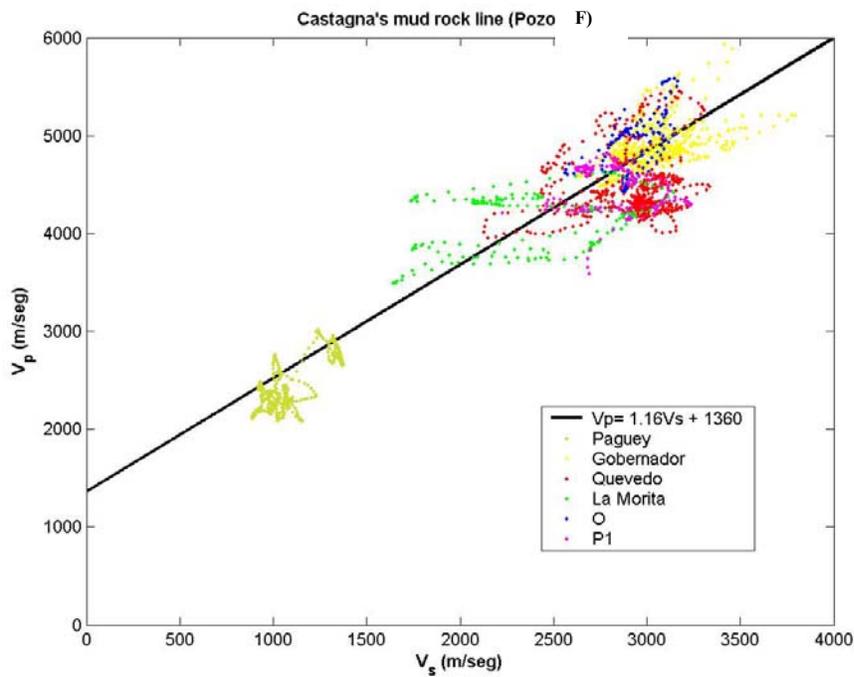


Figura 30 Valores de  $V_p$  y  $V_s$  para todos los intervalos seleccionados en el pozo F junto con la relación obtenida por Castagna *et al.* (1985).

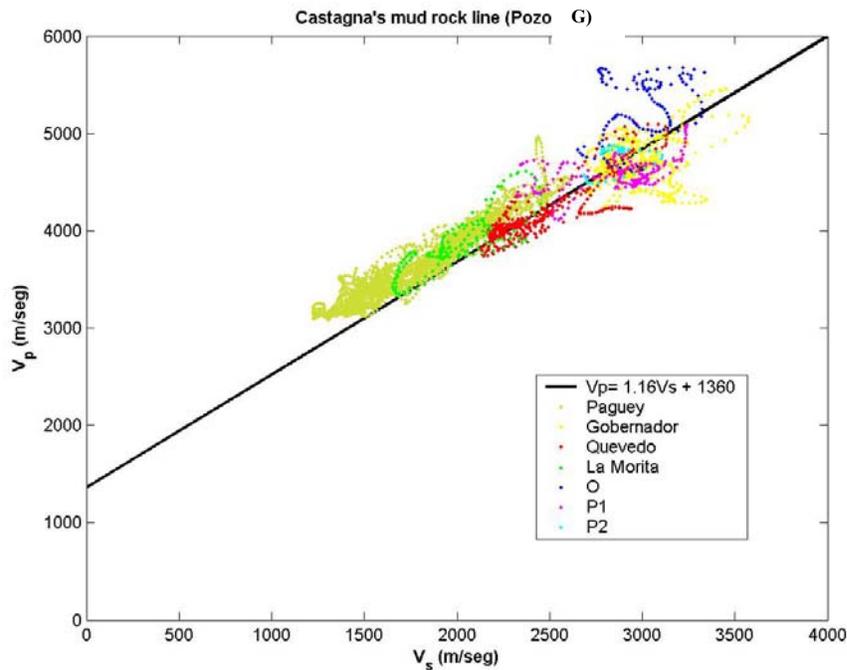


Figura 31 Valores de V<sub>p</sub> y V<sub>s</sub> para todos los intervalos seleccionados en el pozo G junto con la relación obtenida por Castagna *et al.* (1985).

El empleo de esta relación como modelo de control de calidad permite, en muchos casos, poder discriminar *a priori* los grupos litológicos con propiedades físicas semejantes, por ejemplo, en el caso del pozo A (Figura 24), se puede apreciar como las arenas de Gobernador y las arenas de Escandalosa se ubican desde la parte intermedia a la parte superior de la nube de puntos siguiendo la tendencia de la recta, en la parte superior también se ubican los puntos correspondientes a la Caliza “O”, lo cual indica que los valores de velocidad para las ondas P y para las ondas S son coherentes con las litologías. Presentando valores menores de V<sub>p</sub> y V<sub>s</sub>, se ubican los puntos correspondientes a la Formación Navay, representada por los miembros Quevedo y La Morita. En el caso del pozo B (Figura 25), también se observa que los puntos se ubican sobre la trayectoria de la recta, de igual forma se observa como las arenas tienden a agruparse en la parte superior de la recta mientras que las lutitas se agrupan en la parte inferior. Cabe destacar que el Miembro Quevedo se ubica en la zona intermedia de la nube de puntos (como en una especie de punto medio de las dos

distribuciones), recordemos que su litología predominante consiste de lutitas intercaladas con arenas. Este mismo comportamiento se asemeja al observado en los pozos D, E y G (Figuras 27, 29 y 31 respectivamente).

En el caso del pozo G se aprecia un elemento adicional, la presencia de la Formación Pagüey, esta formación es de mucha importancia, ya que además de representar el sello regional por excelencia de la Cuenca de Barinas, corrobora el comportamiento de la relación  $V_p/V_p$  en formaciones arcillosas.

El pozo Y (Figura 28), muestra únicamente los valores de velocidad pertenecientes a la Formación Pagüey, ya que por razones desconocidas, no se pudo completar el perfilaje del pozo, al igual que en la figura 26, se observan los puntos muy bien agrupados y de velocidades consistentes con las lutitas.

El pozo C (Figura 26) presenta valores de velocidades bien agrupados, se observa un comportamiento similar al de los pozos anteriores con la excepción de las arenas de Gobernador, cuyo carácter disperso en una zona del gráfico, hace pensar que quizás se presentaron problemas con la herramienta sónica en el pozo (Apéndice A), si se observa el registro, se puede notar que en lo que corresponde al intervalo Gobernador cuyo tope se define con el marcador A/B se presenta en el registro caliper una zona de derrumbe de consideración, la cual podría haber afectado el funcionamiento de la herramienta, nótese también que en los primeros 100 pies del registro (intervalo A/B) se aprecia un comportamiento irregular en las curvas, estas presentan algunos picos de importancia los cuales podrían ser consecuencia de los denominados “saltos de ciclo”. Los saltos de ciclo se producen cuando la onda directa se atenúa de manera considerable, de tal forma que no es percibida por los receptores de la herramienta, estos reciben señales que arriban con tiempos mayores, lo que se traduce en ondas que se propagan con velocidades menores, estos picos pudieran deberse también a causa de errores en la lectura de la herramienta sónica, o simplemente podrían ser consecuencia de la invasión del lodo de perforación durante la corrida del registro.

El pozo F (Figura 30) también muestra los valores de velocidad con cierta dispersión, no se podría decir con exactitud cual es la causa de este comportamiento,

este pozo no cuenta con registro caliper, por lo que resulta difícil justificar los valores de velocidad anómalos con problemas del pozo, llama la atención el hecho de que los valores de velocidad para las lutitas de la Formación Pagüey son relativamente bajos, nótese que las velocidades de las ondas S se encuentran cercanas a los 1000 m/s, inclusive menores, mientras que las velocidades de las ondas P se encuentran entre 2000 y 3000 m/s, resulta difícil creer que una capa de lutitas que se encuentra a aproximadamente 12000 pies, es decir, a más de 3500 m de profundidad presente tales valores de velocidad, además, las velocidades que se observan en las figuras 18 y 21 correspondientes a la Formación Pagüey no corresponden con las observadas en el pozo F, esto indica que es muy probable que las lecturas tomadas por la herramienta sónica dipolar no sean consistentes con las litologías presentes, al igual que en el caso anterior, estas respuestas también podrían ser atribuidas a la invasión del lodo de perforación, errores con la herramienta sónica o saltos de ciclo, es posible también que la trayectoria del pozo haya influido de cierta forma en los valores de velocidad que pudiesen ser considerados como anómalos, ya que esta, al igual que la del pozo G es desviada.

De aquí se observa algo muy importante, el hecho de que quizás sea posible discriminar arenas de lutitas mediante el empleo de la relación de Castagna *et al.* (1985), pero resulta muy ambiguo poder discriminar arenas de arenas mediante la relación, debido al solapamiento que existe entre cada una de ellas, así pertenezcan a formaciones diferentes.

Cabe destacar que en esta parte del estudio no se consideró eliminar los valores de velocidad que pudiesen ser considerados como erróneos o anómalos, dado que estos forman parte de la variabilidad intrínseca natural en las propiedades físicas de las rocas.

Para finalizar esta sección, a continuación se muestran dos tablas en las que se presentan los rangos teóricos de velocidades P y S de diferentes rocas sedimentarias (Tabla 3), otra con los rangos obtenidos de los registros de pozo para los distintos intervalos seleccionados, así como la relación  $V_p/V_s$  tanto obtenidas como las teóricas según las diferentes litologías. En la tabla 4 sólo se muestran la Caliza “O” y

la arena “P1” pertenecientes a la Formación Escandalosa, ya que estas son las únicas que se encuentran muestreadas en todos los pozos.

Litología	Vp/Vs
Areniscas	1.59-1.76
Areniscas Calcáreas	1.67-1.76
Dolomitas	1.78-1.84
Calizas	1.84-1.99
Lutitas	1.70-3.00

Tabla 3. Rangos teóricos de Vp/Vs para distintas rocas sedimentarias. (Modificado de Tatham y McCormack, 1991).

Formación	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Vp/Vs
Pagüey	2454-3637	1097-1778	2.08-2.25
Gobernador	4562-4909	2735-3055	1.55-1.7
Navay*	3981-4079	2130-2305	1.78-1.91
Caliza O	4921-5431	2698-3094	1.68-1.84
Arena P1	4155-4579	2466-2859	1.58-1.73

Tabla 4. Rangos de Vp, Vs y Vp/Vs obtenidos para los diferentes intervalos. (\*) No incluye resultados del Pozo F. (Modificado de Cova, 2004).

En las tablas se aprecia como las arenas de Gobernador y la Arena “P1” coinciden con los valores teóricos de Vp/Vs, éstos sólo se encuentran ligeramente por debajo del límite inferior, las lutitas de Pagüey y de Navay también coinciden con los valores teóricos, sin embargo la Caliza “O” presenta los valores por debajo del rango teórico, hay que recordar que aun cuando tales valores teóricos han sido obtenidos de registros provenientes de diferentes yacimientos, también han sido obtenidos a partir de cuidadosas pruebas de laboratorio, quizás por esto no coincidan perfectamente los valores obtenidos con los rangos teóricos de Vp/Vs para las calizas.

## **Correlación entre la relación Vp/Vs extraída de los registros de pozo y del levantamiento sísmico**

En las figuras 32 y 33 se muestran los gráficos obtenidos para determinar la correlación entre las relaciones Vp/Vs, en ambos gráficos se puede observar que el coeficiente de correlación es bastante bajo, en el caso de la Formación Gobernador es -0,16 mientras que en el caso de la Formación Escandalosa resultó ser 0.53, resulta difícil poder explicar porque resultaron tales valores, habría que tomar en consideración que aun cuando la naturaleza de las velocidades derivadas de los registros de pozo y del levantamiento sísmico son diferentes, debido a que el contenido de frecuencias presentes en los datos sísmicos es del orden de los Hz, mientras que en los registros de pozo es del orden de los KHz, se esperaban coeficientes de correlación mas altos, la cantidad de datos también podría estar influyendo en este resultado ya que esta es muy limitada, solo se están correlacionando 6 pozos.

Hay que recordar que los valores de Vp/Vs se obtuvieron no de valores de velocidad directamente sino de una relación empírica que emplea los tiempos de viaje de las ondas, tomados de secciones sísmicas sin migrar, aun cuando los eventos que se observan en las secciones migradas no representan estructuras complejas, la falta de resolución en estas podría estar influyendo en los tiempos tomados de la interpretación y por ende en los valores obtenidos de Vp/Vs. La resolución vertical ( $\lambda/4$ ) obtenida de la interpretación de las secciones sísmicas para una frecuencia dominante de 20 Hz resultó ser 49.80 m (163.8 pies) lo que, en el caso de los miembros "O" y "P1" de la Formación Escandalosa afecta en gran medida ya que el espesor de estos dos miembros en los 6 pozos no superan los 168.3 pies. De igual forma se trazaron dos transectos para las formaciones Gobernador y Escandalosa, uno N-S que incluye los pozos D, F, C, E y A y uno N45°E que incluye los pozos G, C, F y D en los que se aprecia que no existe ningún tipo de dependencia entre los valores de Vp/Vs obtenidos del levantamiento sísmico y los obtenidos de los registros de pozo (Apéndice B).

Buscando una forma alternativa de correlacionar la relación Vp/Vs obtenida del levantamiento sísmico con información de pozo, se construyeron gráficos Vp/Vs vs Vsh (volumen de arcilla) y Vp/Vs vs Porosidad, pero de igual forma los resultados no fueron satisfactorios (Apéndice B).

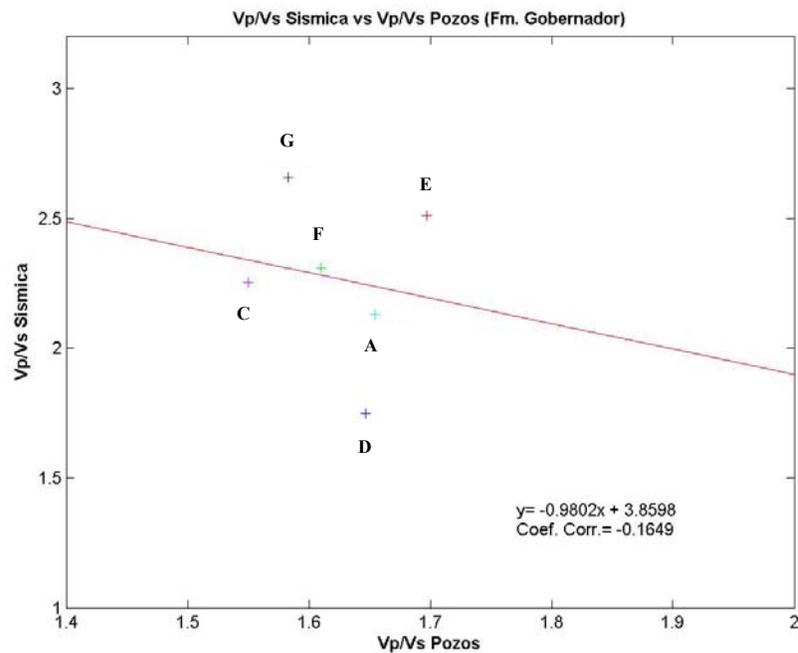


Figura 32. Gráfico Vp/Vs del levantamiento sísmico vs Vp/Vs de los registros de pozo para la Fm. Gobernador.

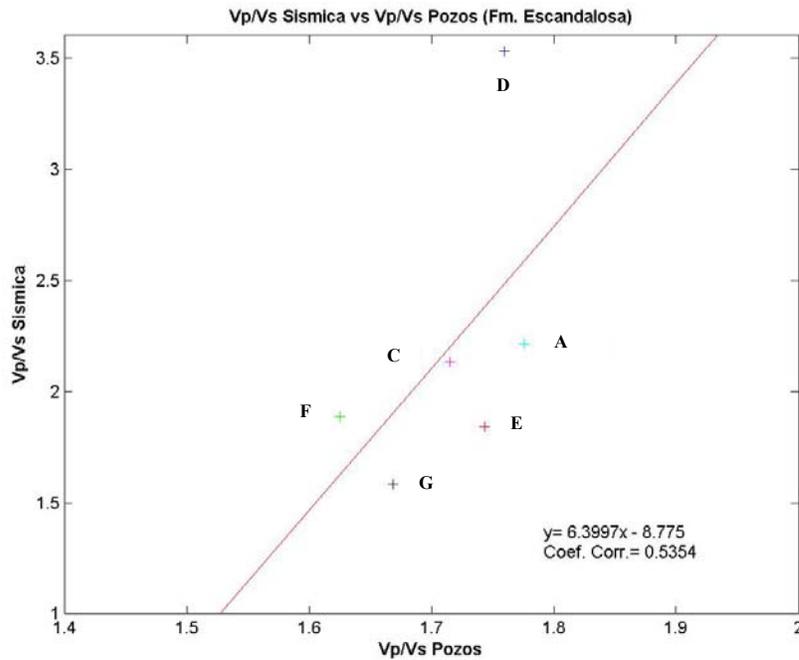


Figura 33. Gráfico Vp/Vs del levantamiento sísmico vs Vp/Vs de los registros de pozo para la Fm. Escandalosa.

### Simulación de Monte Carlo

De la figura 34 a la 39 se presentan algunas de las gráficas que sirvieron como punto de partida para generar por medio del método de Monte Carlo las velocidades simuladas y sus respectivos histogramas de frecuencia con los valores de promedio y desviación estándar para cada una de las formaciones en cada uno de los pozos, en el apéndice C se muestran completamente cada uno de los gráficos y sus histogramas de frecuencia. Cabe resaltar que con la finalidad de hacer mas exacto el análisis probabilístico, en esta parte del estudio se decidió eliminar los valores anómalos de velocidad que se observaron en ciertos pozos.

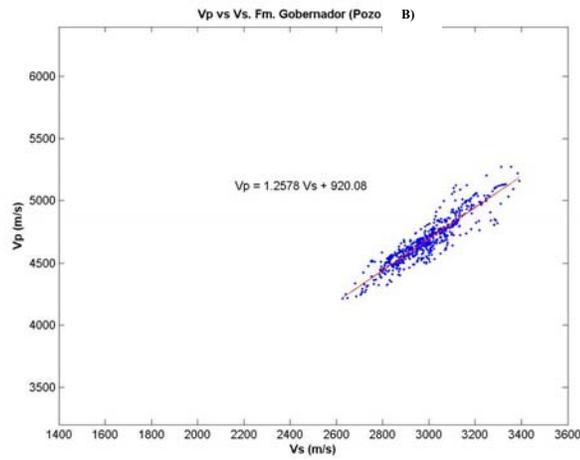


Figura 34. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Fm. Gobernador (Pozo B).

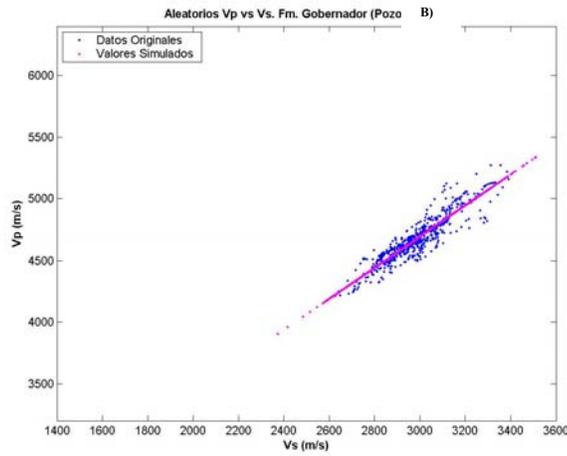


Figura 35. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Fm. Gobernador (Pozo B).

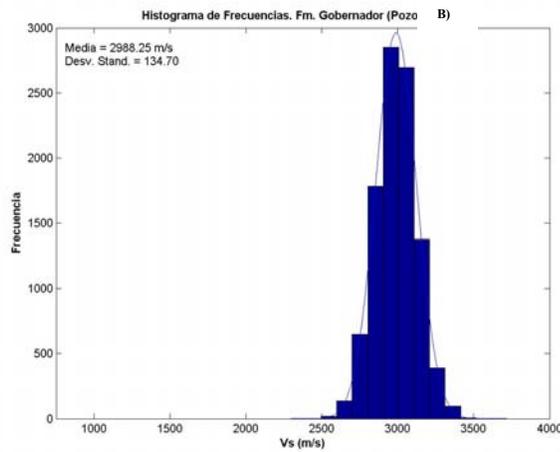


Figura 36. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Fm. Gobernador (Pozo B).

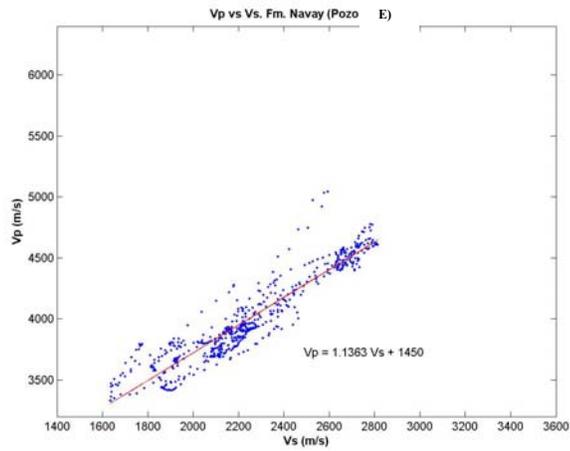


Figura 37. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Fm. Navay (Pozo E).

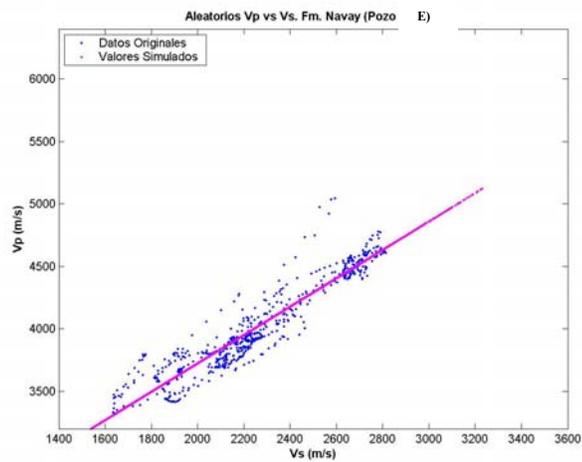


Figura 38. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Fm. Navay (Pozo E).

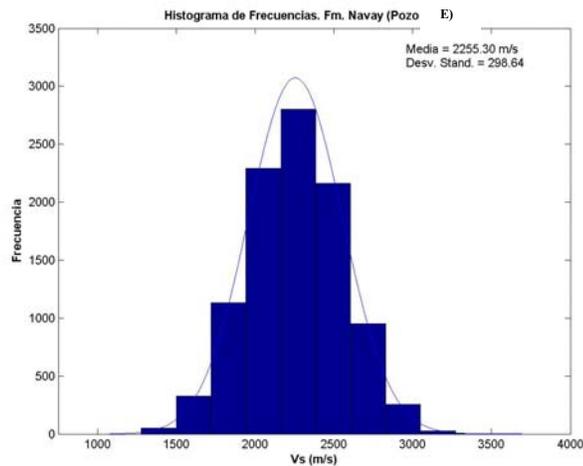


Figura 39. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Fm. Navay (Pozo E).

De los gráficos anteriores se puede apreciar para todos los casos, como los 10000 valores simulados de velocidad satisfacen la recta obtenida del ajuste lineal, esto es indicativo de que el método de Monte Carlo para la generación de los números aleatorios funcionó correctamente según los requerimientos.

En el apéndice C se aprecia como la cantidad de datos difiere en el caso de las formaciones Gobernador y Navay con respecto a los miembros “O” y “P1” de la Formación Escandalosa, esto se debe al poco espesor que presentan estos últimos, en promedio 60 y 80 pies respectivamente, mientras que el espesor de las formaciones Gobernador y Navay corresponde a 250 y 300 pies respectivamente, esta carencia de datos en los casos “O” y “P1” quizás traiga como consecuencia una menor exactitud en los cálculos incertidumbre en la identificación litológica

En esta parte del estudio se decidió incorporar a la Formación Navay ya que el cálculo de las incertidumbres necesita, al igual que en el caso de las arenas y calizas, valores de velocidad correspondientes a lutitas. En el caso de la Cuenca Barinas-Apure el sello por excelencia lo constituyen las lutitas de la Formación Pagüey pero lamentablemente esta no se encuentra muestreada en todos los pozos. En el caso de la Formación Navay se decidió hacer el estudio incluyendo los dos miembros (La Morita y Quevedo) en un solo espesor, aun cuando uno es predominantemente mas lutítico que el otro. Los valores de media y desviación estándar con los que se llevó a cabo la simulación (correspondientes a Vs) se muestran en una tabla resumen en el apéndice D, así como los obtenidos de la relación Vp/Vs.

Una vez llevada a cabo la simulación de Monte Carlo, se construyeron las *pdfs* a partir de los datos generados y los ya existentes de Vp/Vs, de la figura 40 a la 46 se presentan las *pdfs* de todas las formaciones para cada uno de los pozos.

De manera complementaria se construyeron las distribuciones bivariadas Vp/Vs vs Vp, estas al igual que las *pdfs* juegan un papel crucial en la identificación de litologías a partir de propiedades físicas de las rocas y en el cálculo de su incertidumbre asociada, pero en este caso los cálculos se llevaron a cabo solo a partir de las *pdfs* por lo que se muestran las distribuciones bivariadas únicamente para

ilustrar como efectivamente se agrupan los valores de  $V_p$  y  $V_p/V_s$  en función de la litología (Apéndice E).

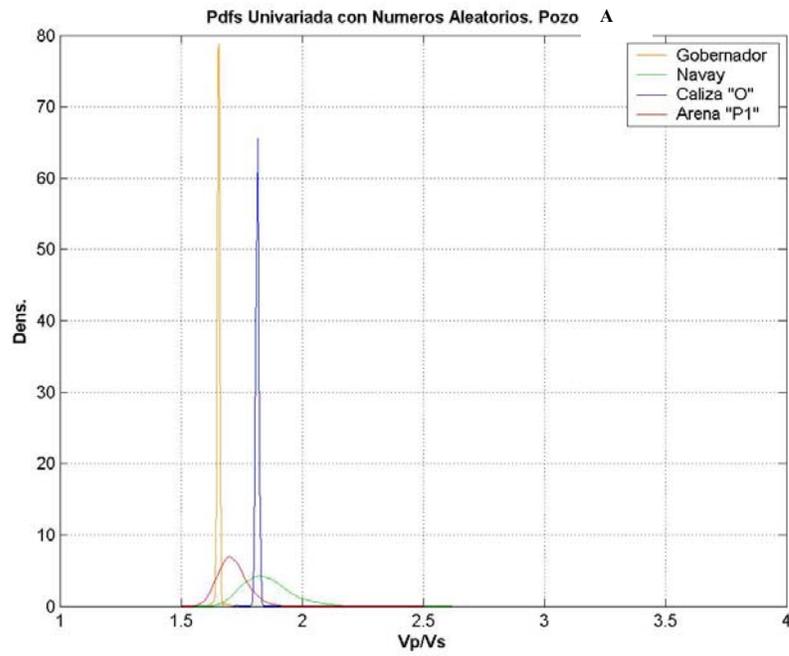


Figura 40. Pdfs de  $V_p/V_s$  (Pozo A).

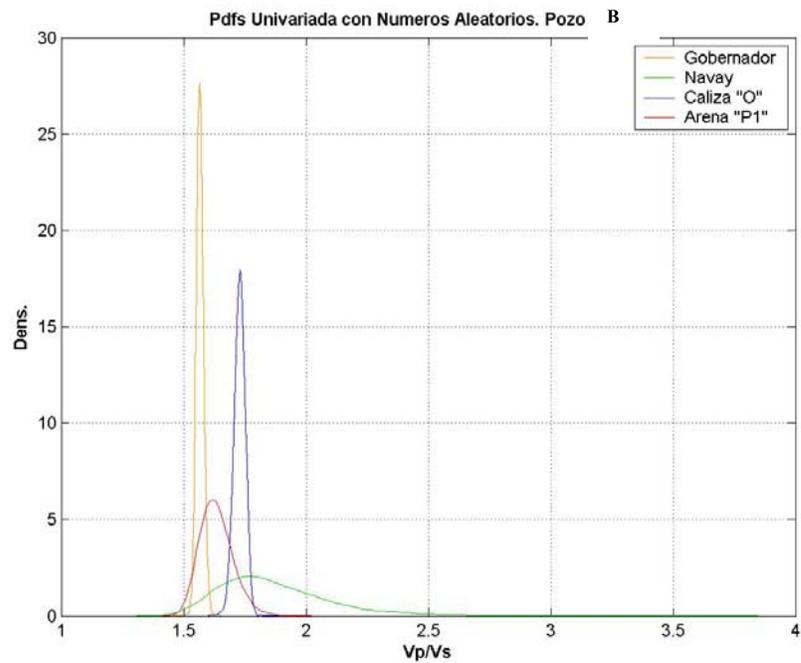


Figura 41. Pdfs de  $V_p/V_s$  (Pozo B).

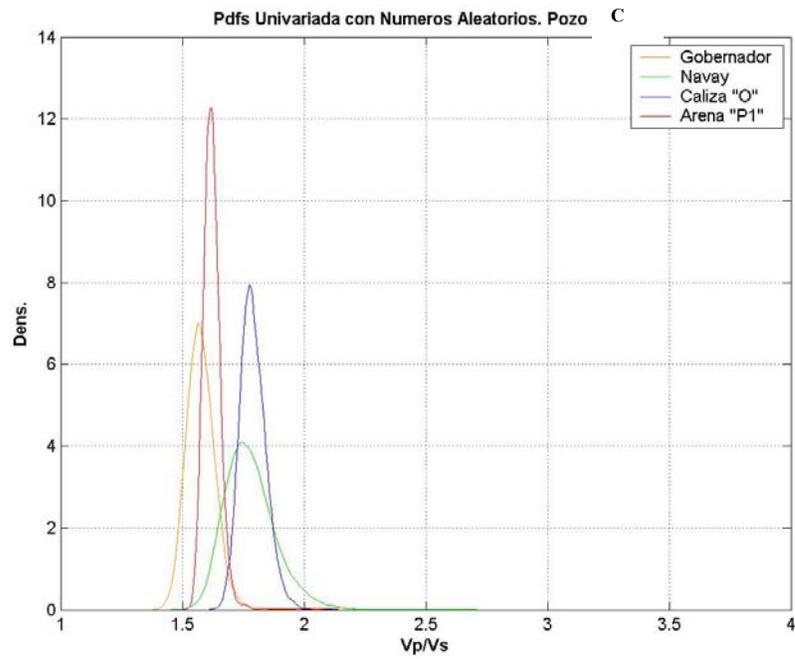


Figura 42. Pdfs de Vp/Vs (Pozo C).

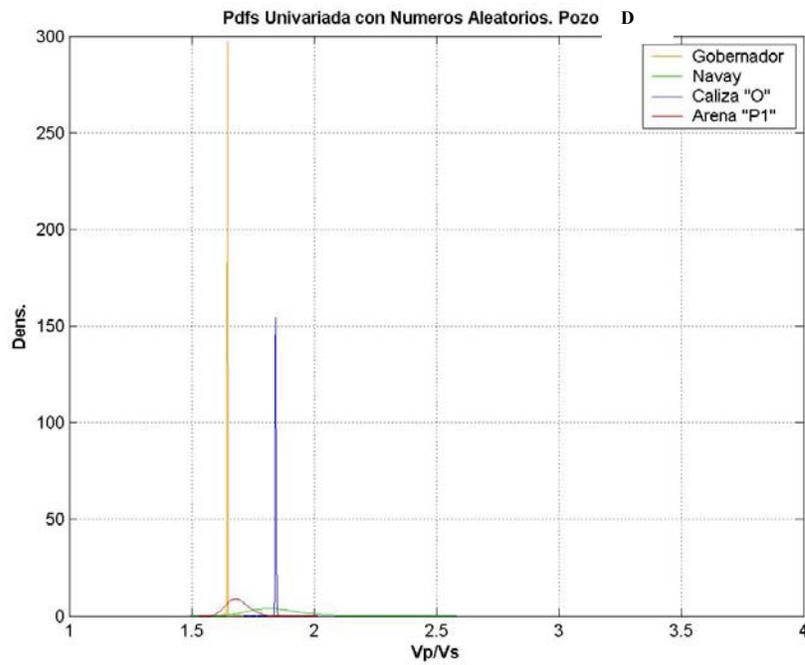


Figura 43. Pdfs de Vp/Vs (Pozo D).

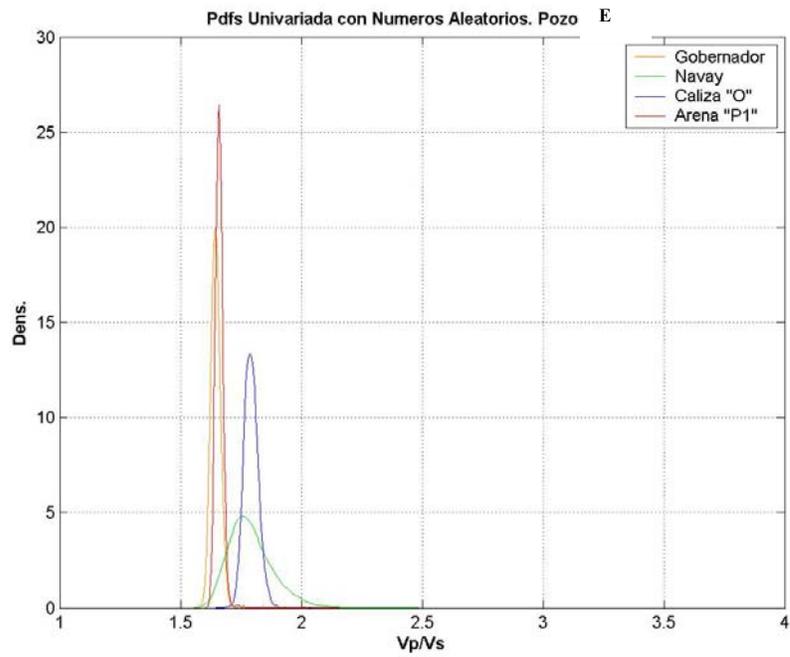


Figura 44. Pdfs de Vp/Vs (Pozo E).

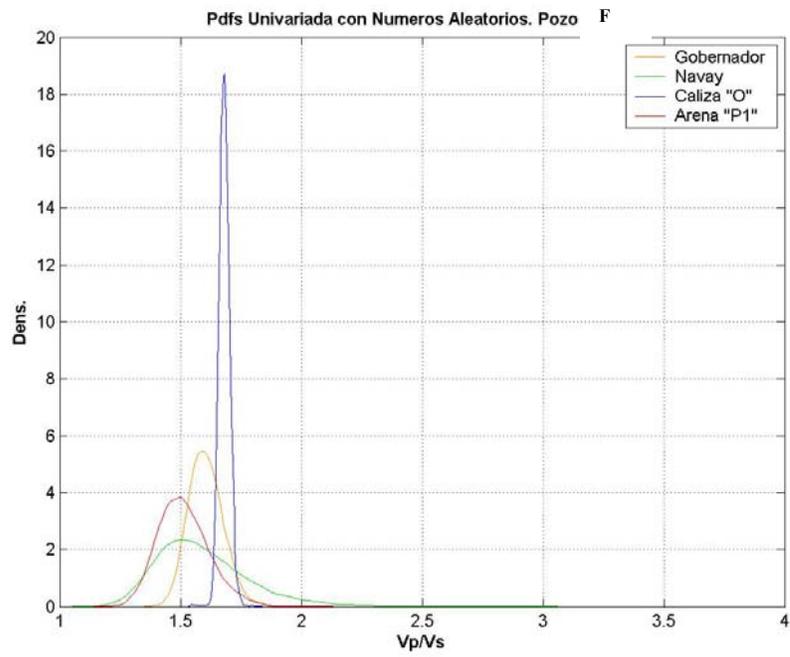


Figura 45. Pdfs de Vp/Vs (Pozo F).

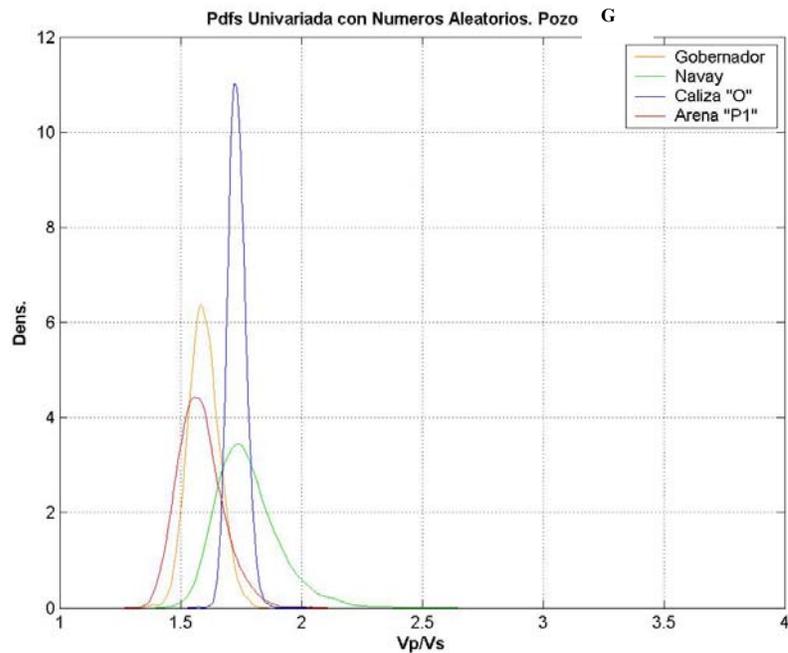


Figura 46. Pdfs de Vp/Vs (Pozo G).

### Cálculo de Incertidumbre y Entropía de Información de Shannon

Dado que el objetivo principal de este trabajo es la cuantificación de la incertidumbre en la identificación litológica de arenas, lutitas y calizas; y considerando que las *pdfs* pertenecientes a las arenas de Gobernador y “P1” presentan comportamientos similares se decidió no hacer la discriminación entre ellas ya que la importancia de éste método radica en el calculo de la incertidumbre en las zonas en las que se esperan cambios litológicos, un ejemplo podría ser el contacto entre las formaciones Navay y Escandalosa, la primera es esencialmente lutítica mientras que la segunda es una mezcla de arenas, carbonatos y lutitas, además las arenas de Gobernador y “P1” pertenecen a estratos bien diferenciados que no se encuentran en contacto en ninguno de los pozos, por lo que no se consideró llevar a cabo el calculo de incertidumbre para estos dos intervalos.

A continuación se presentan las matrices de confusión obtenidas de los cálculos, las primeras muestran los valores de probabilidad tomando en cuenta sólo

las arenas de Gobernador y por ultimo se presentan las matrices en las cuales se tomo en cuenta sólo el espesor correspondiente a la arena “P1”.

<b>Litología Verdadera \ Litología Predicha</b>	<b>Arenas</b>	<b>Lutitas</b>	<b>Calizas</b>	<b>H(x)</b>
Arenas de Gobernador	0.9803	0.0355	0	2.4433
Lutitas	0.0197	0.7516	0.2129	3.7395
Calizas	0	0.2129	0.7871	1.25

Tabla 5. Matriz de confusión de Bayes en la discriminación litológica empleando las arenas de Gobernador. Pozo A.

<b>Litología Verdadera \ Litología Predicha</b>	<b>Arenas</b>	<b>Lutitas</b>	<b>Calizas</b>	<b>H(x)</b>
Arenas de Gobernador	0.9034	0.0966	0	3.4285
Lutitas	0.0966	0.6889	0.3138	3.2146
Calizas	0	0.2145	0.6862	3.3832

Tabla 6. Matriz de confusión de Bayes en la discriminación litológica empleando las arenas de Gobernador. Pozo B.

<b>Litología Verdadera \ Litología Predicha</b>	<b>Arenas</b>	<b>Lutitas</b>	<b>Calizas</b>	<b>H(x)</b>
Arenas de Gobernador	0.9139	0.2478	0.1510	2.9812
Lutitas	0.0707	0.2380	0.5142	3.7992
Calizas	0.0154	0.5142	0.3348	3.7407

Tabla 7. Matriz de confusión de Bayes en la discriminación litológica empleando las arenas de Gobernador. Pozo C.

Litología Verdadera	Litología Predicha	Arenas	Lutitas	Calizas	H(x)
		Arenas de Gobernador	0.9350	0.1850	0
Lutitas	0.0650	0.7389	0.0761	3.7564	
Calizas	0	0.0761	0.9239	1.2483	

Tabla 8. Matriz de confusión de Bayes en la discriminación litológica empleando las arenas de Gobernador. Pozo D.

Litología Verdadera	Litología Predicha	Arenas	Lutitas	Calizas	H(x)
		Arenas de Gobernador	0.9623	0.1217	0
Lutitas	0.0377	0.4330	0.4453	3.6460	
Calizas	0	0.4453	0.5547	3.2183	

Tabla 9. Matriz de confusión de Bayes en la discriminación litológica empleando las arenas de Gobernador. Pozo E.

Litología Verdadera	Litología Predicha	Arenas	Lutitas	Calizas	H(x)
		Arenas de Gobernador	0.5154	0.2585	0.2266
Lutitas	0.2585	0.3694	0.0661	3.5688	
Calizas	0.2261	0.3721	0.7078	3.3827	

Tabla 10. Matriz de confusión de Bayes en la discriminación litológica empleando las arenas de Gobernador. Pozo F.

Litología Verdadera	Litología Predicha	Arenas	Lutitas	Calizas	H(x)
		Arenas de Gobernador	0.8859	0.1857	0.1178
Lutitas	0.0341	0.4005	0.3313	3.5922	
Calizas	0.08	0.4138	0.5509	3.3266	

Tabla 11. Matriz de confusión de Bayes en la discriminación litológica empleando las arenas de Gobernador. Pozo G.

Litología Verdadera	Litología Predicha	Arenas	Lutitas	Calizas	H(x)
		Arena "P1"	0.8405	0.1731	0.1034
Lutitas	0.1577	0.7516	0.1095	3.7395	
Calizas	0.0018	0.0753	0.7871	1.25	

Tabla 12. Matriz de confusión de Bayes en la discriminación litológica empleando la Arena "P1". Pozo A.

Litología Verdadera	Litología Predicha	Arenas	Lutitas	Calizas	H(x)
		Arena "P1"	0.7954	0.3047	0.0035
Lutitas	0.1256	0.6889	0.3103	3.2146	
Calizas	0.0790	0.0064	0.6862	3.3832	

Tabla 13. Matriz de confusión de Bayes en la discriminación litológica empleando la Arena "P1". Pozo B.

Litología Verdadera	Litología Predicha	Arenas	Lutitas	Calizas	H(x)
		Arena "P1"	0.9341	0.2478	0.1510
Lutitas	0.0407	0.2380	0.5142	3.7992	
Calizas	0.0252	0.5142	0.3348	3.7407	

Tabla 14. Matriz de confusión de Bayes en la discriminación litológica empleando la Arena "P1". Pozo C.

Litología Verdadera	Litología Predicha	Arenas	Lutitas	Calizas	H(x)
		Arena "P1"	0.9015	0.1850	0
Lutitas	0.0985	0.7389	0.0761	3.7564	
Calizas	0	0.0761	0.9239	1.2483	

Tabla 15. Matriz de confusión de Bayes en la discriminación litológica empleando la Arena "P1". Pozo D.

Litología Verdadera	Litología Predicha	Arenas	Lutitas	Calizas	H(x)
		Arena "P1"	0.9783	0.1217	0
Lutitas	0.0217	0.4330	0.4453	3.6460	
Calizas	0	0.4453	0.5547	3.2183	

Tabla 16. Matriz de confusión de Bayes en la discriminación litológica empleando la Arena "P1". Pozo E.

Litología Verdadera	Litología Predicha	Arenas	Lutitas	Calizas	H(x)
		Arena "P1"	0.5052	0.4166	0.0782
Lutitas	0.4166	0.3694	0.2140	3.5688	
Calizas	0.0782	0.2140	0.7078	3.3827	

Tabla 17. Matriz de confusión de Bayes en la discriminación litológica empleando la Arena "P1". Pozo F.

Litología Verdadera	Litología Predicha	Arenas	Lutitas	Calizas	H(x)
		Arena "P1"	0.8035	0.1857	0.1170
Lutitas	0.0637	0.4005	0.3321	3.5922	
Calizas	0.1328	0.4138	0.5509	3.3266	

Tabla 18. Matriz de confusión de Bayes en la discriminación litológica empleando la Arena "P1". Pozo G.

### Construcción de los mapas de riesgo

Una vez calculadas las matrices de confusión se construyeron los mapas de isoprobabilidad para los topes de la Formación Gobernador y los miembros "O" y "P1" de la Formación Escandalosa como se mencionó en el Capítulo IV (Figuras 47-49). El intervalo correspondiente a la Formación Navay se tomó en cuenta para el

cálculo de incertidumbre, pero no se construyó un mapa del tope debido a que no resulta de interés prospectivo.

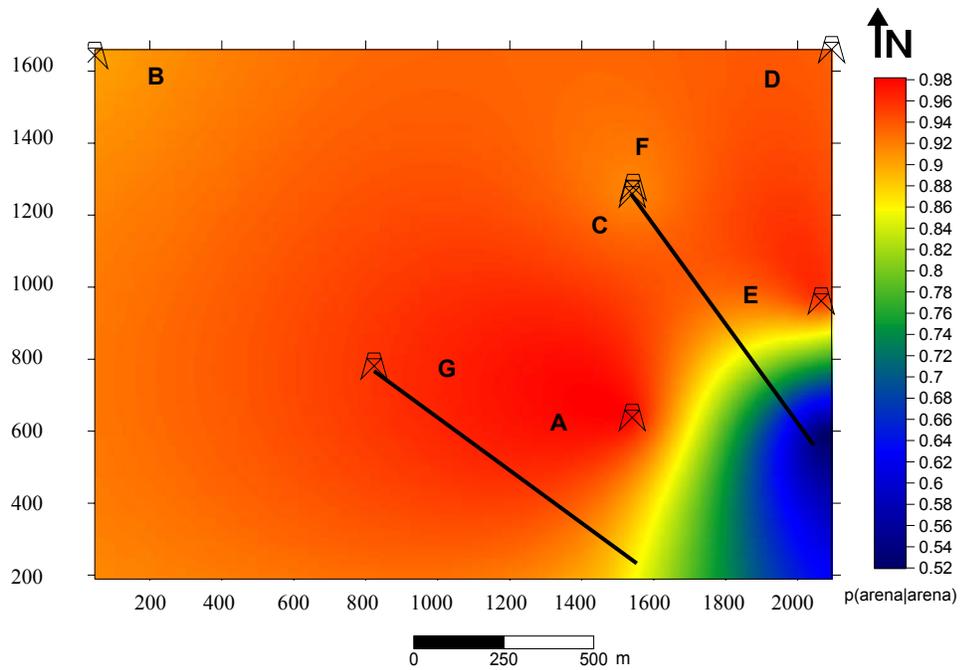


Figura 47. Mapa de Isoprobabilidades ( $p(\text{arena}|\text{arena})$ ). Tope de la Formación Gobernador.

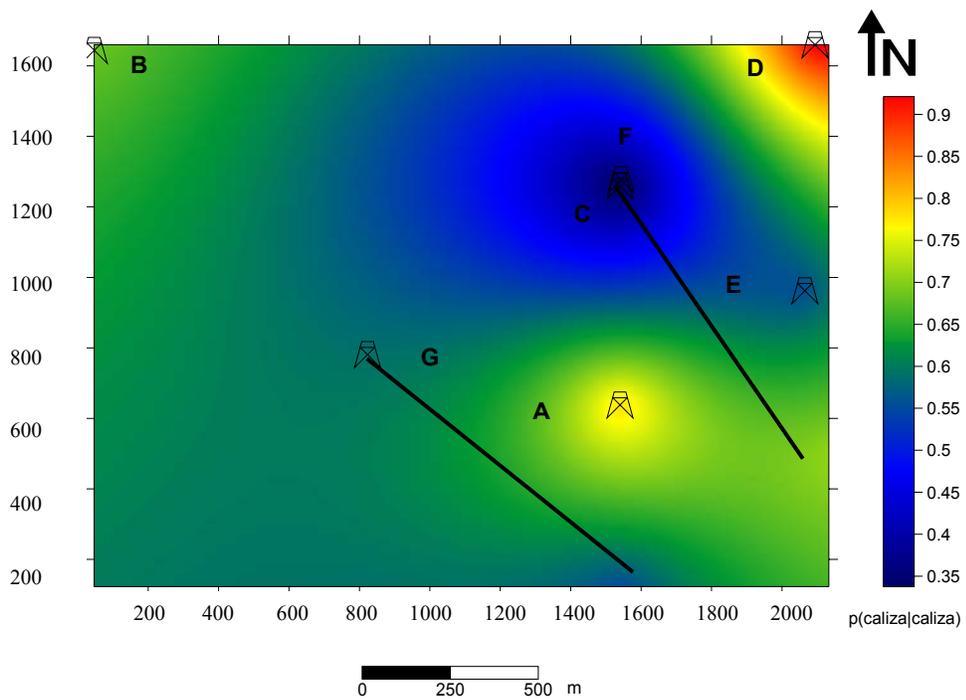


Figura 48. Mapa de Isoprobabilidades ( $p(\text{caliza}|\text{caliza})$ ). Tope de la Caliza "O".

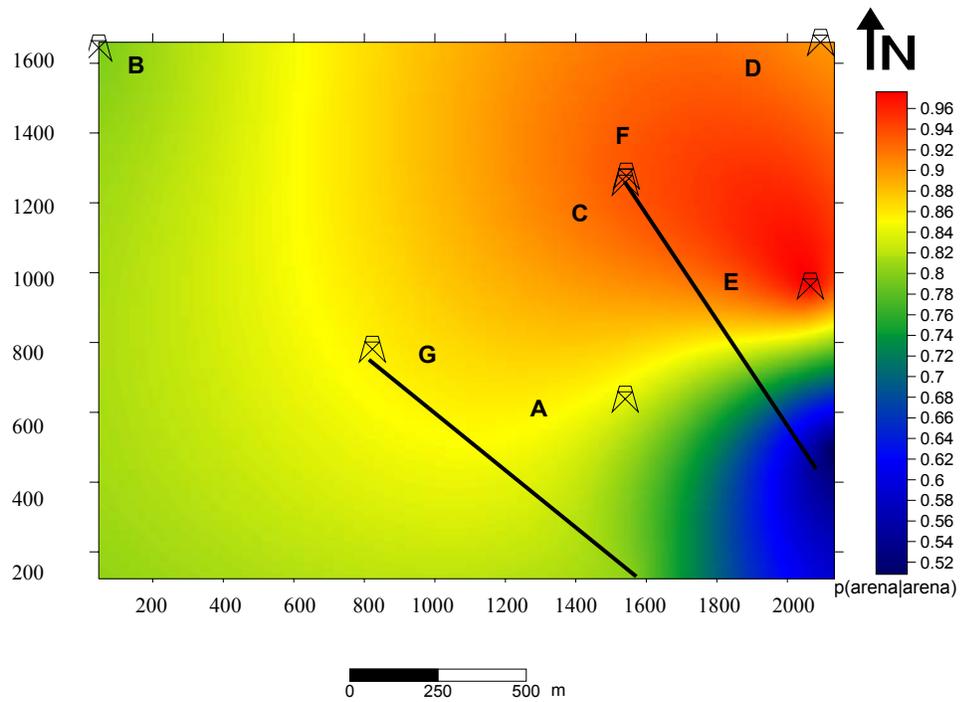


Figura 49. Mapa de Isoprobabilidades ( $p(\text{arena}|\text{arena})$ ). Tope de la Arena "P1".

Del mismo modo que se construyeron los mapas de isoprobabilidades, se construyeron los mapas de entropía de información de Shannon (Figuras 50-52).

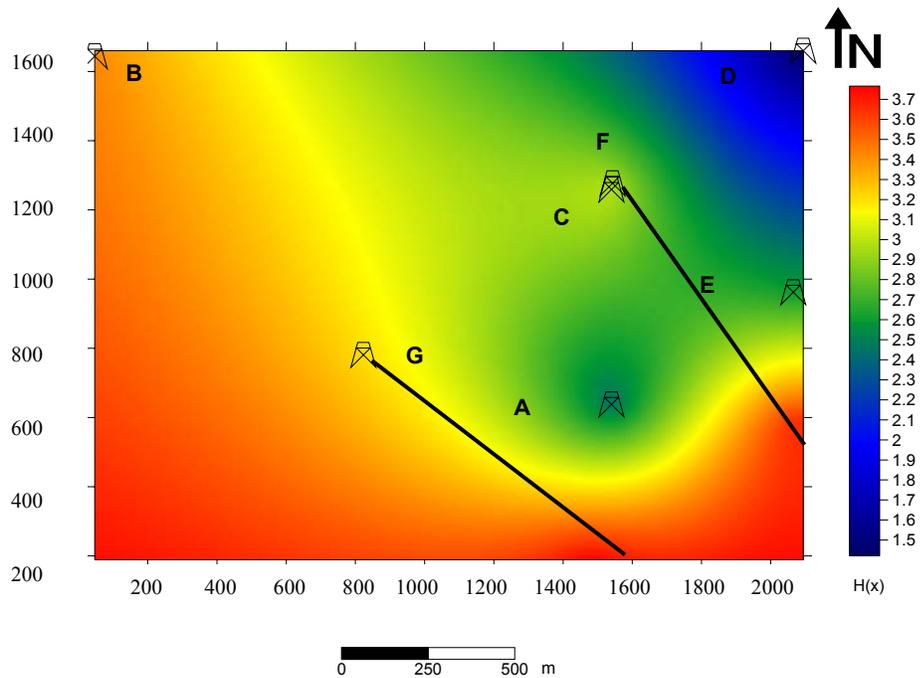


Figura 50. Mapa de Entropía de Información de Shannon. Tope de la Formación Gobernador.

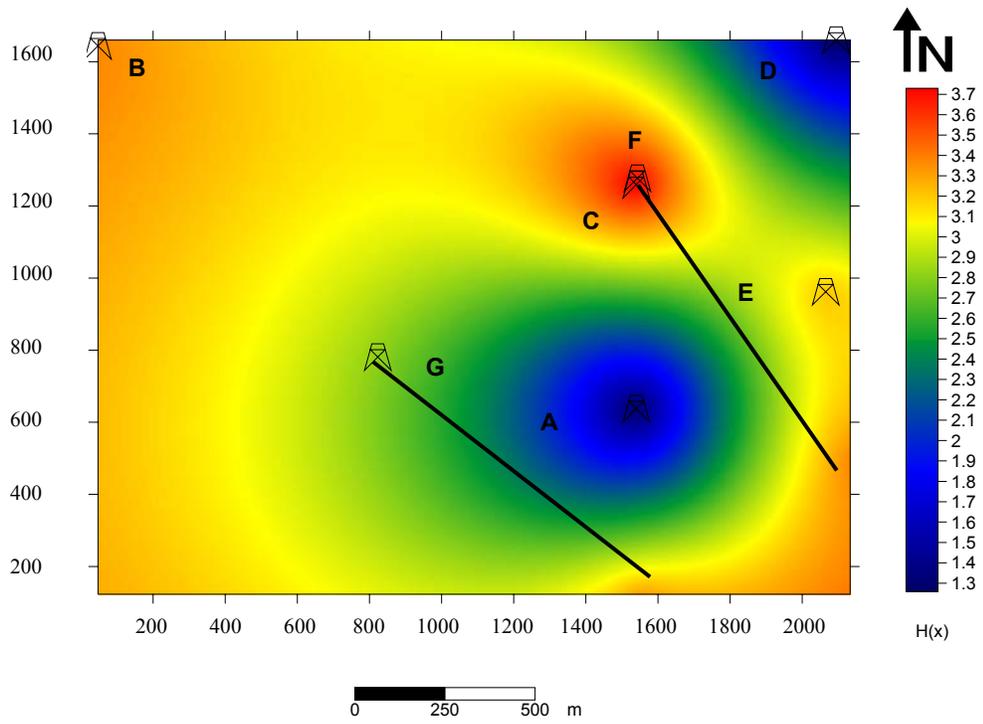


Figura 51. Mapa de Entropía de Información de Shannon. Tope de la Caliza “O”.

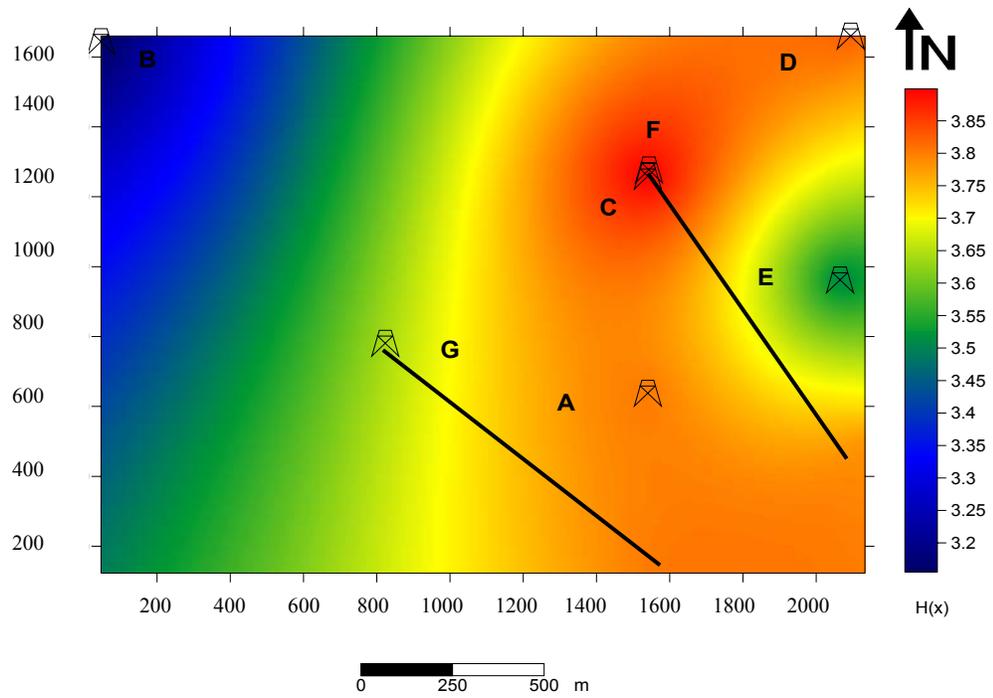


Figura 52. Mapa de Entropía de Información de Shannon. Tope de la Arena “P1”.

En la figura 47 se muestra el mapa de riesgo representando los valores de probabilidad ( $p(\text{arena}|\text{arena})$ ), obtenidos a partir del análisis Bayesiano de la Fm. Gobernador, en éste se puede observar como en casi su totalidad, se encuentra constituido por la presencia de arenas. De la zona central al noreste del mapa, se observa una vasta extensión de arenas con un 94-98% de probabilidad en la predicción, siendo las zonas con mayor probabilidad en la predicción de arenas, las localizadas entre los pozos C, E y D.

Se debe tener en cuenta que en la zona suroeste del mismo mapa no se cuenta con ningún tipo de información de pozo, por lo que esta zona no debería considerarse en los análisis, esto también es válido para los mapas presentados en las figuras 48 a la 52.

En la zona sureste del mapa se observan valores de probabilidad que van desde 0.52 hasta 0.9, los valores bajos de probabilidad, representados en el mapa con color azul, representan los más bajos en la predicción y vienen dados por la información extraída del pozo F. Se debe considerar que aun cuando este pozo presentó una dispersión de importancia en los valores de  $V_p$  y  $V_s$  (Figura 30), los valores simulados mediante el método de Monte Carlo no representan tal dispersión, ya que al momento de generar los valores aleatorios de  $V_p$  y  $V_s$  los valores que pudieron considerarse como anómalos fueron eliminados (Figuras 86 a la 88 del Apéndice C).

Si se observa la figura 18 la cual representa un mapa estructural en profundidad del Campo Borburata, se aprecia como por debajo y al este del pozo A se encuentran varias fallas que podrían estar influyendo los valores de probabilidad calculados.

La figura 50 representa el mapa obtenido a partir de la entropía de información de Shannon para la Fm. Gobernador, en éste se observa como los valores de mayor entropía, por ende, las zonas con mayor incertidumbre en la predicción, están localizadas en las zonas donde no existe información (suroeste del mapa). Al sureste del mismo, también se aprecia una zona con altos valores de entropía, esto es consistente con los valores bajos de probabilidad presentados en la figura 47.

En la figura 53 se presenta el mapa de la relación  $V_p/V_s$  de la Fm. Gobernador, extraído del levantamiento sísmico multicomponente. Dentro del recuadro se encuentran distribuidos los 7 pozos tomados para este estudio. El color azul (valores más bajos de  $V_p/V_s$ ) representa a las arenas, mientras que el color rojo representa a las lutitas o a rocas con índices de arcillosidad altos. En la zona entre los pozos G y C, al igual que en las cercanías del D (marcados con la flecha) se aprecian los valores más bajos de  $V_p/V_s$ , indicando la presencia de arenas, este resultado es consistente con los valores altos de probabilidad y bajos de entropía presentes en los respectivos mapas de la Formación Gobernador.

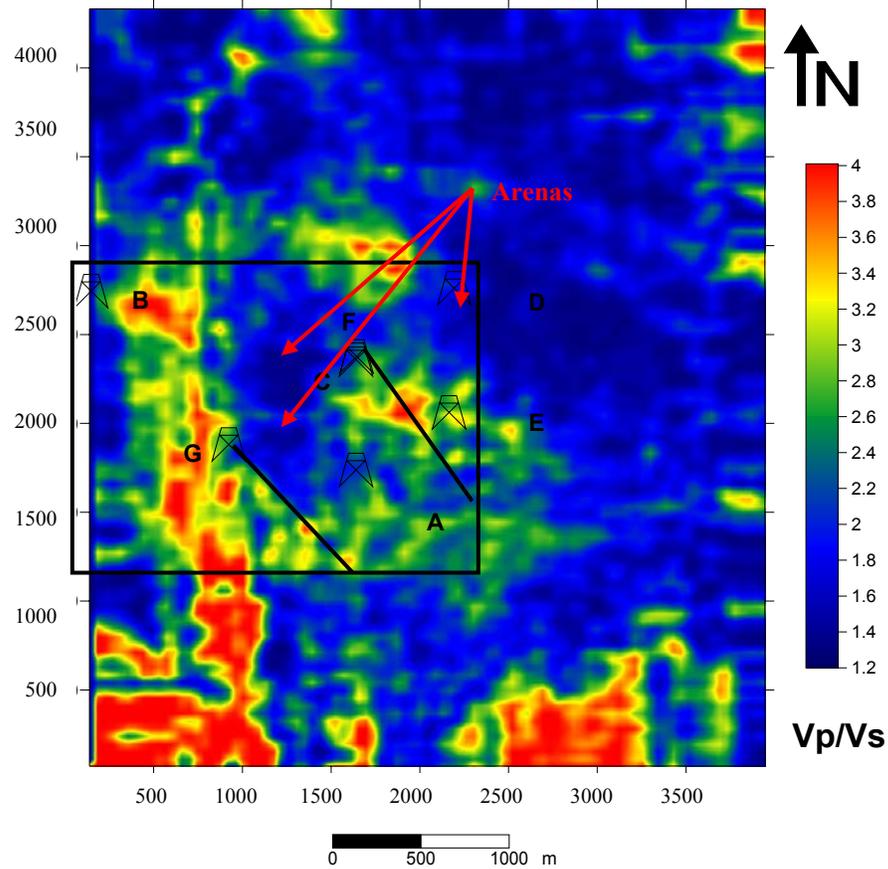


Figura 53. Mapa de la relación  $V_p/V_s$  extraída de los datos sísmicos. Fm. Gobernador. (Modificado de Cova, 2004).

La figura 48 muestra el mapa de probabilidad ( $p(\text{caliza}|\text{caliza})$ ), representando a la Caliza “O” de la Formación Escandalosa, en éste se observa como los valores mas bajos de probabilidad en la predicción de calizas se encuentran alrededor del pozo C, mientras que los valores mas altos se encuentran cercanos al pozo A y al D. En general, los valores de probabilidad son mas bajos, en comparación, con el perteneciente a la Formación Gobernador, esto se debe al significativo solape entre las *pdfs* de las calizas con las lutitas (Figuras 40-46).

El mapa presentado en la figura 51 muestra la entropía de información de Shannon calculada en la Caliza “O”, en este se aprecia como concuerdan los valores máximos de entropía con los valores mínimos de probabilidad y viceversa en comparación con la figura 48. Las zonas de mayor incertidumbre, representadas por los valores mas altos de entropía, se encuentran alrededor del pozo C, al igual que en los bordes del mapa, excepto en las cercanías de los pozos D y A, en las cuales los valores de entropía son los mas bajos.

En la figura 49 se muestra el mapa de isoprobabilidades ( $p(\text{arena}|\text{arena})$ ), de la Arena “P1” de la Formación Escandalosa, este mapa es muy similar al obtenido para la Formación Gobernador, hay que mencionar que en el calculo de la incertidumbre, no se consideró discriminar entre las arenas de Gobernador y la Arena “P1” dada la similitud observada en las *pdfs*.

Los valores mas altos de probabilidad en la predicción se encuentran alrededor del pozo E, D y C, en la zona central del mapa se presentan valores intermedios de probabilidad pero hay que recordar que en esta zona no existe información. El valor de probabilidad calculado en el pozo F corresponde al mas bajo del mapa (similar a la Fm. Gobernador), en la figura 45 se aprecia como las *pdfs* de las diferentes litologías se encuentran muy solapadas, esto además de hacer mas complicado el cálculo, refleja lo poco que sirve la relación  $V_p/V_s$  en la discriminación de litologías, al menos en este pozo. Esto pudiera ser atribuido a errores de medición o a problemas con la herramienta durante el perfilaje, o a la influencia de la falla que es intersectada por la trayectoria del pozo. Si existe algún tipo de anomalía a nivel de las formaciones se puede indagar acerca del carácter local

de ésta, ya que los mapas sísmicos no reflejan ningún carácter anómalo en esta zona, lo que inclina mas a pensar que los valores bajos de probabilidad son debidos a problemas con la herramienta.

El solape de las *pdfs* y la dispersión de los valores de velocidad observada en la figura 30 para el pozo F, se ve ilustrado en el mapa de entropía de información de Shannon, el valor mas bajo corresponde a 3.15 mientras que el mas alto es 3.9, mientras que en los mapas anteriores el valor de la entropía cae hasta valores cercanos a 1.3. Este mapa no resulta muy útil en la interpretación, ya que este exhibe un área de alta incertidumbre.

En la figura 54 se presenta el mapa de la relación  $V_p/V_s$  obtenido a partir del levantamiento sísmico multicomponente para la Formación Escandalosa.

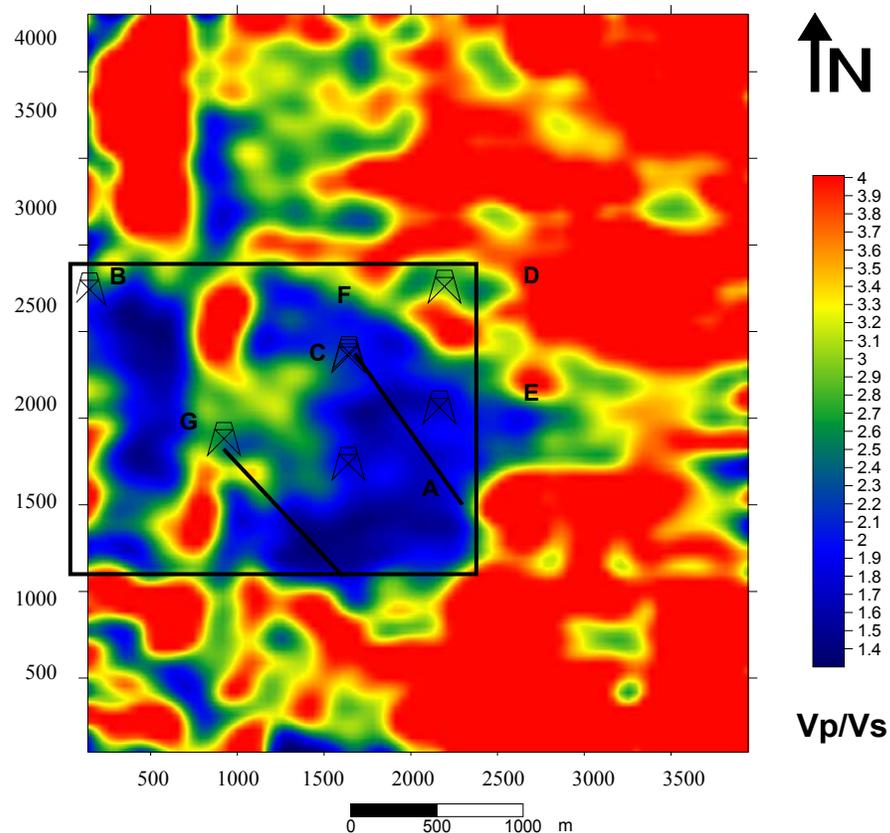


Figura 54. Mapa de la relación  $V_p/V_s$  extraída de los datos sísmicos. Fm. Escandalosa. (Modificado de Cova, 2004).

Para comparar los mapas en las figuras 48,49, 51 y 52 con la figura 54, se debe considerar que el mapa obtenido de la información sísmica incluye los intervalos “O” y “P1” de la Formación Escandalosa, esto se puede verificar observando la figura 16, donde las amplitudes correspondientes a la Formación Escandalosa en el sismograma sintético claramente abarcan no sólo los intervalos “O” y “P”, sino el “R” también. En adición a esto, hay que recordar que la resolución vertical calculada del levantamiento sísmico es mayor al espesor presentado por los intervalos “O” y “P1” respectivamente. Sin embargo, tanto para el mapa correspondiente a la Caliza “O” como para el de la Arena “P1”, se puede observar que en las adyacencias al pozo A, B y D, se presentan valores altos de probabilidad respectivamente, esto es consistente con los valores bajos e intermedios de  $V_p/V_s$  observados en la figura 54, asumiendo que las calizas presentan valores intermedios de  $V_p/V_s$ .

El mapa correspondiente al tope de la Arena “P1” (Figura 49) presenta valores altos de probabilidad en la zona cercana al pozo C, en el mapa en la figura 54 se aprecia el mismo comportamiento, lo que permite corroborar la sensibilidad de la relación  $V_p/V_s$  a cambios en el contenido de arenas y contenido de arcillas presentes en las rocas.

Se debe tomar en cuenta que los mapas de la relación  $V_p/V_s$  generados a partir de la información sísmica no son muestreados de manera similar que los registros de pozo, estos representan un promedio de los tiempos de viaje de las ondas dentro de la formación.

Esta metodología es de gran utilidad a la hora de calcular la incertidumbre en la predicción de litologías pero la poca información disponible de pozos hace menos resolutiva su cuantificación.

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir de los análisis de los resultados se concluye que:

- Con el empleo de las relaciones determinadas por Pickett (1963) y Castagna *et al.* (1985) se estableció que los datos obtenidos de los registros de pozo son adecuados para el estudio.
- El método de Monte Carlo es una herramienta útil a la hora de aumentar el muestreo y darle robustez a los cálculos probabilísticos, en situaciones en que la escasez de los datos constituye una limitante, además, la versatilidad del método permite generar números aleatorios según distintas necesidades.
- El método de Bayes constituyó una herramienta poderosa para la cuantificación de la incertidumbre en la predicción litológica, este método proporcionó valores de probabilidad a partir de la relación  $V_p/V_s$ , calculados directamente a nivel de las formaciones, por lo que estos pueden ser empleados con un alto nivel de confianza.
- El mapa del tope de la Formación Gobernador representa casi en su totalidad un gran conjunto de arenas con valores de probabilidad desde 0.5 hasta 0.98, pero al compararlo con el mapa de Entropía de Información de Shannon se aprecia que la menor incertidumbre se presenta desde la zona central del mapa hasta la zona noreste del mismo.
- El mapa de isoprobabilidades combinado con el mapa de la relación  $V_p/V_s$  obtenida del levantamiento sísmico, en lo que corresponde a la Formación Gobernador indica tres zonas de importancia, en las que coinciden, bajos valores de  $V_p/V_s$ , bajos valores de entropía y altos valores de probabilidad,

siendo esto consistente con los cálculos efectuados, además de ser estas, de posible interés prospectivo.

- El mapa de isoprobabilidades del tope de la Caliza “O” coincide correctamente con el mapa de entropía de información de Shannon, las zonas que presentan los valores mas bajos de probabilidad concuerdan con las zonas en las que los valores de entropía son mayores (por tanto su incertidumbre) y viceversa.
- Los valores de entropía presentes en el mapa del tope de la Arena “P1” no representan mucha utilidad para identificar las zonas de menor incertidumbre ya que los valores son, en su totalidad, mayores a los presentados en los correspondientes a la Formación Gobernador y a la Caliza “O”. El mapa de isoprobabilidades de la Arena “P1” muestra los mayores contenidos de arena desde el noreste hacia la zona central.
- A pesar de que la interpretación sísmica de la Formación Escandalosa, incluye todos los intervalos interpretados en los registros de pozo en un solo espesor, se diferencian alguna zonas en las que coinciden altos valores de probabilidad en la identificación, bajos valores de entropía de información de Shannon y bajos valores de la relación  $V_p/V_s$ .
- Los coeficientes de correlación calculados mediante el ajuste lineal de mínimos cuadrados denota la no dependencia de la relación  $V_p/V_s$  obtenida del levantamiento sísmico y de los registros de pozo, por lo que no se pudo construir un mapa de riesgo combinando el estudio probabilístico obtenido de los registros de pozo con la información sísmica. Sin embargo se denotan zonas de coincidencia que podrían ser de interés prospectivo.

- Basado en la cuantificación de la incertidumbre, la información sísmica y la sensibilidad de la relación  $V_p/V_s$  a cambios en el contenido de arenas y arcillas, se puede constatar que esta es una buena discriminadora de litologías.
- La poca información de pozos (la requerida en este estudio) disponible en el Campo Borburata, representa una gran limitación a la hora de generar mapas mas representativos de la zona de estudio.

### **Recomendaciones**

- Con la finalidad de buscar una mejor correlación entre la relación  $V_p/V_s$  obtenida tanto del levantamiento sísmico como de los registros de pozo, se recomienda el cálculo de la relación  $V_p/V_s$  a partir de las secciones sísmicas migradas en tiempo, con la finalidad de estimar de manera mas exacta los tiempos de viaje de las ondas PP y PS en los eventos de interés.
- En el mismo orden de ideas, con el uso de secciones sísmicas procesadas en detalle y migradas, es posible obtener un  $\lambda/4$  menor al obtenido, de manera que se pueda diferenciar el tope de la Arena “P1” de la base de la Caliza “O” en las secciones sísmicas y así poder estimar el valor de la relación  $V_p/V_s$  únicamente para estos intervalos por separado.
- Se recomienda realizar estudios de factibilidad y cálculo de incertidumbre a partir de la respuesta elástica de las formaciones de interés con la finalidad de discriminar contenidos de fluidos.
- Emplear la relación obtenida por Castagna *et al.* (1985) para la estimación de  $V_s$  en pozos que cuentan sólo con registros sónicos de onda P, podría ser de utilidad para extender el presente estudio de factibilidad a un número mayor de pozos disponibles en el área.

- Generar mapas de atributos y compararlos con los mapas obtenidos en el presente trabajo y con los obtenidos por Cova (2004).

## CAPÍTULO VII

### BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS CITADAS

- Aguasuelos Ingeniería, S. C. (1990). Modernización de datos geológicos en el frente de montaña. Vol. III, Estratigrafía/Sedimentología. Inédito. Corpoven S.A. Caracas.
- Álvarez, K. (1998). Análisis AVO (Amplitud vs Offset) para ondas convertidas. Trabajo especial de grado. Inédito. Universidad Simón Bolívar, Caracas. 85 p.
- Anka, Z., A. Callejón, V. Hernández, O. Gallango, A. González, D. Loureiro, L. James, K. Thompson y L. Elrod (1998). Inversión geoquímica. Flanco Surandino, sector Barinitas-Portuguesa. Informe Técnico. PDVSA Intevep. Los Teques. 96 p.
- Audemard, F. (1991). Tectonics of Western Venezuela. Trabajo de doctorado no publicado. Universidad de Rice. Houston. 245 p.
- Box, G. y G. Tiao (1992). Bayesian inference in statistical analysis: John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Campos, V. M. (1977). Estratigrafía de la secuencia post-paleozoica en la región de Calderas. Ponencia presentada en el II Congreso Latinoamericano de Geología (pp. 1724-1741). Caracas: Ministerio de Minas e Hidrocarburos.
- Cárdenas, H. (1985). Areniscas fosfáticas de la Formación Navay, Táchira suroriental. Ponencia presentada en el VI Congreso Geológico Venezolano (pp. 3854-3891). Caracas: Sociedad Venezolana de Geólogos.
- Castagna, J. P., M. L. Batzle y R. L. Eastwood (1985). Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks. *Geophysics*, 50 (4): 571-581
- Cova, R. (2004). Estudio del comportamiento de la relación  $V_p/V_s$  a partir de datos sísmicos multicomponentes y registros de pozos, en el campo Borburata, Edo. Barinas. Trabajo especial de grado. Inédito. Universidad Simón Bolívar, Caracas. 143 p.
- Donati, M. (1997). Synthetic example of the benefits of P-SV AVO analysis in the glauconitic channel, Blackfoot field, Alberta. Ponencia presentada en el 59<sup>th</sup> EAGE Meeting. Genova: EAGE.

- Duda, R. y P. Hart (1973). Pattern classification and scene analysis: John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Faulín, J. y A. Juan (2002). Simulación de Monte Carlo con Excel. UOC La Universidad Virtual. [Artículo en línea]. Disponible: [http://www.uoc.edu/in3/emath/docs/Simulacion\\_MC.pdf](http://www.uoc.edu/in3/emath/docs/Simulacion_MC.pdf) [Consulta: 2003, diciembre 12]
- Feo-Codecido, G. (1972). Contribución a la estratigrafía de la Cuenca Barinas-Apure. Ponencia presentada en el IV Congreso Geológico Venezolano (pp 773-782). Caracas: Sociedad Venezolana de Geólogos.
- Feynman, R., R. Leighton, y M. Sands (1963). The Feynman lectures on physics: Wesley, Reading. 182 p.
- Figuroa, L., E. Gil, A. Daal y H. Peraza (1996). Análisis estructural estratigráfico del área de Barinas Norte (Cuenca de Barinas) y su importancia en la exploración de hidrocarburos. Ponencia presentada en el V Simposio Bolivariano, Exploración Petrolera en las Cuencas SubAndinas. Puerto la Cruz. (pp 145-153)
- Gaiser, J. E. (1996). Multicomponent Vp/Vs correlation analysis. Geophysics, 61 (4): 1137-1149
- García, E. (1993). Curso básico de perfiles de pozo en hoyo desnudo. Departamento de Ciencias de la Tierra. Universidad Simón Bolívar, Caracas. 282 p.
- González de Juana, C., J. Iturralde de Arozena y X. Picard (1980). Geología de Venezuela y de sus cuencas petrolíferas. Tomos I y II. Ediciones Foninves. Caracas. 1021 p.
- González, E., R. Michelena, T. Mukerji y G. Mavko (2002). Statistical rock physics to select optimal seismic attributes for lithology discrimination in the heavy oil Orinoco Belt of Eastern Venezuela. Ponencia presentada en el XI Congreso Venezolano de Geofísica. Caracas: Sociedad Venezolana de Ingenieros Geofísicos.
- Gouveia, W. (1996), Bayesian seismic waveform data inversion: Parameter estimation and uncertainty analysis. Trabajo de doctorado no publicado. Colorado School of Mines.
- Gouveia, W., F. Moraes, y J. Scales (1996). Entropy, information and inference: Project Review, Center for Wave Phenomena, Colorado School of Mines, (203): 267-286

- Hospers y Van Wijnen (1959). The gravity field of the venezuelan Andes and adjacent basins. K. Ned. Akad. Wet., Versl. Gewone Vergad Afd. Natuurk XXIII (1), 1-95
- Houck, R. (1999). Estimating uncertainty in interpreting seismic indicators. The Leading Edge, 18 (3): 320–325
- Judge, G. (1999). Simple Monte Carlo studies on a spreadsheet. Computers in Higher Education Economics Review (CHEER). [Revista en línea]. 13 (2). Disponible: [http://www.economics.ltsn.ac.uk/cheer/ch13\\_2/ch13\\_2p12.htm](http://www.economics.ltsn.ac.uk/cheer/ch13_2/ch13_2p12.htm)[Consulta: 2003, diciembre 12]
- Kiser, G. D. (1961). Review of the cretaceous stratigraphy of the southwest Barinas mountain front. Asociación Venezolana de Geología, Minería y Petróleo. Boletín. Informativo 4 (2): 335-359.
- Kiser, G. D. (1989). Relaciones estratigráficas de la Cuenca Apure/Llanos con áreas adyacentes. Venezuela suroeste y Colombia oriental. Monografías, Sociedad Venezolana de Geólogos (1): 71-76
- Kiser, G. D. (1997). Comentarios enviados al CIEN, Comité Interfilial de Estratigrafía y Nomenclatura de PDVSA.
- Lugo, J. y P. Mann (1995). Jurassic-Eocene tectonics evolution of Maracaibo Basin, Venezuela. AAPG. Mem. 62, 699-725
- Mavko, G. y T. Mukerji (1998). A rock physics strategy for quantifying uncertainty in common hydrocarbon indicators. Geophysics, 63 (6): 1197-2008
- Mukerji, T., A. Jorstad, G. Mavko y J. Reidar Granli (1998). Applying statistical rock physics and seismic inversions to map lithofacies and pore fluid probabilities in a North Sea reservoir. Ponencia presentada en el SEG's 1998 Annual Meeting: SEG.
- Mukerji, T., E. González, G. Mavko, P. Avseth e I. Takahashi (2002). Statistical rock physics for seismic reservoir characterization. Ponencia presentada en el XI Congreso Venezolano de Geofísica. Caracas: Sociedad Venezolana de Ingenieros Geofísicos.
- Mukerji, T., G. Mavko, E. González, M. A. Pérez (2001). Estimating and reducing uncertainty in seismic exploration. Informe Técnico. PDVSA Intevep. Los Teques. 62 p.
- Omre, H. y H. Tjelmeland (1997). Petroleum geostatistics, in Baafi, E., and Shofield, N., Eds., Geostatistics Wollongong '96. Kluwer Academic Publishers, 41–52.

- Ostos, M. (1992). Evolución tectónica del margen sur-central del Caribe basado en datos geoquímicos. *Geos* 30, 1-294 Caracas.
- Parnaud, F., Y. Gou, J. C. Pascual, M. A. Capello, I. Truskowski, H. Passalacqua y F. Roure (1995). Stratigraphic synthesis of western Venezuela. *Petroleum Basins of South America*. AAPG. Mem 62: 681-698
- PDVSA Intevep (1997). Código Estratigráfico de las cuencas petroleras de Venezuela [Documento en línea]. Disponible: <http://www.pdvs.com/lexico.htm> [Consulta: 2003, diciembre 1]
- Pickett, G. (1963). Acoustic character logs and their applications in formation evaluation. *Journal of Petroleum Technology*, 15: 659-667
- Pierce, G. R. (1960). Geología de la Cuenca de Barinas. Ponencia presentada en el III Congreso Geológico Venezolano Mem 1 (pp 214-276). Caracas: Sociedad Venezolana de Geólogos.
- Ramírez, O. (2000). Análisis secuencial en el área Barinas-Norte. Delineación de la Trampa BOR-2 en el Miembro "O" de la Formación Escandalosa. Trabajo especial de grado. Inédito. Universidad de Oriente, Ciudad Bolívar. 71 p.
- Rickmers, A. y H. Todd (1971). *Introducción a la Estadística*, 1era ed.- Barcelona. 645 p.
- Renz, O. (1959). Estratigrafía del Cretáceo en Venezuela occidental. *Boletín Geológico*, V (10): 3-48
- Schlumberger (1997). WEC 1997. Evaluación de pozos. Caracas. 413 p.
- Schubert, C. (1968). Geología de la región de Barinitas-Santo Domingo, Andes venezolanos surorientales. *Boletín de Geología*, 9 (19): 182-261
- Sengupta, M. (2000). Integrating rock physics and flow simulation to reduce uncertainties in seismic reservoir monitoring. Trabajo de grado de doctorado no publicado, Universidad de Stanford. Disponible: [http://srb.stanford.edu/Theses/Sengupta\\_76.pdf](http://srb.stanford.edu/Theses/Sengupta_76.pdf) [Consulta: 2004, octubre 7]
- Stewart, R., J. Gaiser, R. Brown y D. Lawton (2002). Converted-wave seismic exploration: Methods. *Geophysics*, 67 (5): 1348-1363
- Sturrow, M. y M. Mónaco (1998). Estratigrafía secuencial en los clásticos de las formaciones Escandalosa y Gobernador. Áreas Barinas Norte y Flanco Surandino. Inédito. PDVSA. Caracas. 64 p.

- Takahashi, I., T. Mukerji y G. Mavko (1999a). Effect of thin-layering on seismic reflectivity: Estimation of sand/shale ratio using stochastic simulation and Bayes' inversion. Ponencia presentada en el SEG's 1998 Annual Meeting: SEG.
- Takahashi, I., T. Mukerji y G. Mavko (1999b), A strategy to select optimal seismic attributes for reservoir property estimation. Application of information theory. Ponencia presentada en el SEG's 1998 Annual Meeting: SEG.
- Takahashi, I. (2000). Quantifying information and uncertainty of rock property estimation from seismic data. Trabajo de grado de doctorado no publicado, Universidad de Stanford. Disponible: [http://srb.stanford.edu/Theses/Takahashi\\_78.pdf](http://srb.stanford.edu/Theses/Takahashi_78.pdf) [Consulta: 2004, junio 17]
- Tarantola, A. y B. Valette (1982). Inverse problems = Quest for information: Journal Geophysics., (50): 159–170
- Tarantola, A. (1987). Inverse problem theory: Methods for data fitting and model parameter estimation: Elsevier Science Publication, Amsterdam.
- Tatham R. H. y M. D. McCormack (1991). Multicomponent seismology in petroleum exploration, Investigation in Geophysics. 6ta ed.- Tulsa: SEG. 248p.
- Tjelmeland, H. y H. Omre (1997). A complex sand-shale facies model conditioned on observations from wells, seismics and production, in Baafi, E., and Shofield, N., Eds., Geostatistics Wollongong '96. Kluwer Academic Publishers, 634–643.
- Todorov, T. (2000). Integration of 3D-3C seismic data and well logs for rock property estimation. Trabajo de grado de maestría no publicado, Universidad de Calgary. Disponible: <http://www.crewes.org/Theses/2000/Todorov/TodorovMSc1999.pdf> [Consulta: 2004, mayo 11]
- Vignali, M. (1999). Interpretación sísmica estructural 3D, en el área de Borburata, Barinas tradicional. Trabajo especial de grado. Inédito. Universidad Central de Venezuela, Caracas. 77 p.
- Von Der Osten (1966). The stratigraphy of Sinco Field. Asociación Venezolana de Geología, Minería y Petróleo. Boletín Informativo 9 (9): 253-272
- Yoris, F., M. Ostos, M. Boujana, J. Pérez, G. Booth, S. Packer, F. Galea y R. Lander (1996). Detailed lithostratigraphy and age determinations of La Luna Formation in two sections of S.W. Táchira State (Venezuela). AAPG. Bulletin 80 (8): 1346 p.

## APÉNDICE A

### Registros de pozo tomados para el estudio

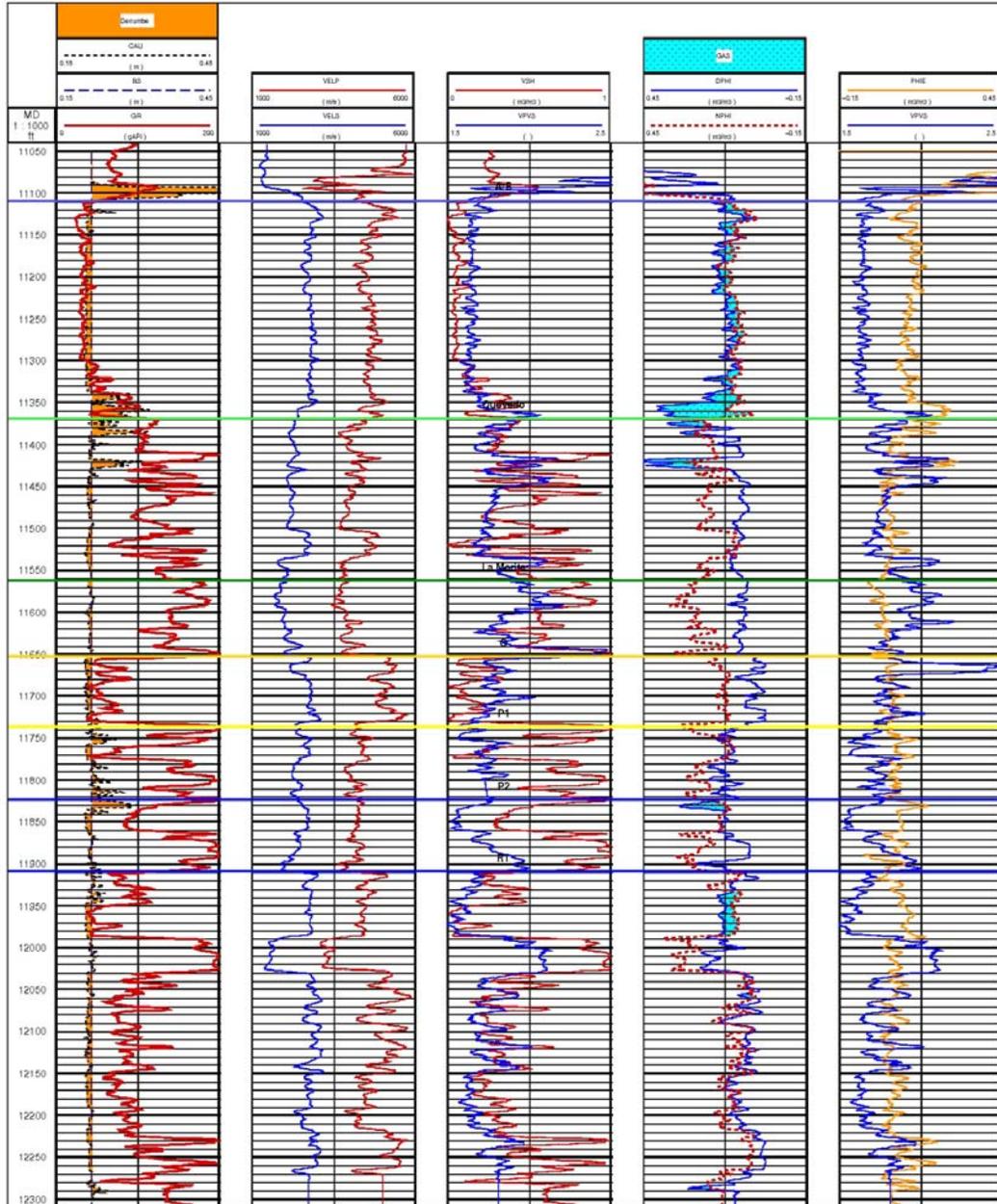


Figura 55. Registros petrofísicos del pozo A.

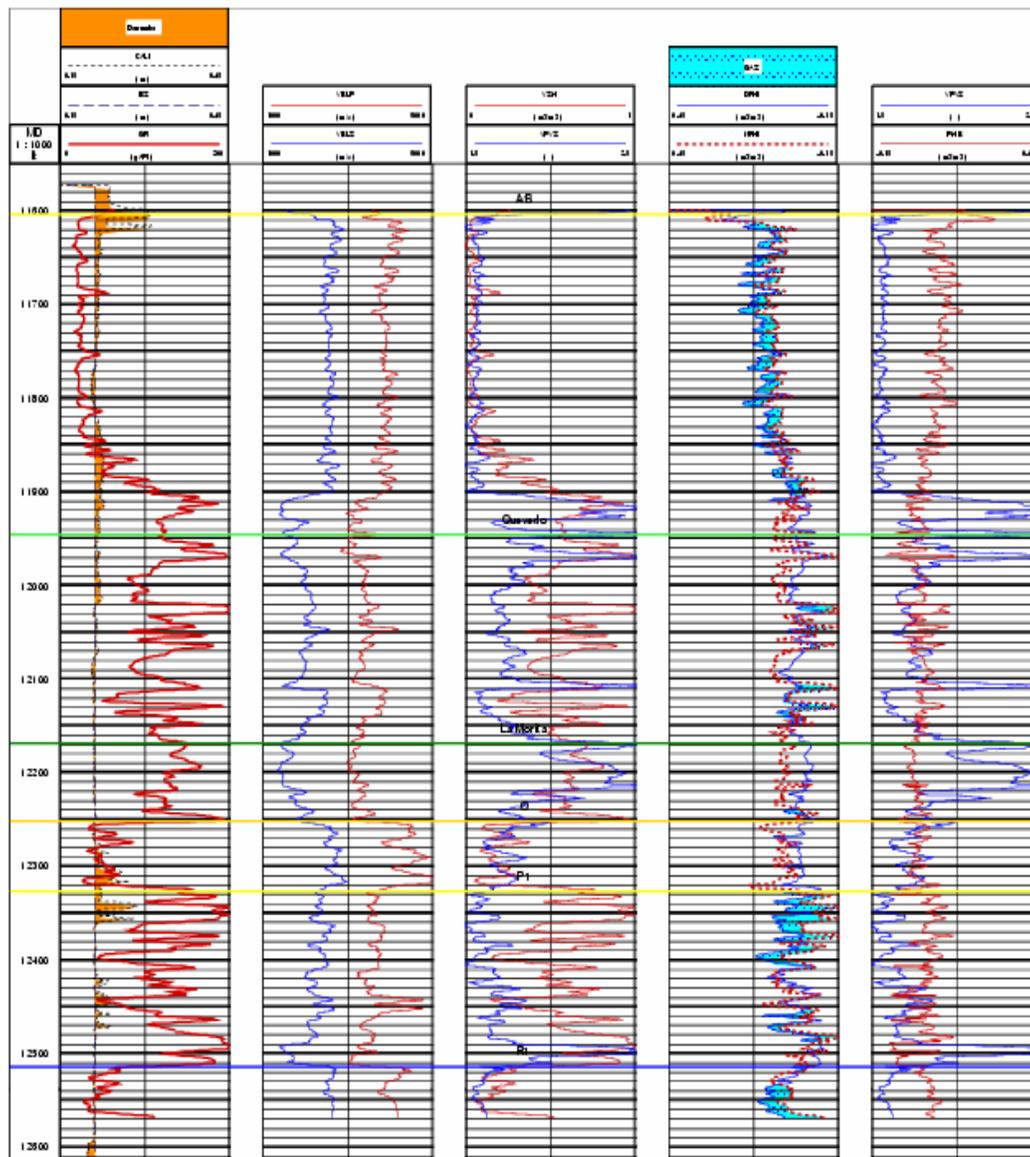


Figura 56. Registros petrofísicos del pozo B.

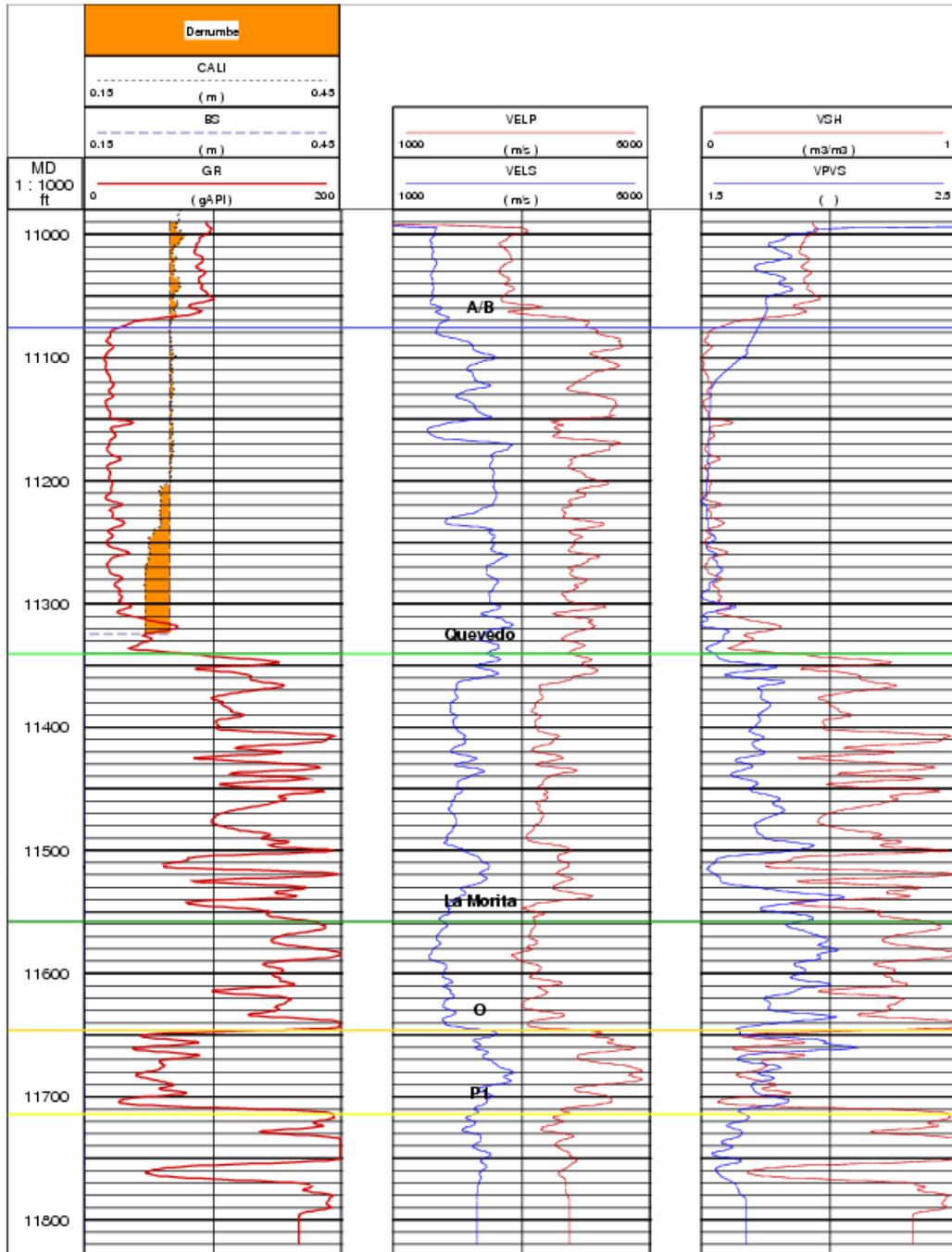


Figura 57. Registros petrofísicos del pozo C.

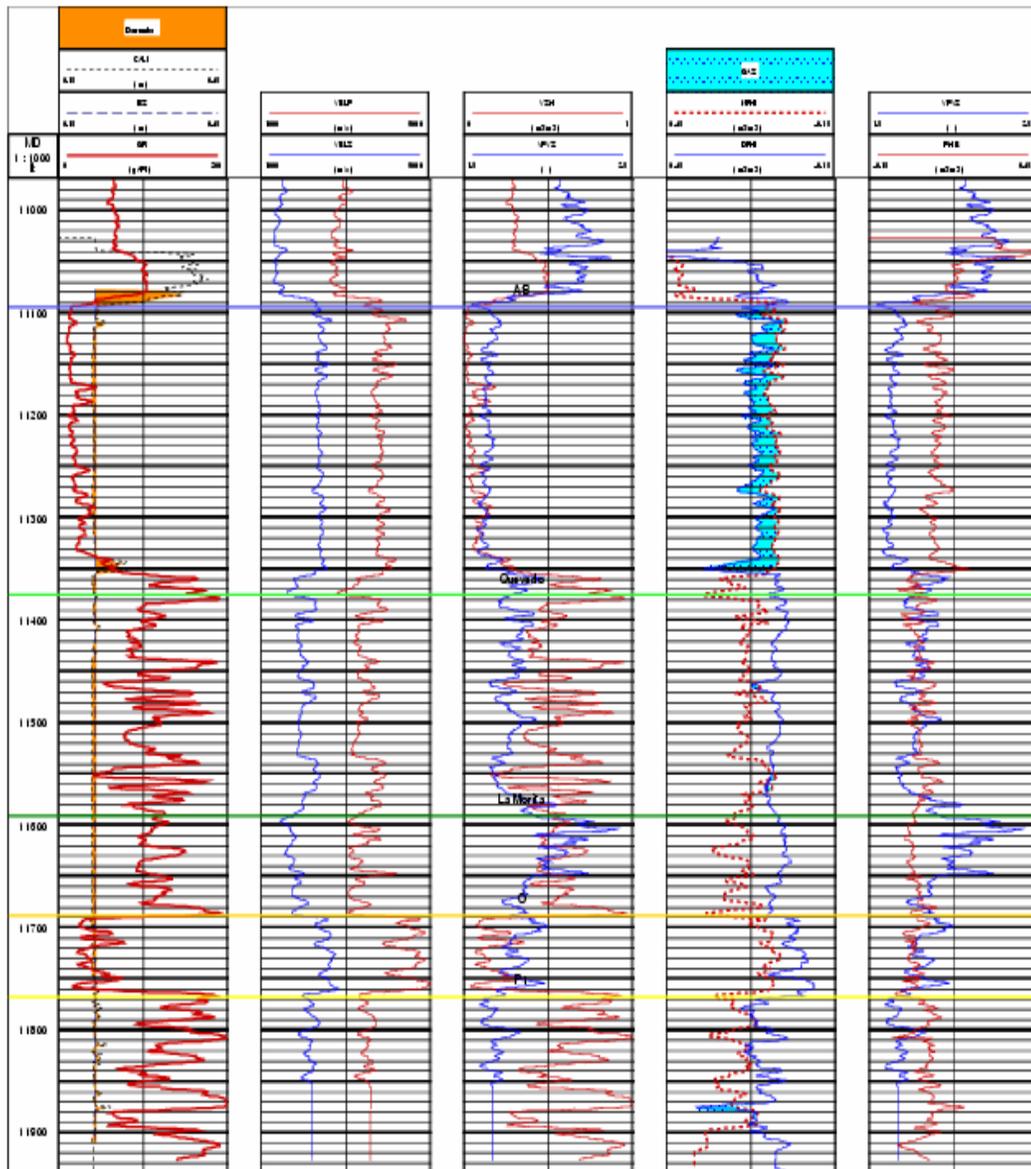


Figura 58. Registros petrofísicos del pozo D.

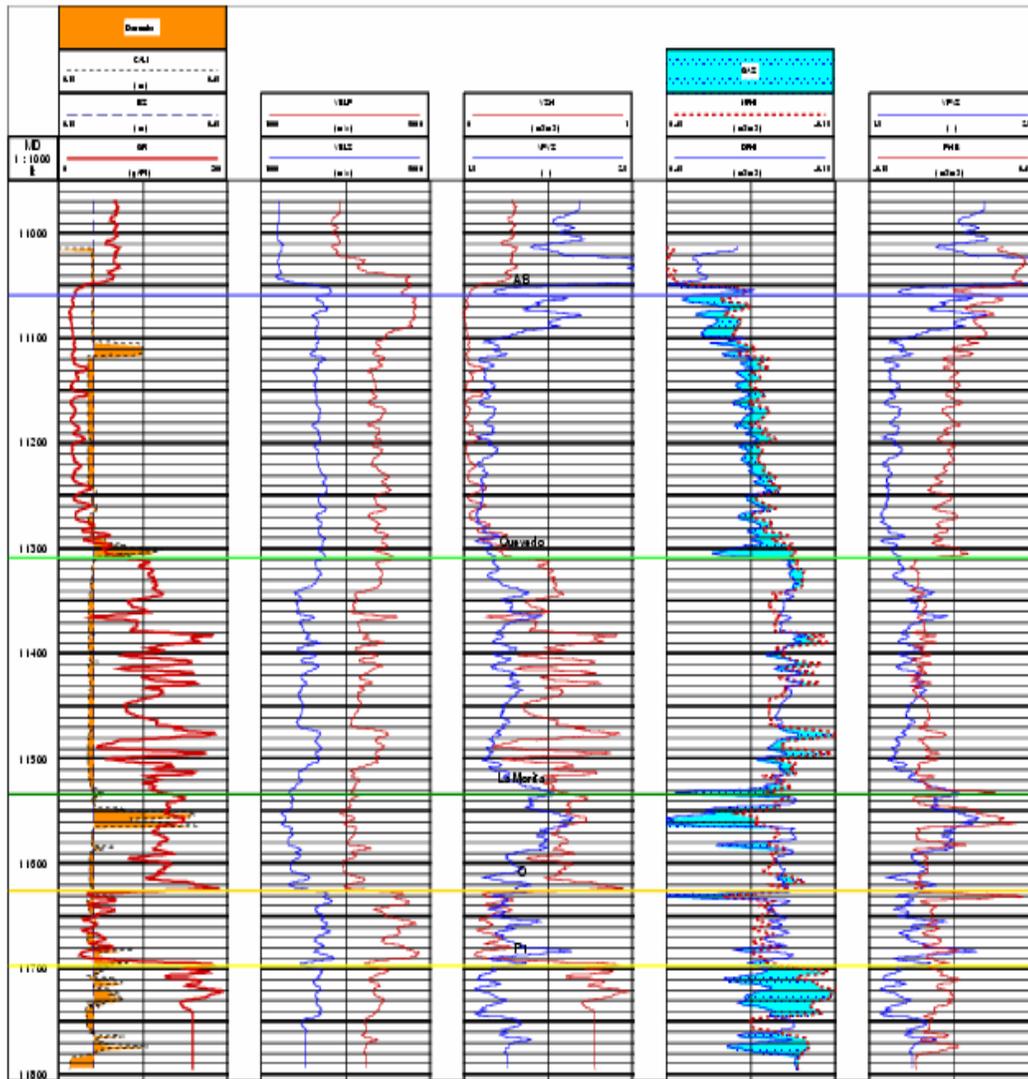


Figura 59. Registros petrofísicos del pozo E.

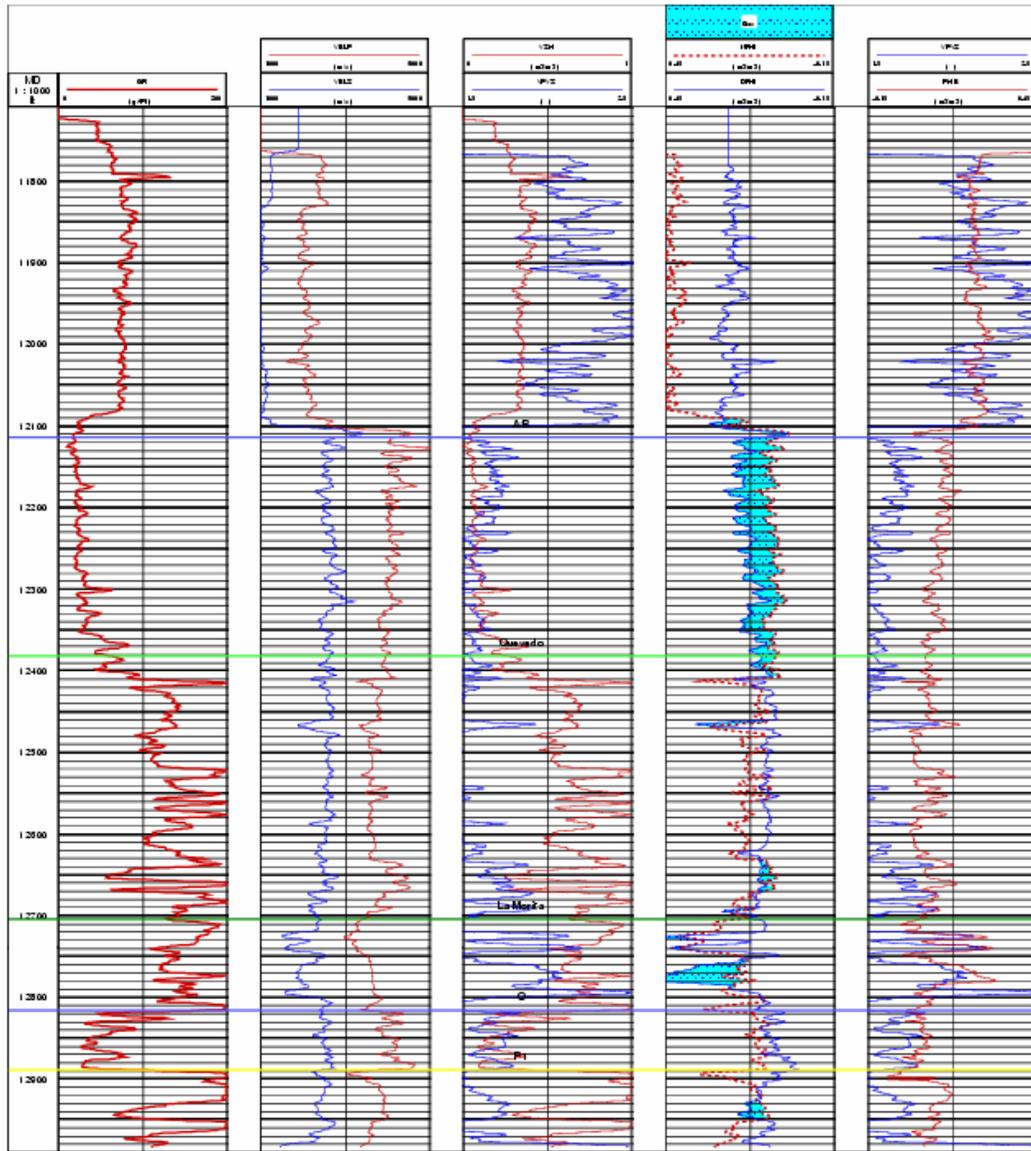


Figura 60. Registros petrofísicos del pozo F.

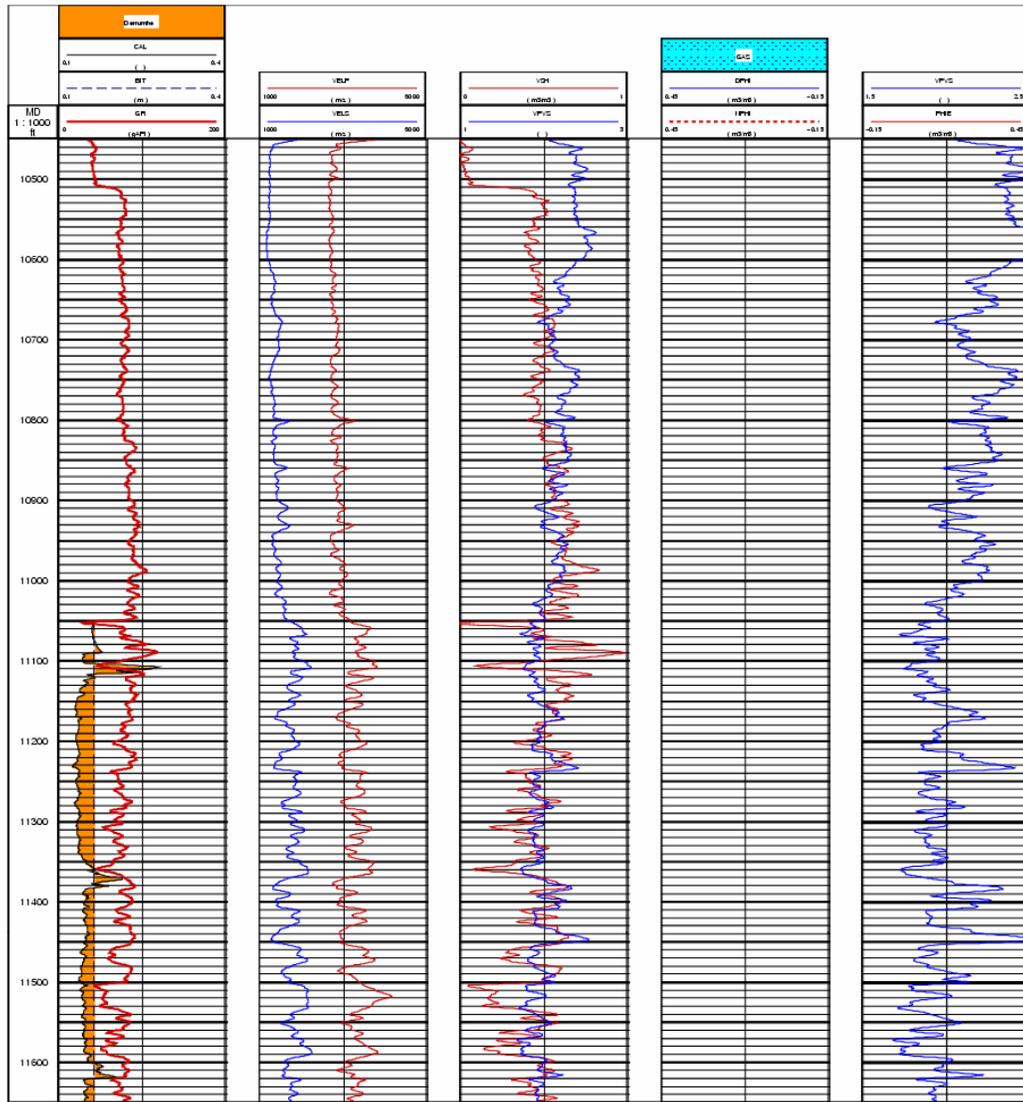


Figura 61. Registros petrofísicos del pozo G (Hasta 11650 pies).

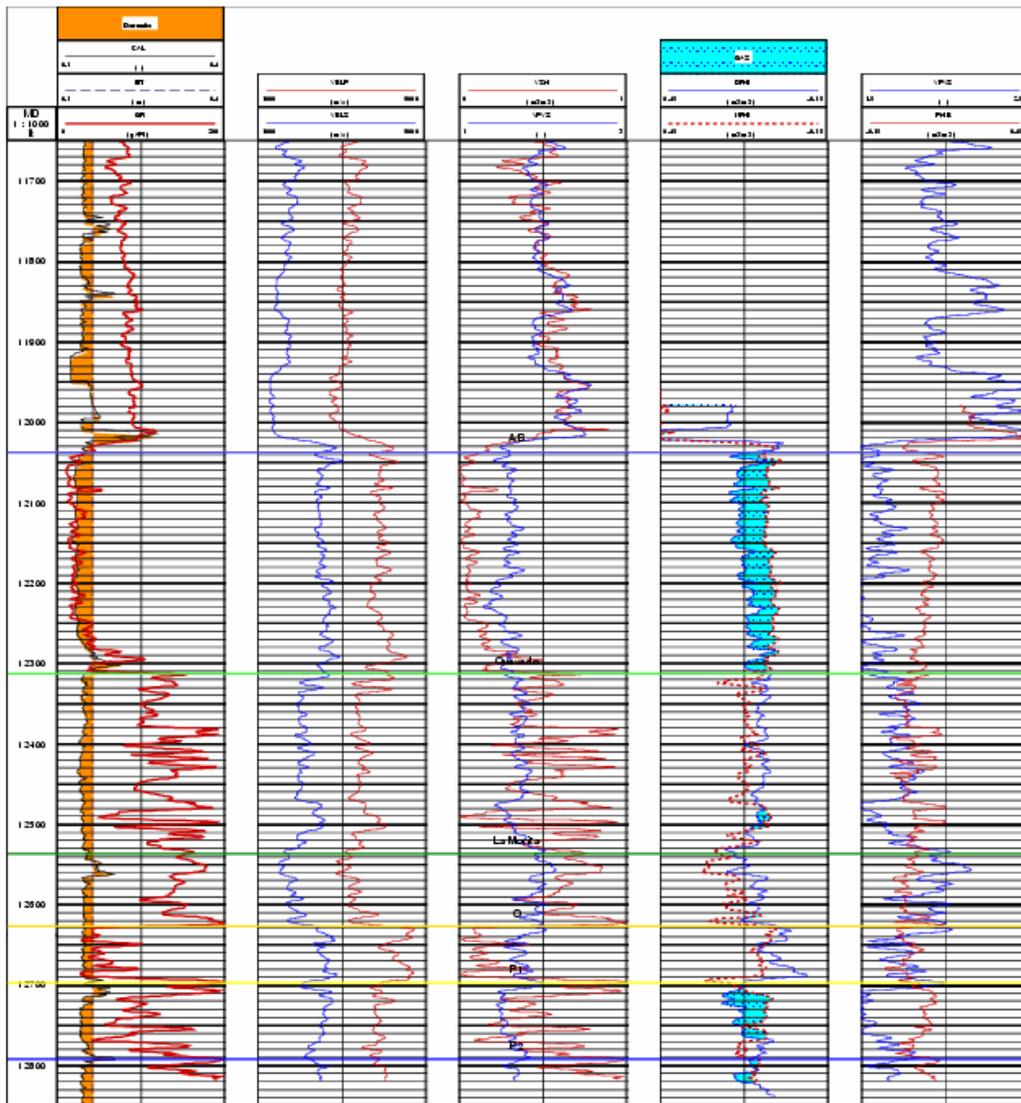


Figura 62. Continuación de los registros petrofísicos del pozo G.

## APÉNDICE B

### Transectos N-S, N45°E y correlación $V_p/V_s$ vs $V_{sh}$ y $V_p/V_s$ vs Porosidad (Formaciones Gobernador y Escandalosa)

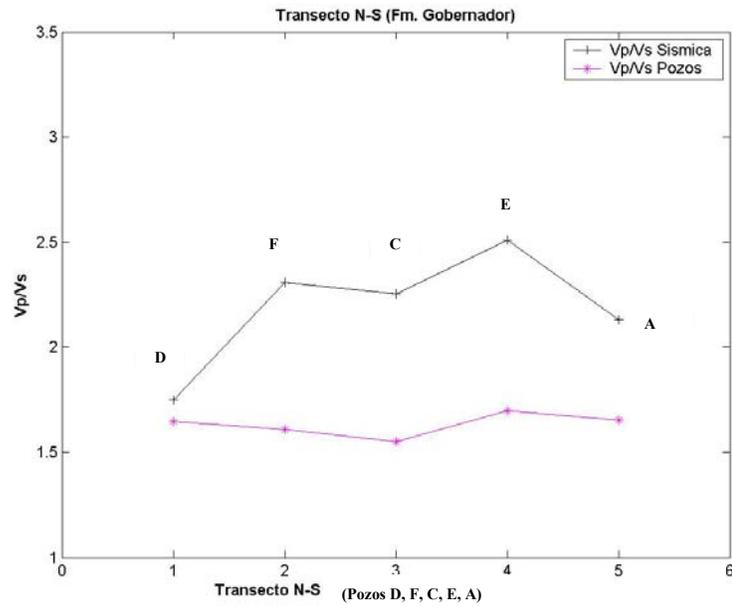


Figura 63. Transecto N-S (Fm. Gobernador).

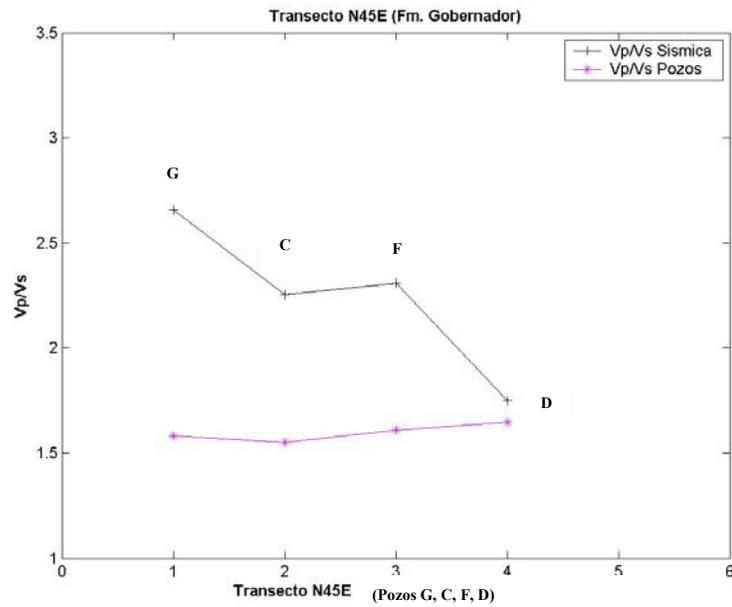


Figura 64. Transecto N45°E (Fm. Gobernador).

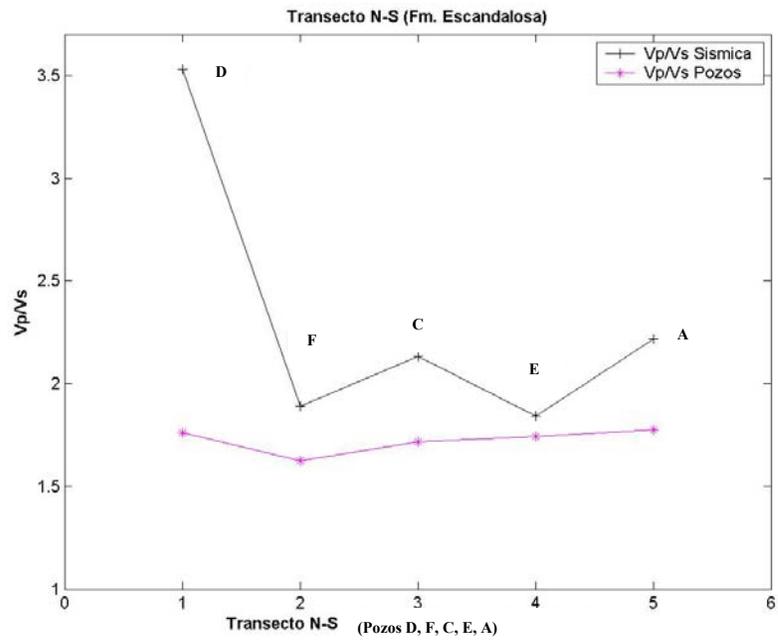


Figura 65. Transecto N-S (Fm. Escandalosa).

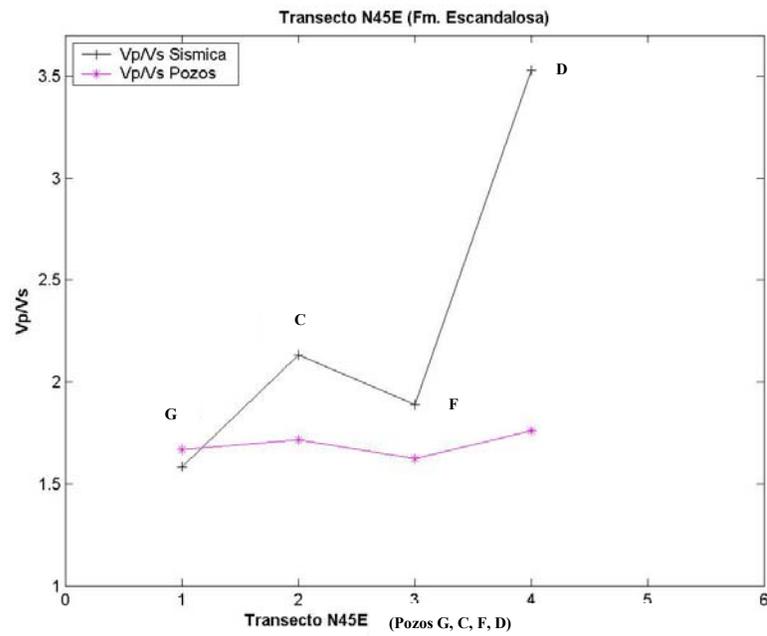


Figura 66. Transecto N45°E (Fm. Escandalosa).

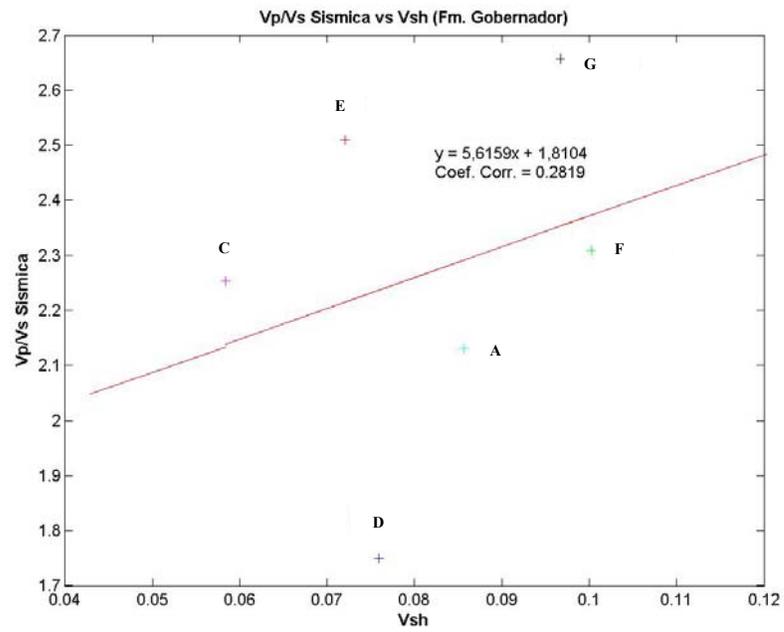


Figura 67. Vp/Vs obtenido de la sísmica vs Vsh (Fm. Gobernador).

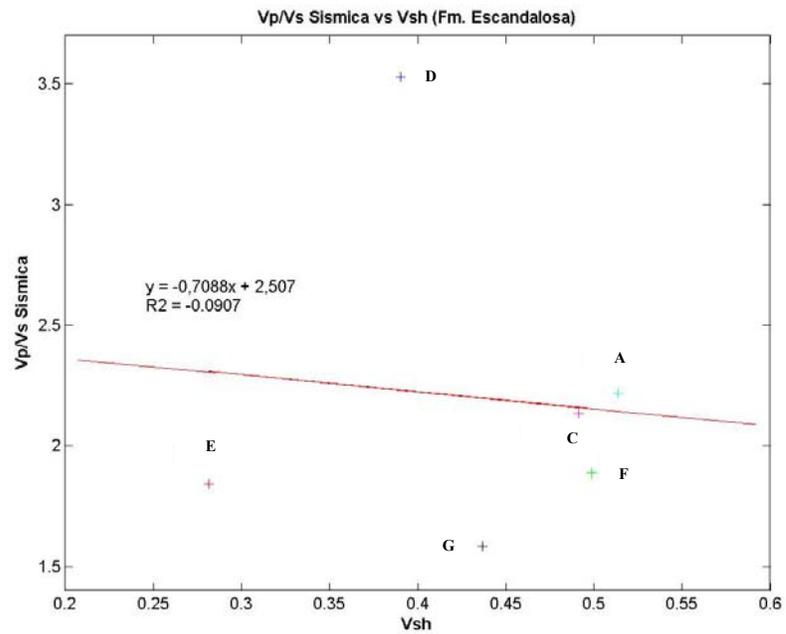


Figura 68. Vp/Vs obtenido de la sísmica vs Vsh (Fm. Escandalosa).

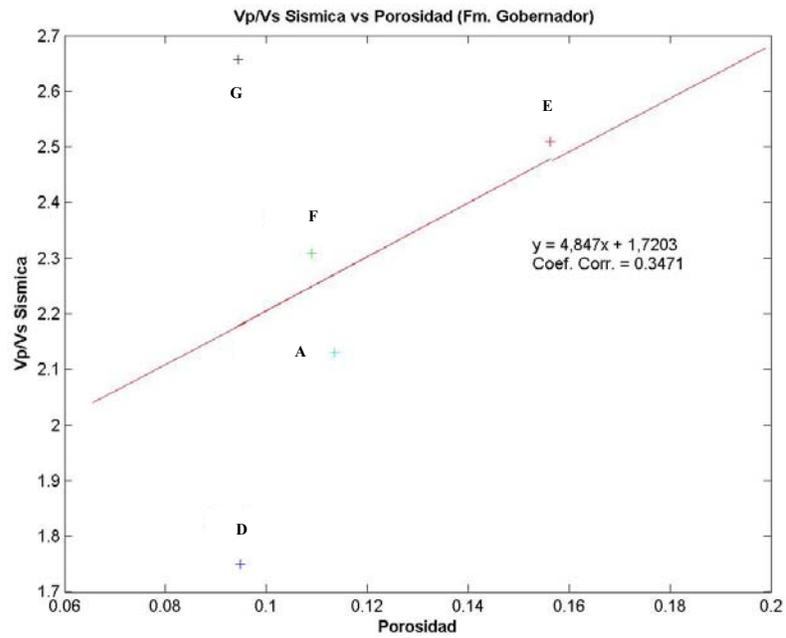


Figura 69. Vp/Vs obtenido de la sísmica vs Porosidad (Fm. Gobernador).

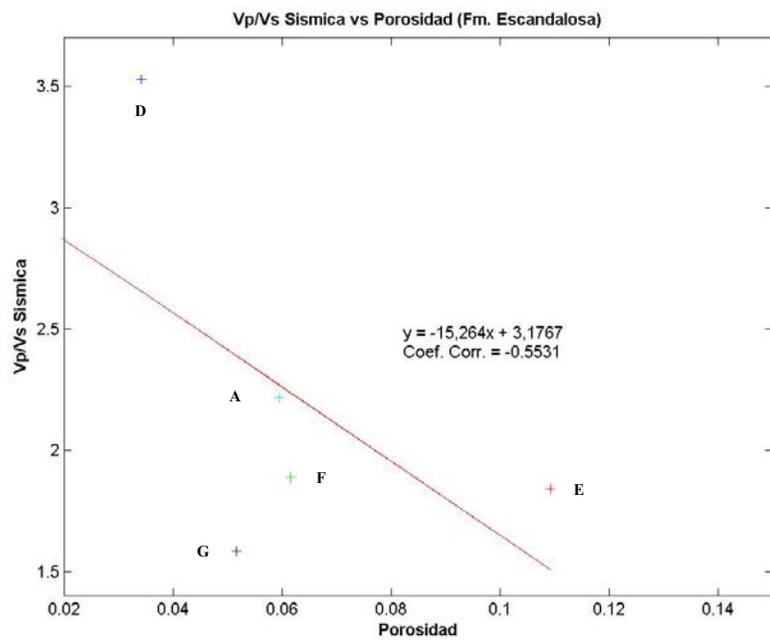


Figura 70. Vp/Vs obtenido de la sísmica vs Porosidad (Fm. Escandalosa).

## APÉNDICE C

**Rectas de ajuste, valores de velocidades simuladas e histogramas de frecuencia obtenidos para cada formación en cada pozo**

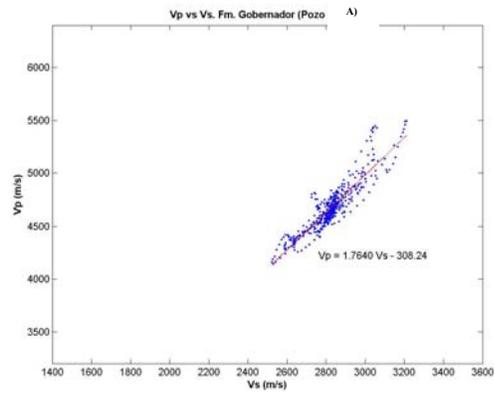


Figura 71. Gráfico Vp vs Vs com el ajuste lineal. Fm. Gobernador (Pozo A).

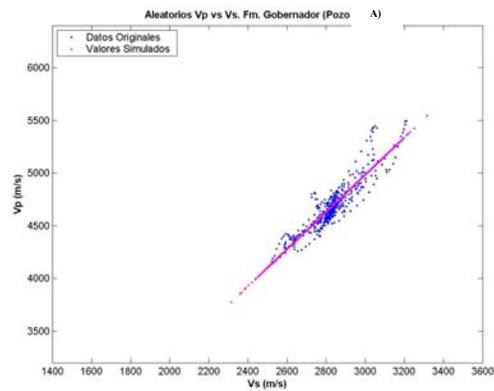


Figura 72. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Fm. Gobernador (Pozo A).

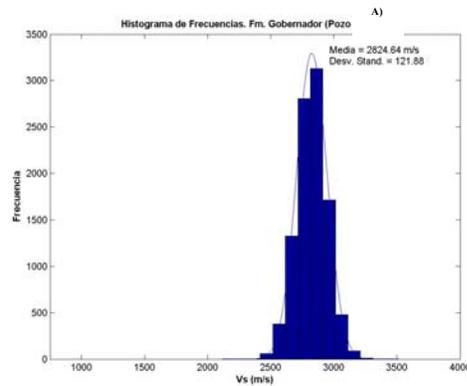


Figura 73. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Fm. Gobernador (Pozo A).

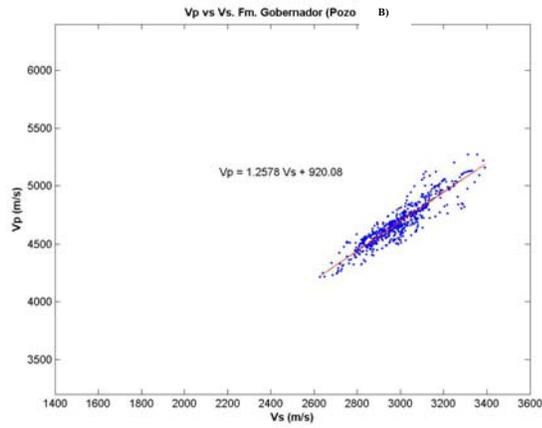


Figura 74. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Fm. Gobernador (Pozo B).

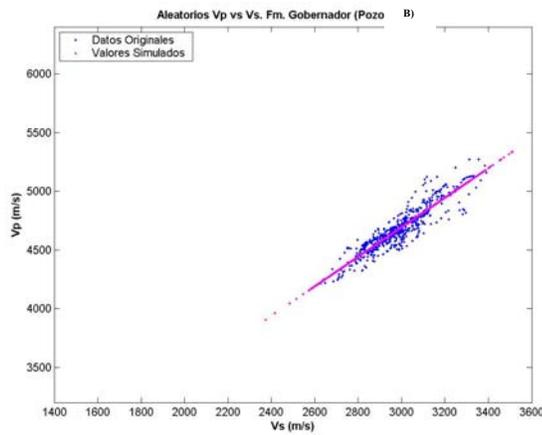


Figura 75. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Fm. Gobernador (Pozo B).

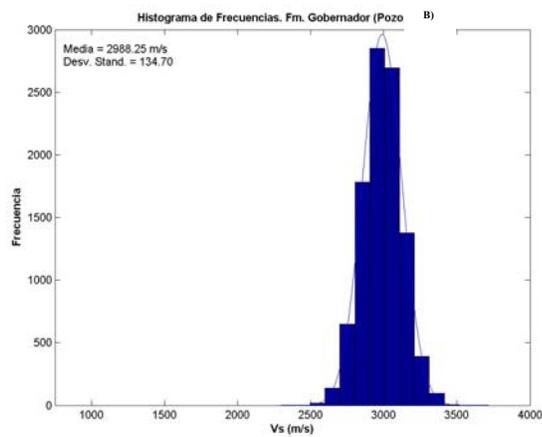


Figura 76. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Fm. Gobernador (Pozo B).

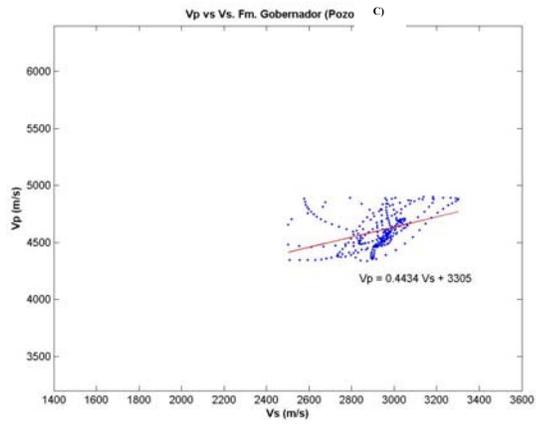


Figura 77. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Fm. Gobernador (Pozo C).

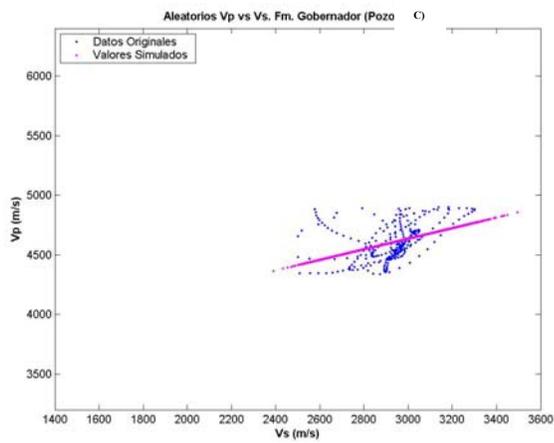


Figura 78. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Fm. Gobernador (Pozo C).

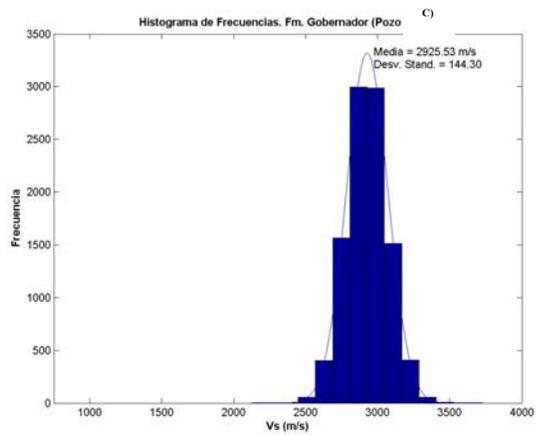


Figura 79. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Fm. Gobernador (Pozo C).

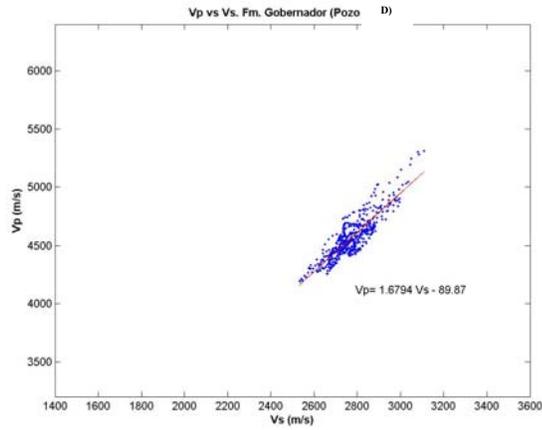


Figura 80. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Fm. Gobernador (Pozo D).

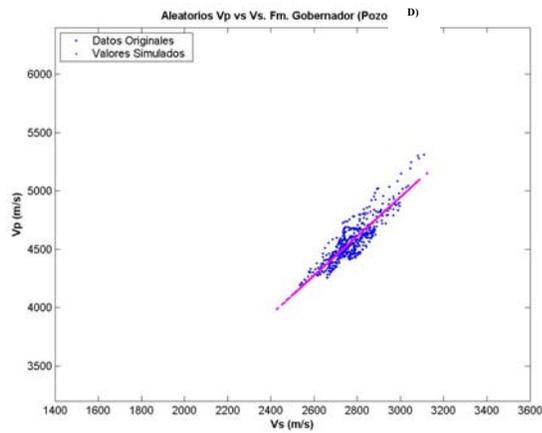


Figura 81. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Fm. Gobernador (Pozo D).

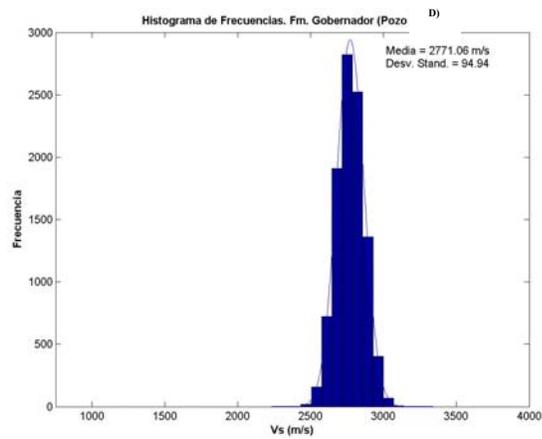


Figura 82. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Fm. Gobernador (Pozo D).

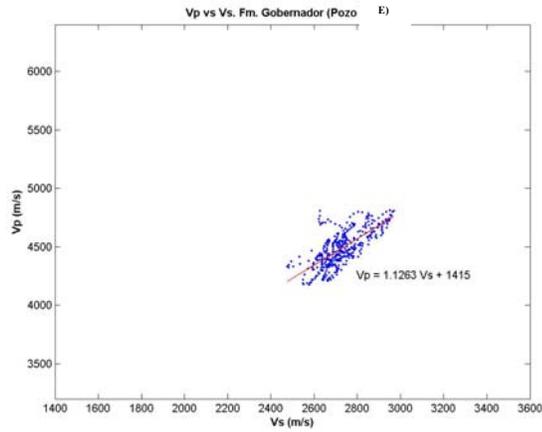


Figura 83. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Fm. Gobernador (Pozo E).

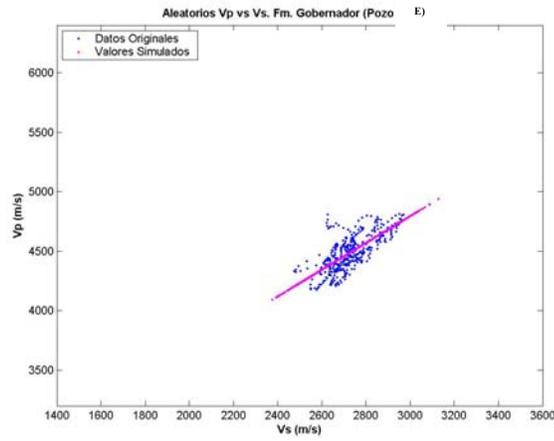


Figura 84. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Fm. Gobernador (Pozo E).

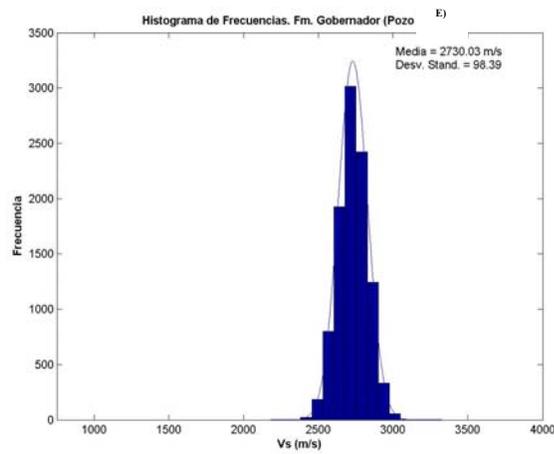


Figura 85. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Fm. Gobernador (Pozo E).

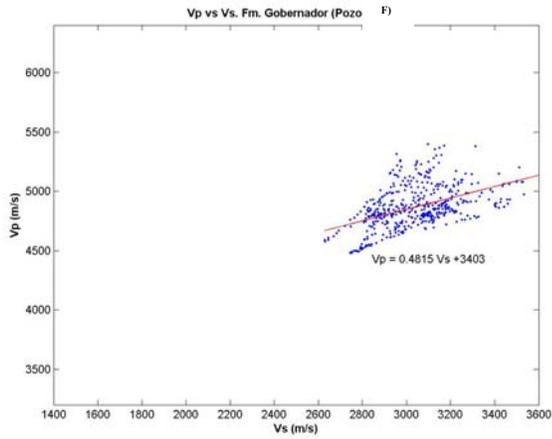


Figura 86. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Fm. Gobernador (Pozo F).

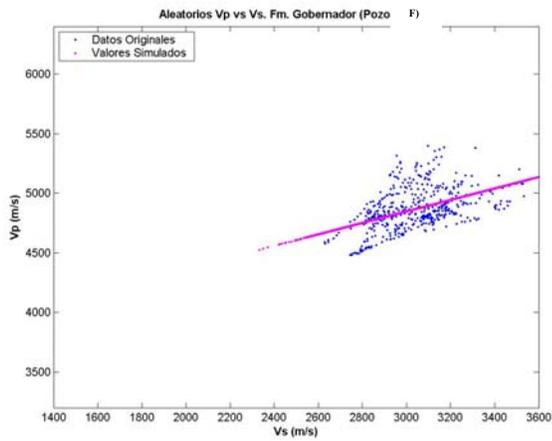


Figura 87. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Fm. Gobernador (Pozo F).

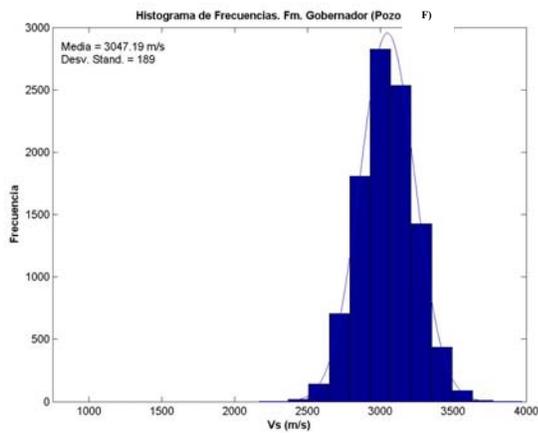


Figura 88. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Fm. Gobernador (Pozo F).

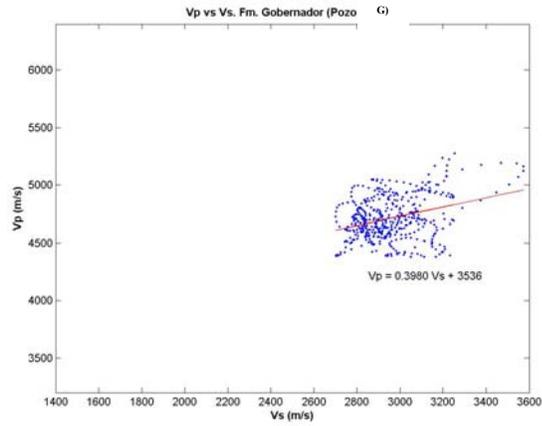


Figura 89. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Fm. Gobernador (Pozo G).

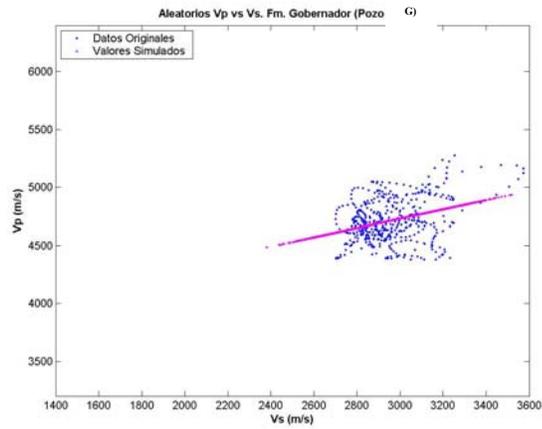


Figura 90. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Fm. Gobernador (Pozo G).

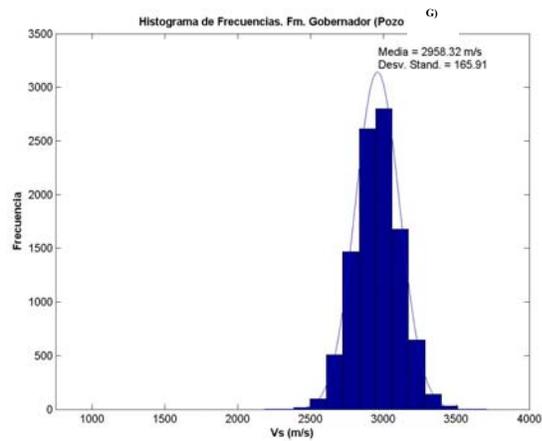


Figura 91. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Fm. Gobernador (Pozo G).

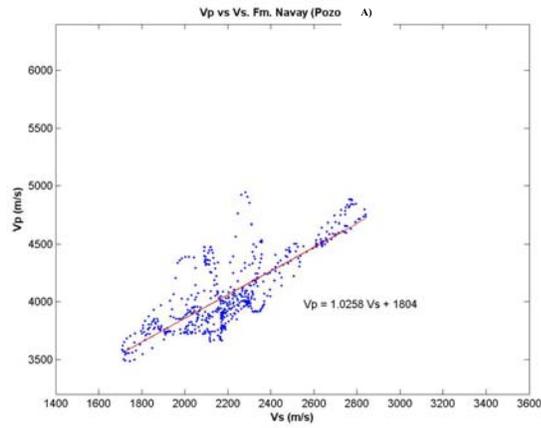


Figura 92. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Fm. Navay (Pozo A).

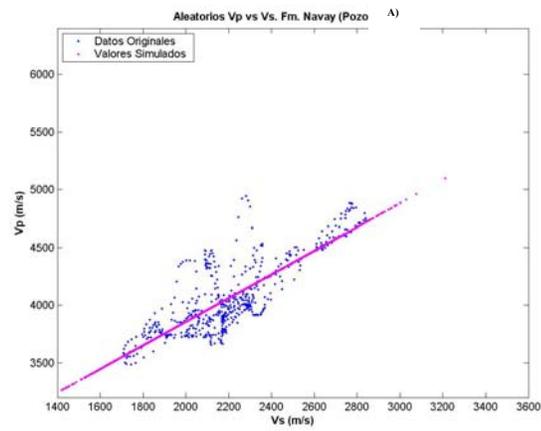


Figura 93. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Fm. Navay (Pozo A).

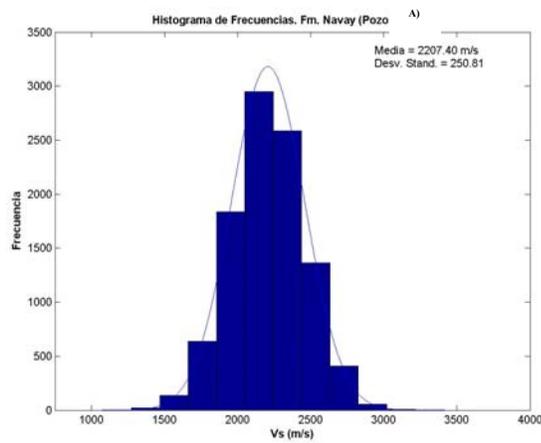


Figura 94. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Fm. Navay (Pozo A).

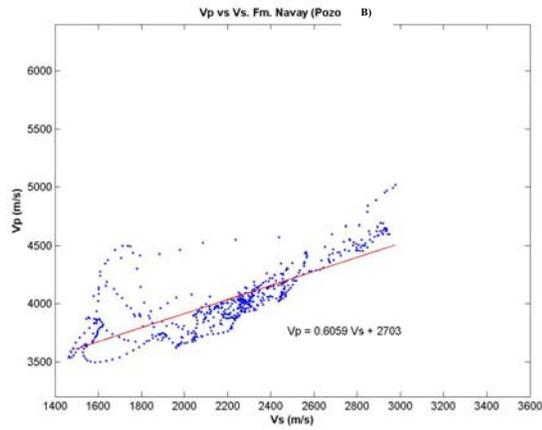


Figura 95. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Fm. Navay (Pozo B).

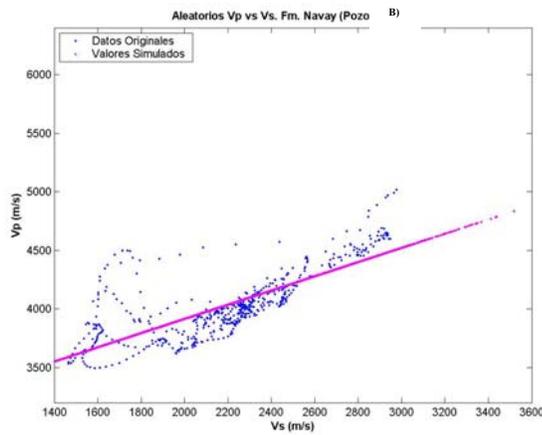


Figura 96. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Fm. Navay (Pozo B).

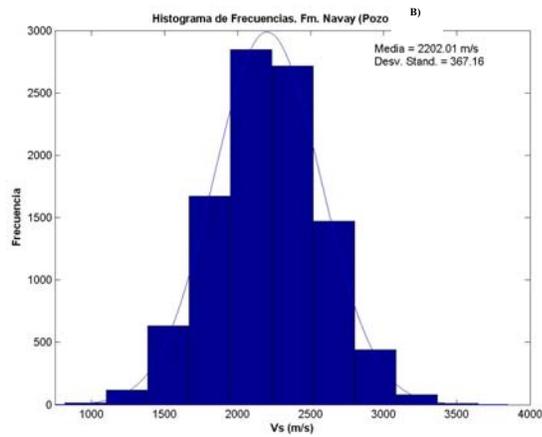


Figura 97. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Fm. Navay (Pozo B).

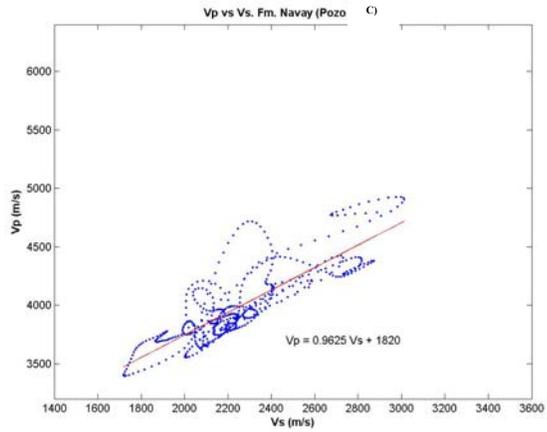


Figura 98. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Fm. Navay (Pozo C).

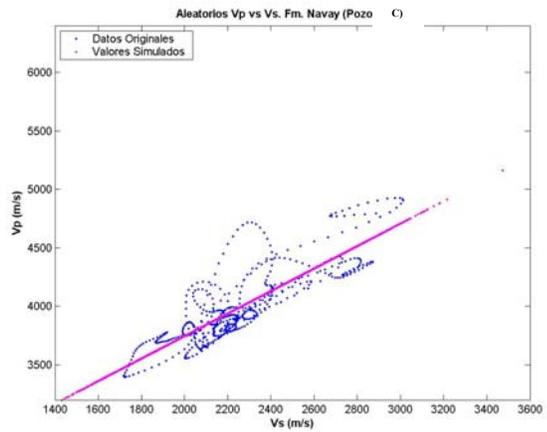


Figura 99. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Fm. Navay (Pozo C).

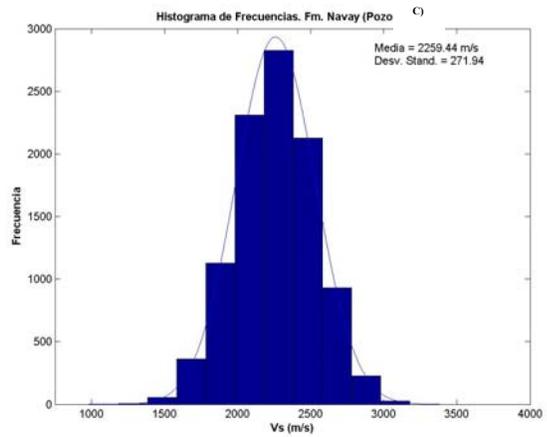


Figura 100. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Fm. Navay (Pozo C).

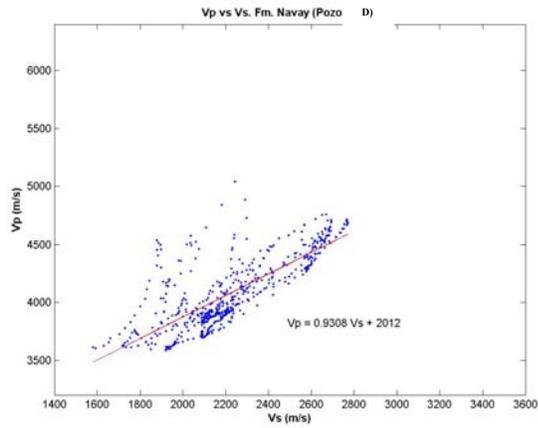


Figura 101. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Fm. Navay (Pozo D).

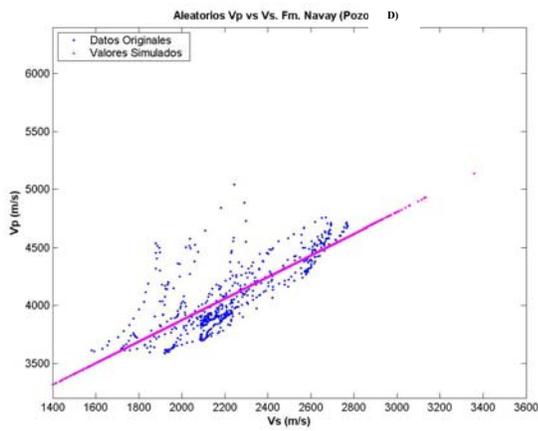


Figura 102. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Fm. Navay (Pozo D).

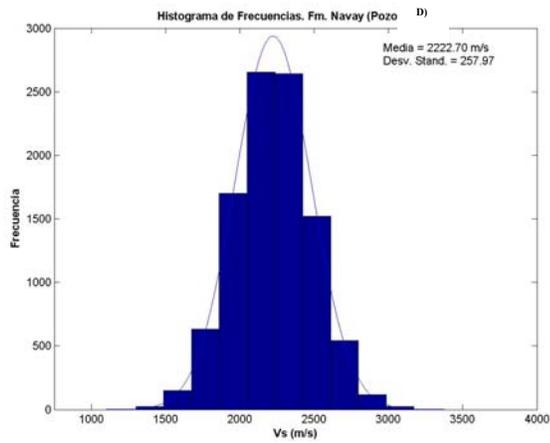


Figura 103. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Fm. Navay (Pozo D).

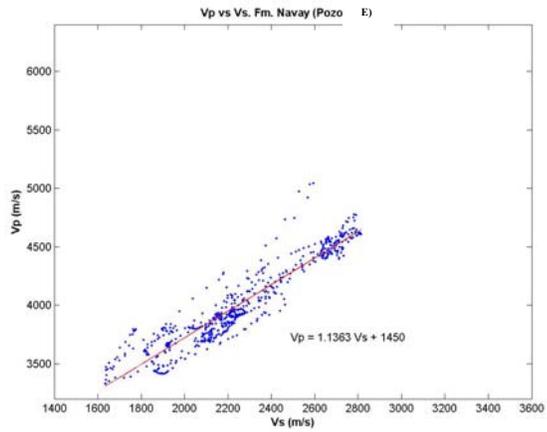


Figura 104. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Fm. Navay (Pozo E).

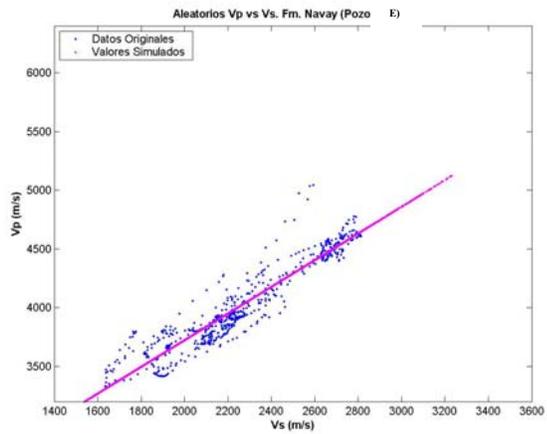


Figura 105. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Fm. Navay (Pozo E).

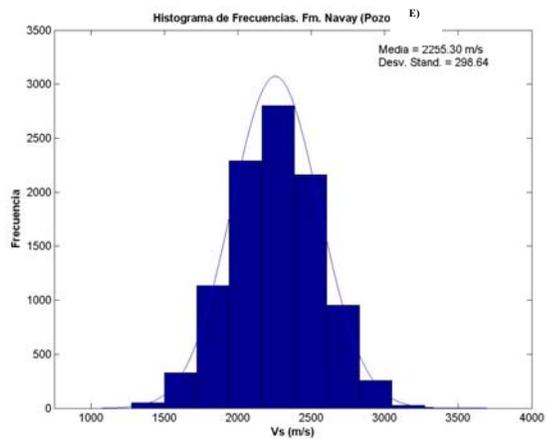


Figura 106. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Fm. Navay (Pozo E).

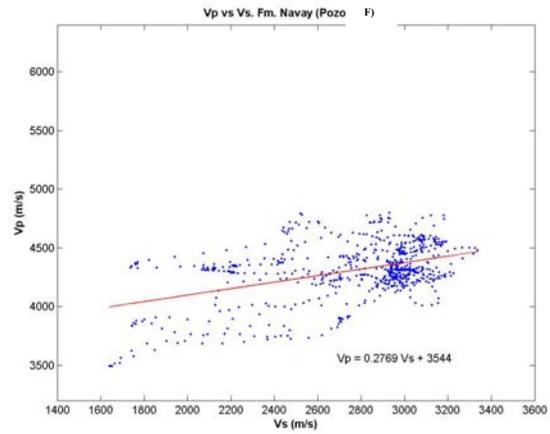


Figura 107. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Fm. Navay (Pozo F).

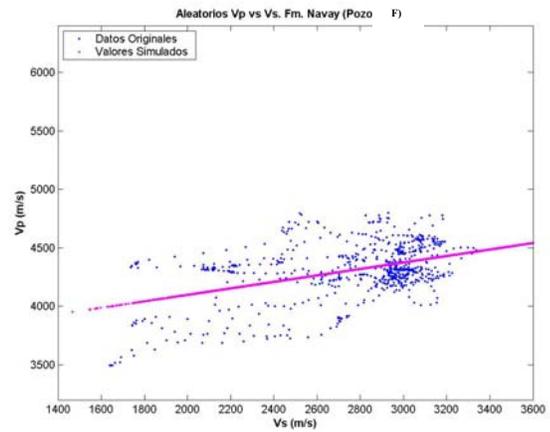


Figura 108. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Fm. Navay (Pozo F).

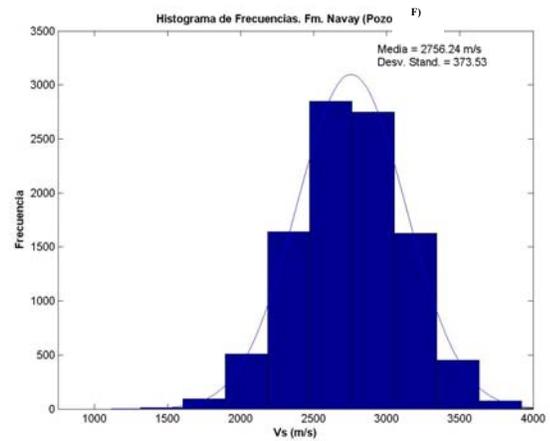


Figura 109. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Fm. Navay (Pozo F).

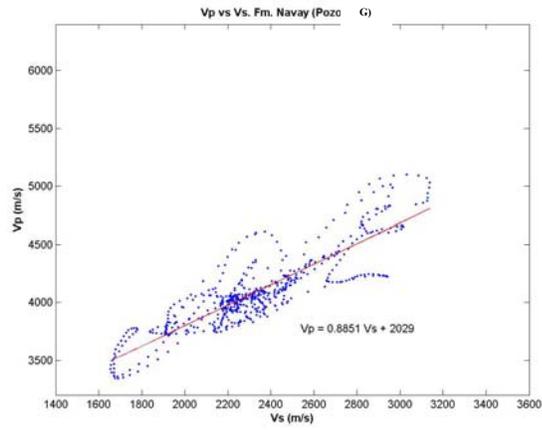


Figura 110. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Fm. Navay (Pozo G).

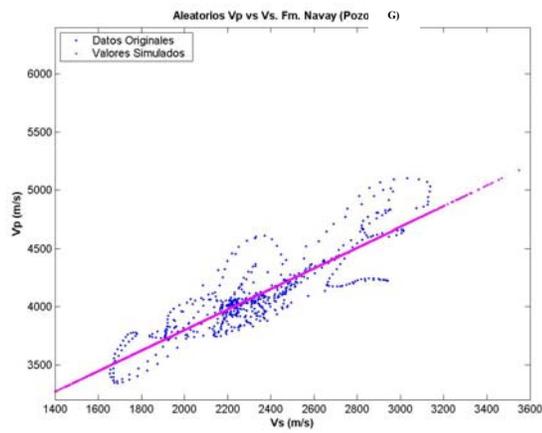


Figura 111. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Fm. Navay (Pozo G).

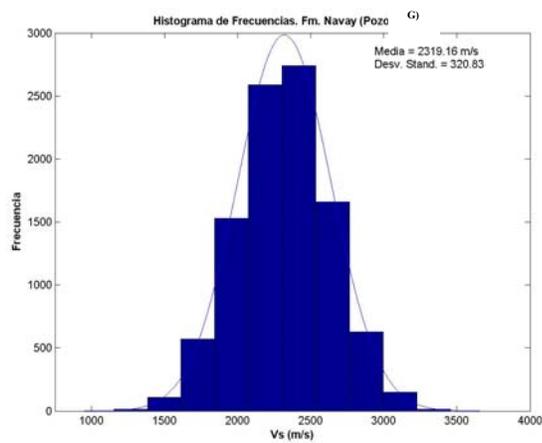


Figura 112. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Fm. Navay (Pozo G).

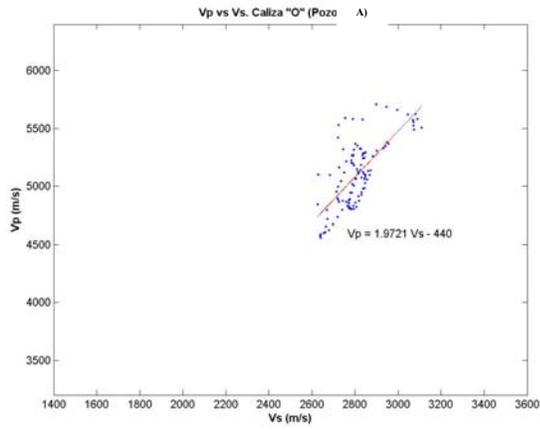


Figura 113. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Caliza "O" (Pozo A).

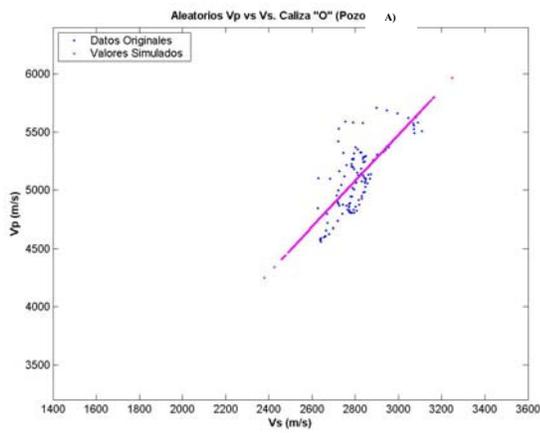


Figura 114. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Caliza "O" (Pozo A).

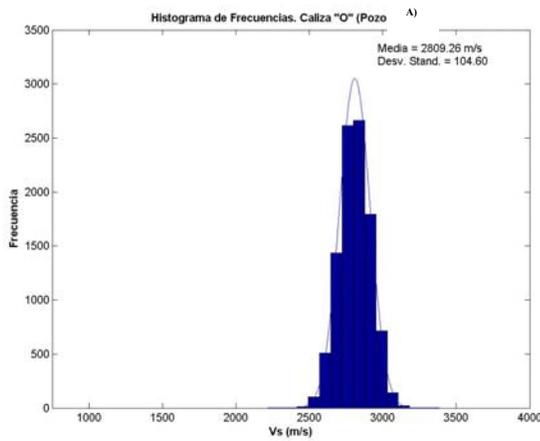


Figura 115. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Caliza "O" (Pozo A).

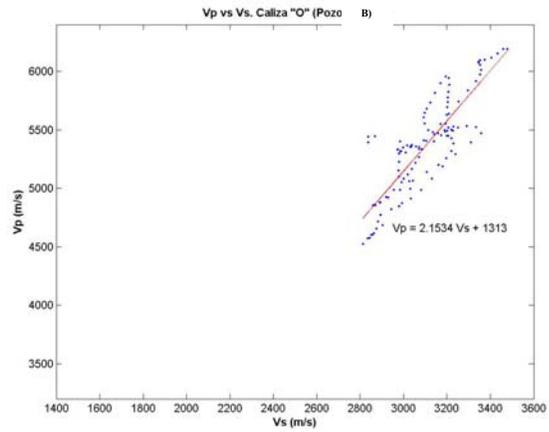


Figura 116. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Caliza "O" (Pozo B).

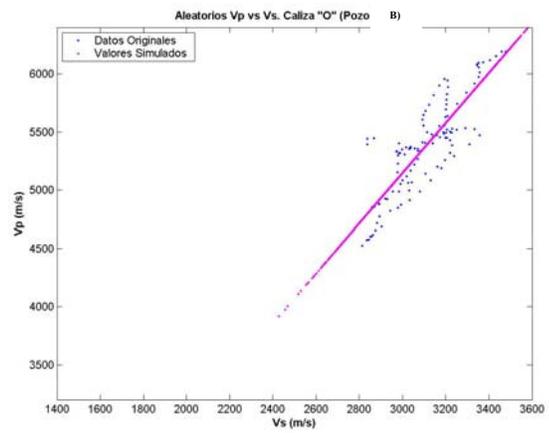


Figura 117. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Caliza "O" (Pozo B).

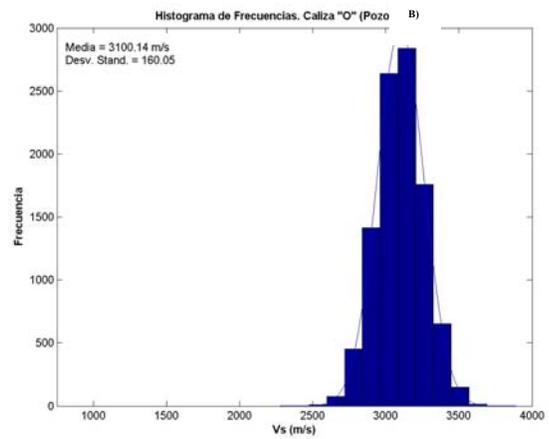


Figura 118. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Caliza "O" (Pozo B).

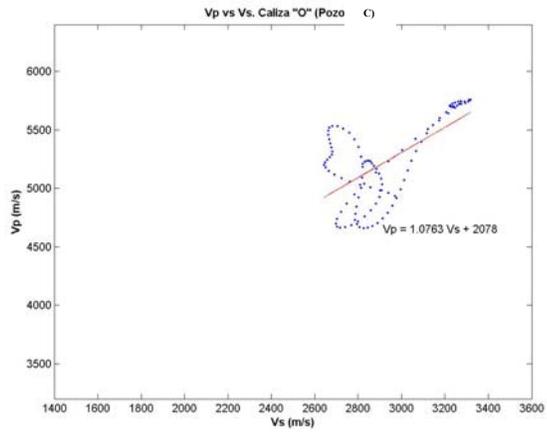


Figura 119. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Caliza "O" (Pozo C).

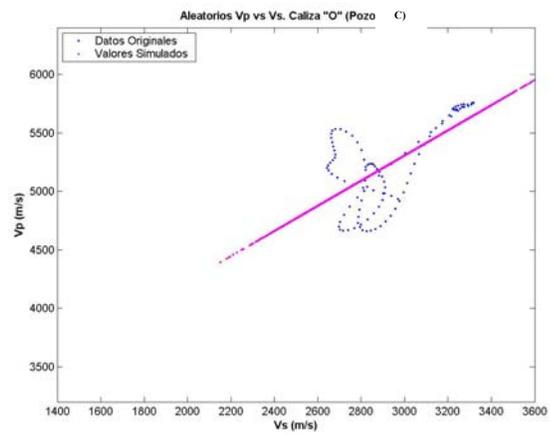


Figura 120. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Caliza "O" (Pozo C).

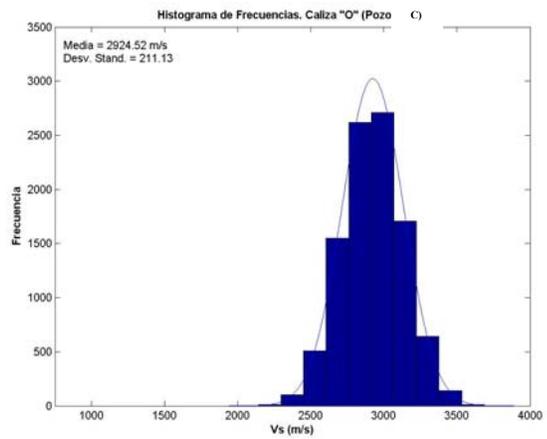


Figura 121. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Caliza "O" (Pozo C).

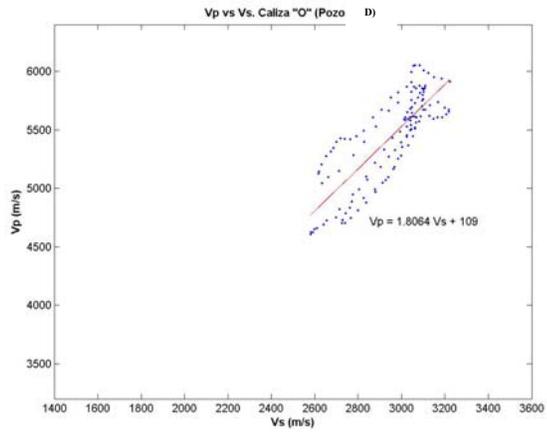


Figura 122. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Caliza "O" (Pozo D).

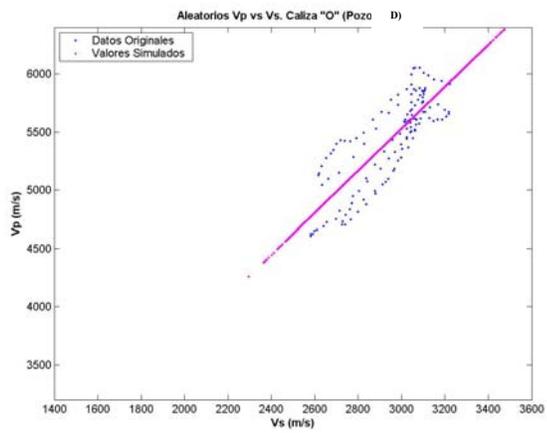


Figura 123. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Caliza "O" (Pozo D).

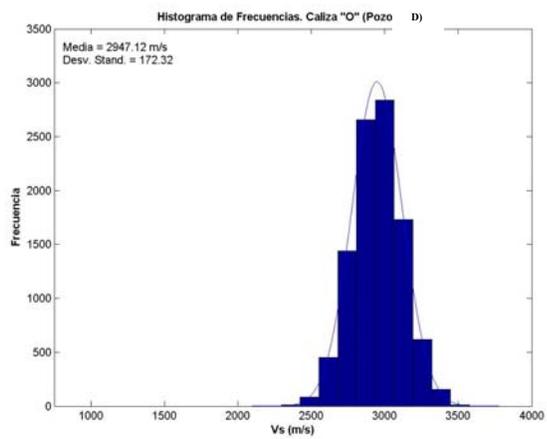


Figura 124. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Caliza "O" (Pozo D).

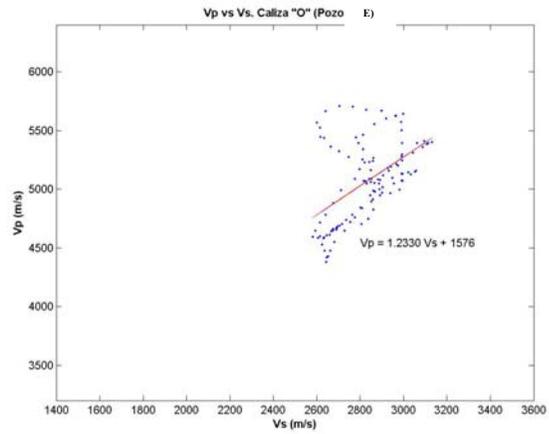


Figura 125. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Caliza "O" (Pozo E).

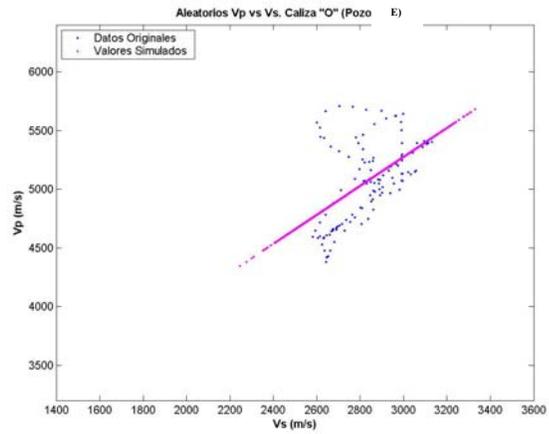


Figura 126. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Caliza "O" (Pozo E).

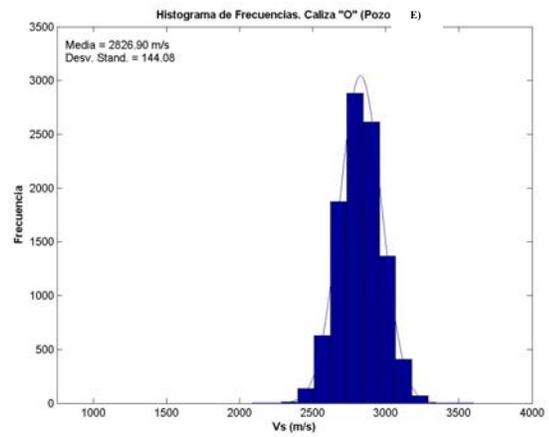


Figura 127. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Caliza "O" (Pozo E).

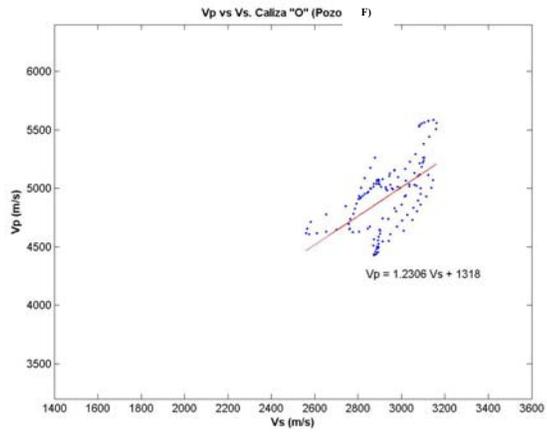


Figura 128. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Caliza "O" (Pozo F).

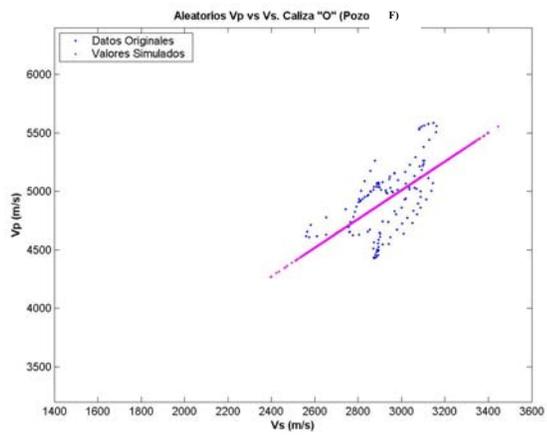


Figura 129. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Caliza "O" (Pozo F).

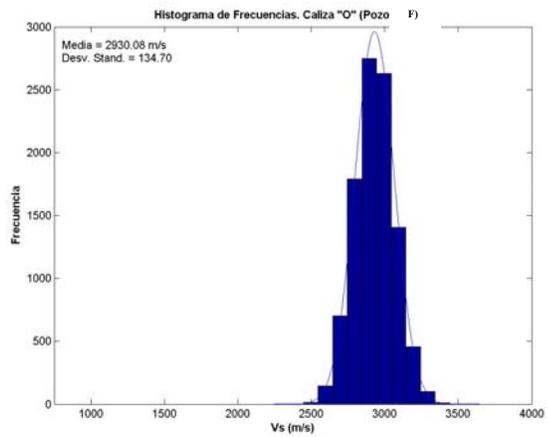


Figura 130. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Caliza "O" (Pozo F).

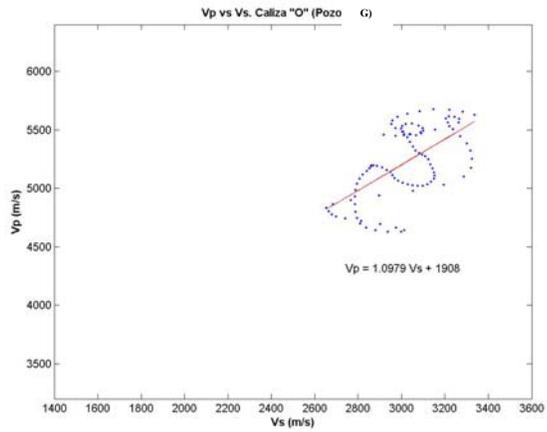


Figura 131. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Caliza "O" (Pozo G).

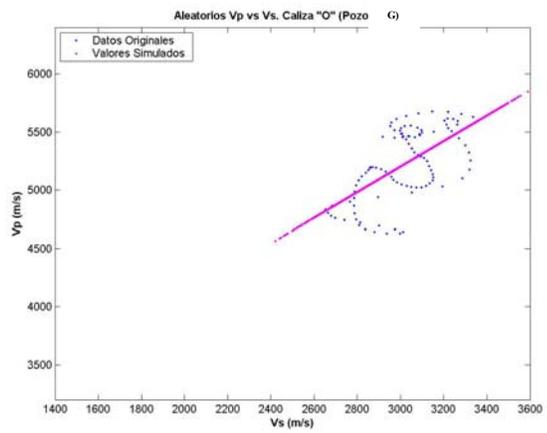


Figura 132. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Caliza "O" (Pozo G).

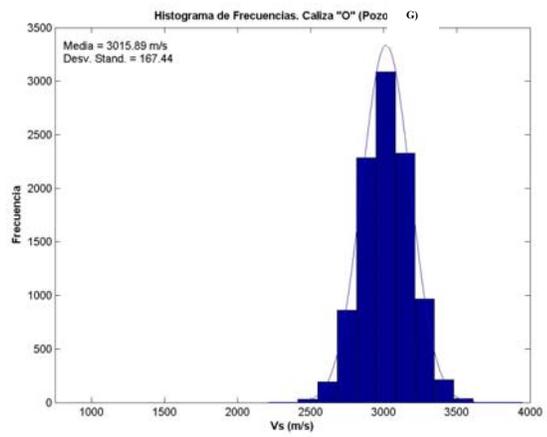


Figura 133. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Caliza "O" (Pozo G).

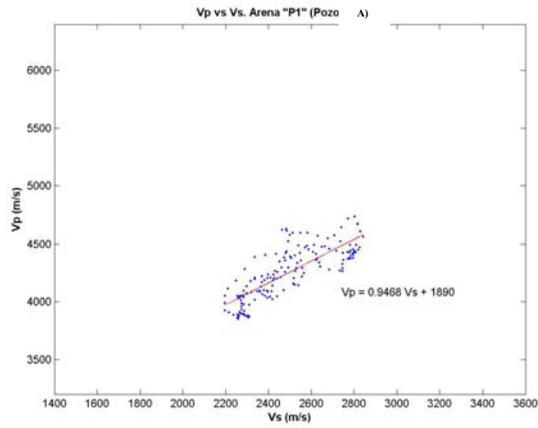


Figura 134. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Arena "P1" (Pozo A).

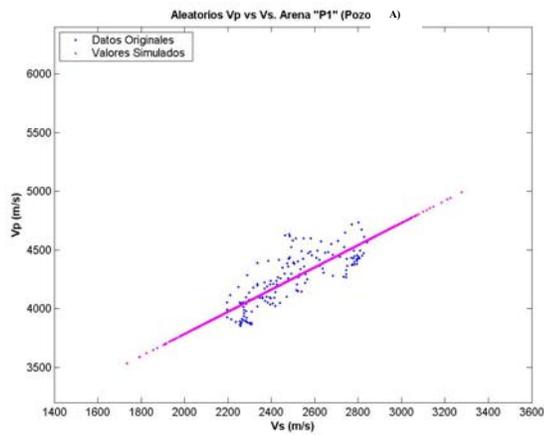


Figura 135. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Arena "P1" (Pozo A).

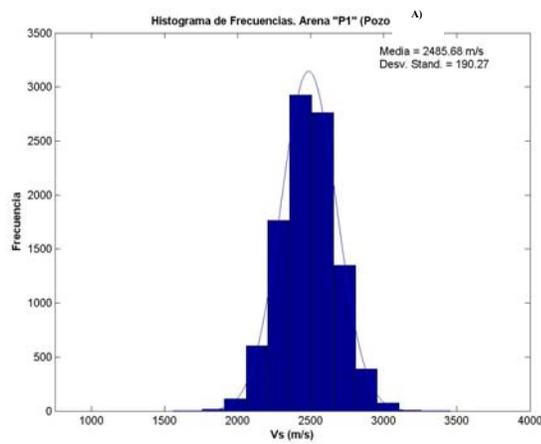


Figura 136. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Arena "P1" (Pozo A).

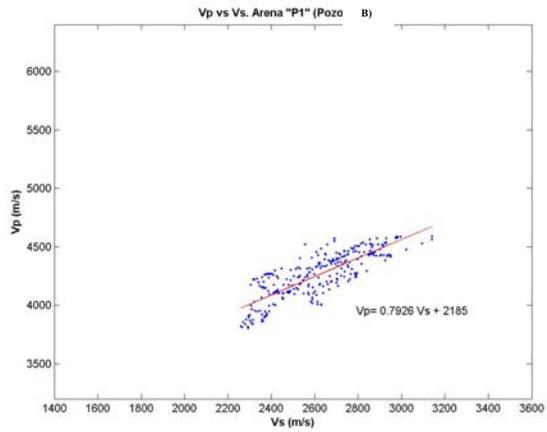


Figura 137. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Arena "P1" (Pozo B).

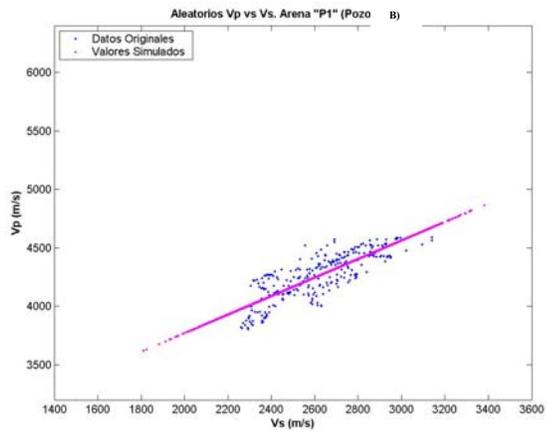


Figura 138. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Arena "P1" (Pozo B).

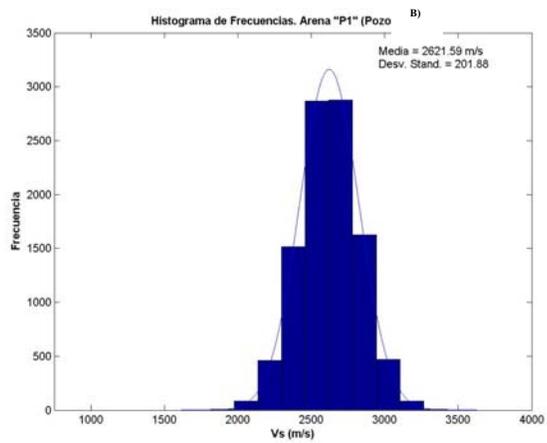


Figura 139. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Arena "P1" (Pozo B).

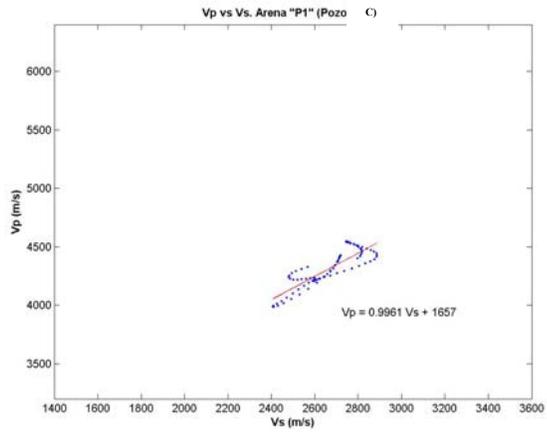


Figura 140. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Arena "P1" (Pozo C).

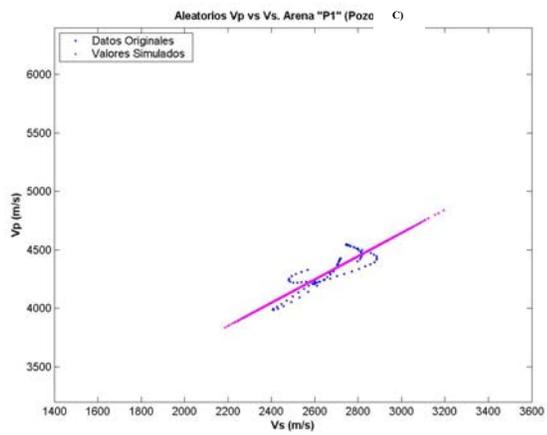


Figura 141. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Arena "P1" (Pozo C).

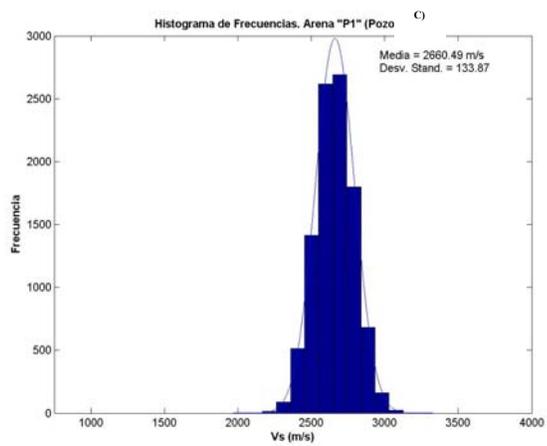


Figura 142. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Arena "P1" (Pozo C).

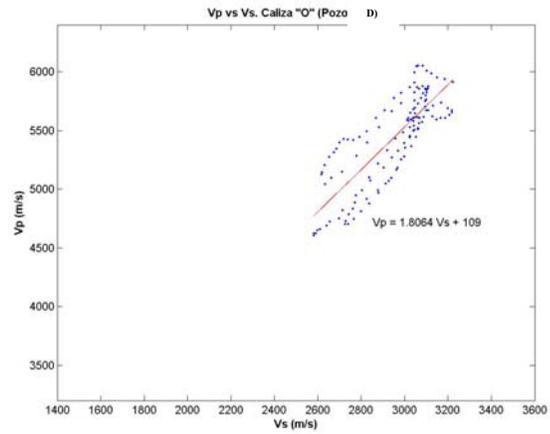


Figura 143. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Arena "P1" (Pozo D).

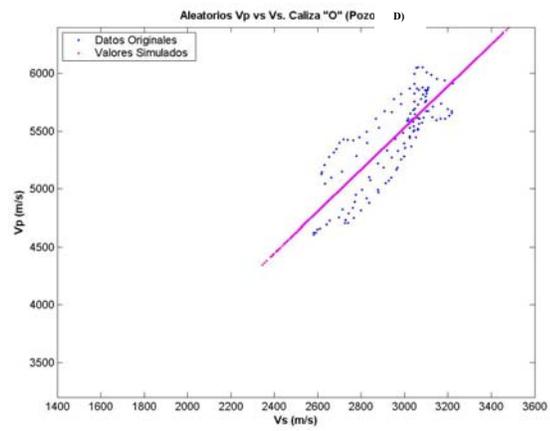


Figura 144. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Arena "P1" (Pozo D).

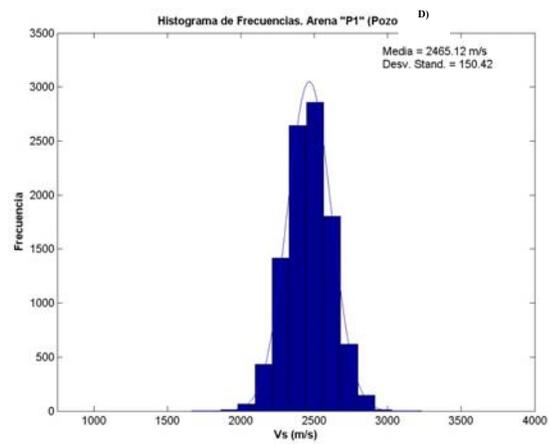


Figura 145. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Arena "P1" (Pozo D).

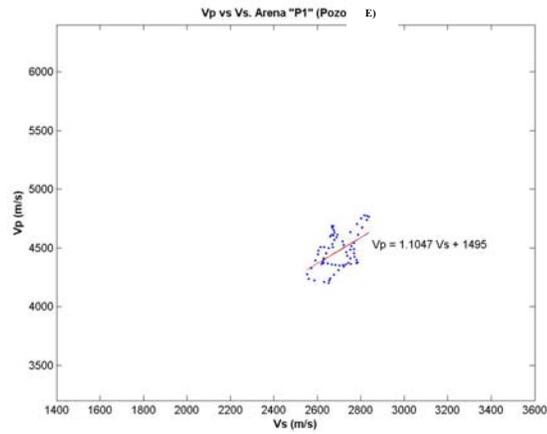


Figura 146. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Arena "P1" (Pozo E).

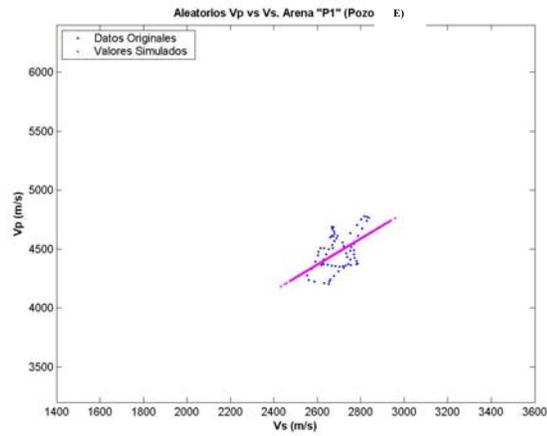


Figura 147. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Arena "P1" (Pozo E).

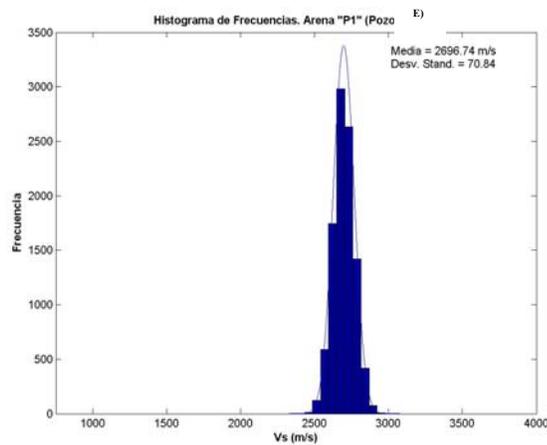


Figura 148. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Arena "P1" (Pozo E).

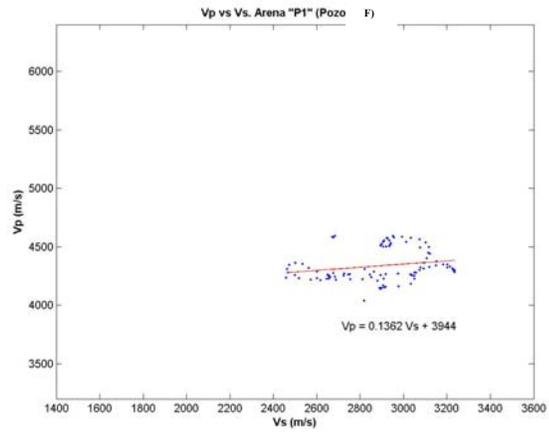


Figura 149. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Arena "P1" (Pozo F).

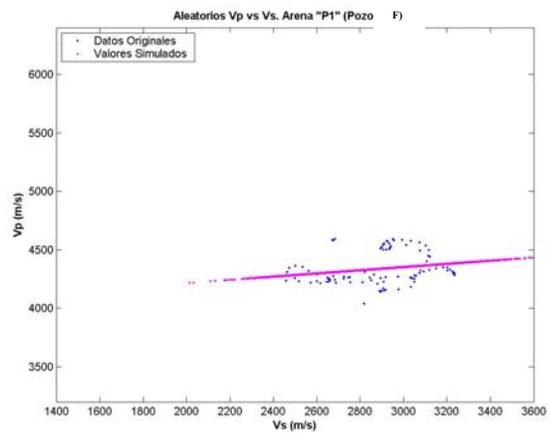


Figura 150. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Arena "P1" (Pozo F).

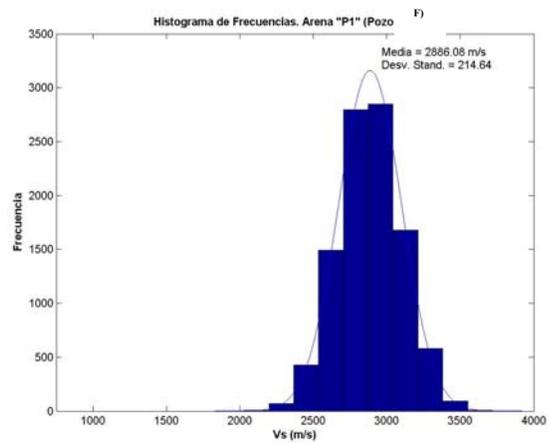


Figura 151. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Arena "P1" (Pozo F).

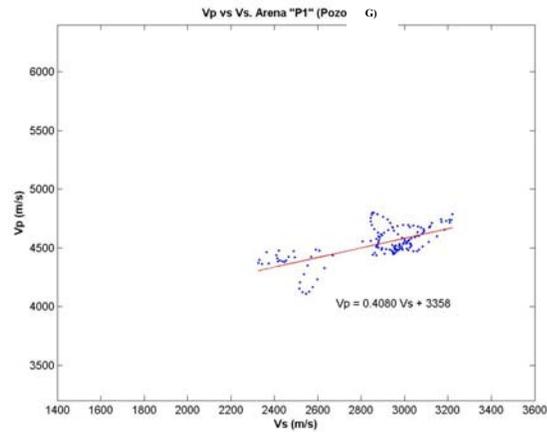


Figura 152. Gráfico Vp vs Vs con el ajuste lineal. Arena "P1" (Pozo G).

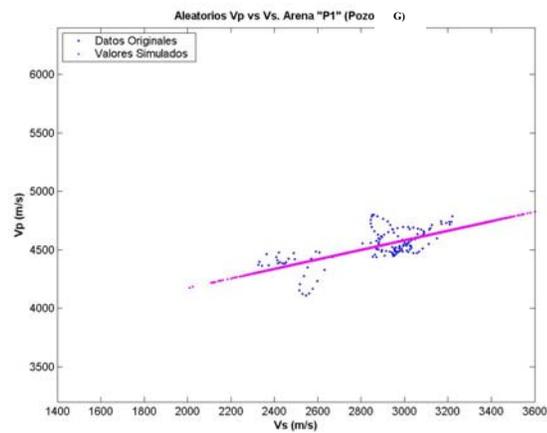


Figura 153. Gráfico Vp vs Vs con los valores simulados de Vp y Vs. Arena "P1" (Pozo G).

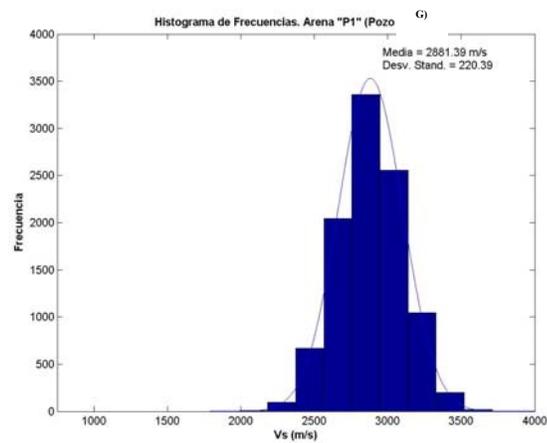


Figura 154. Histograma de frecuencias para los valores de Vs simulados. Arena "P1" (Pozo G).

## APÉNDICE D

### Tablas de media y desviación estándar para Vs y Vp/Vs

	Gobernador		Navay		Caliza "O"		Arena "P1"	
	Media (m/s)	$\sigma$						
A	2824	121.88	2207	250.81	2809	104.60	2485	190.27
B	2988	134.70	2202	367.16	3100	160.05	2621	201.88
C	2925	144.30	2259	271.94	2924	211.13	2660	133.87
D	2771	94.94	2222	257.97	2947	172.32	2465	150.42
E	2730	98.39	2255	298.64	2826	144.08	2696	70.84
F	3047	189	2756	373.53	2930	134.70	2886	214.64
G	2958	165.91	2319	320.83	3015	167.44	2881	220.39

Tabla 19. Resumen con los valores a partir de los cuales se generaron los valores aleatorios de Vs.

	Gobernador		Navay		Caliza "O"		Arena "P1"	
	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$	Media	$\sigma$
A	1.6546082	0.00834	1.8549806	0.099	1.8165444	0.0294	1.7148354	0.0685
B	1.5667324	0.0150	1.8717889	0.232	1.7285204	0.0235	1.6335554	0.0676
C	1.5835427	0.0914	1.7794292	0.105	1.7903309	0.0536	1.6220845	0.0382
D	1.6469813	0.00675	1.8495499	0.111	1.8438044	0.00911	1.6889845	0.0483
E	1.6479033	0.0364	1.7917828	0.092	1.7923493	0.0309	1.6612999	0.0234
F	1.6046862	0.0720	1.5909036	0.193	1.6813839	0.0224	1.5126021	0.105
G	1.5962684	0.0640	1.7778733	0.132	1.7337564	0.0373	1.5826483	0.094

Tabla 20. Resumen con los valores promedio y de desviación estándar de los Vp/Vs obtenidos de la simulación.

## APÉNDICE E

### Distribuciones Bivariadas $V_p/V_s$ vs $V_p$

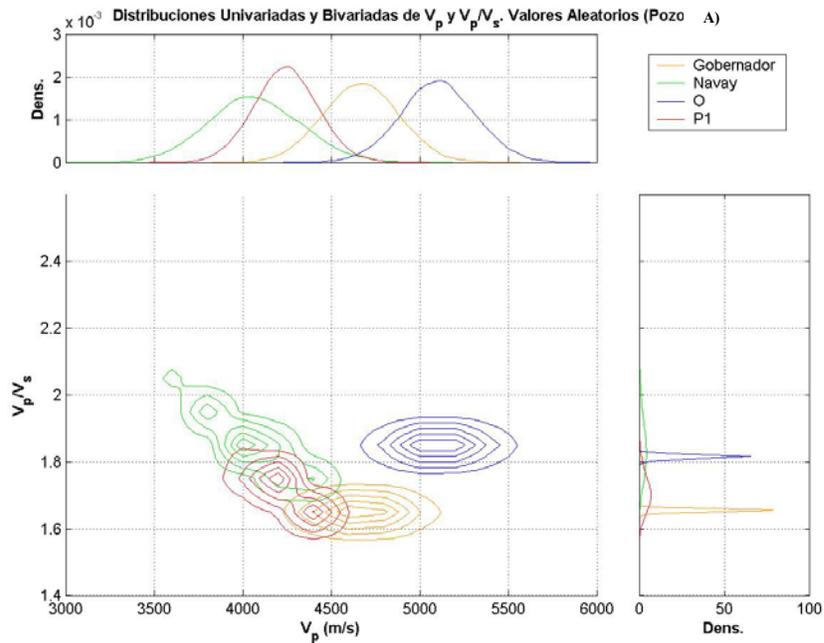


Figura 155. Distribución Bivariada  $V_p/V_s$  vs  $V_p$  (Pozo A).

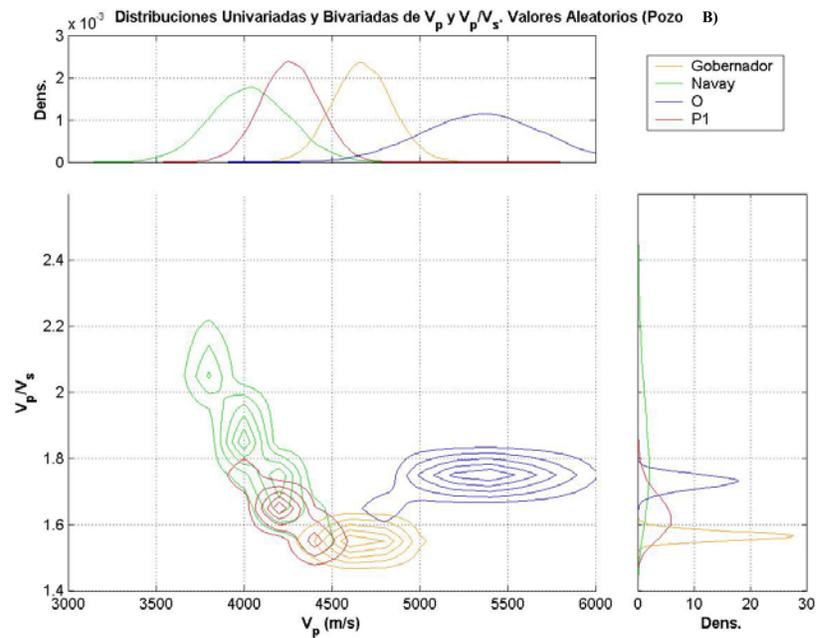


Figura 156. Distribución Bivariada  $V_p/V_s$  vs  $V_p$  (Pozo B).

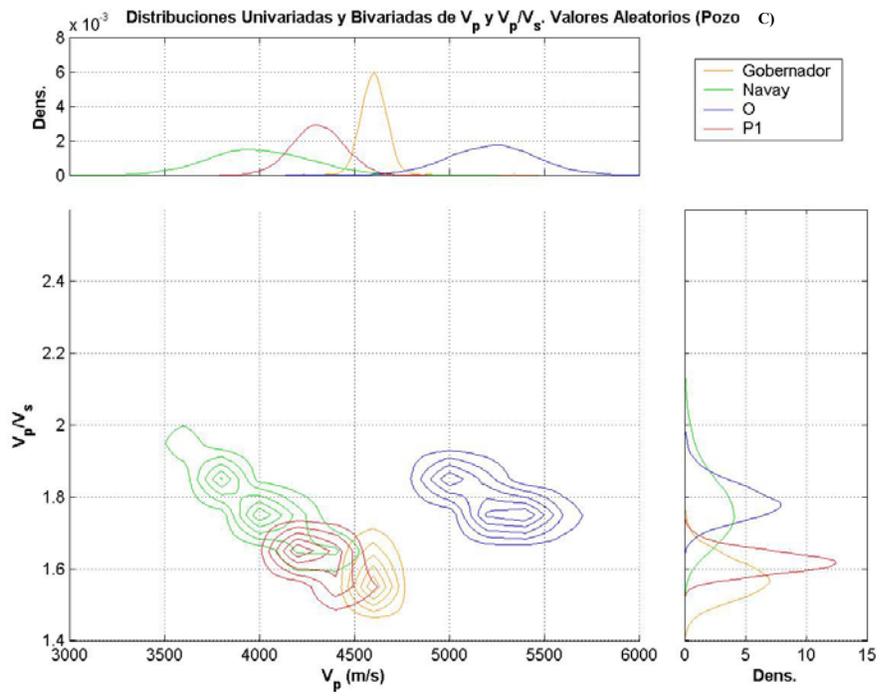


Figura 157. Distribución Bivariada  $V_p/V_s$  vs  $V_p$  (Pozo C).

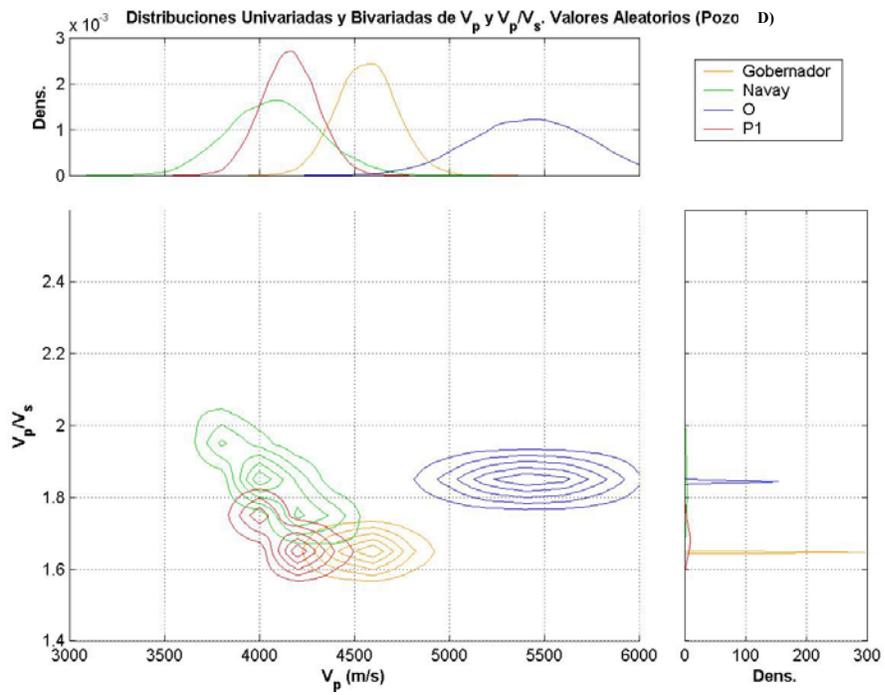


Figura 158. Distribución Bivariada  $V_p/V_s$  vs  $V_p$  (Pozo D).

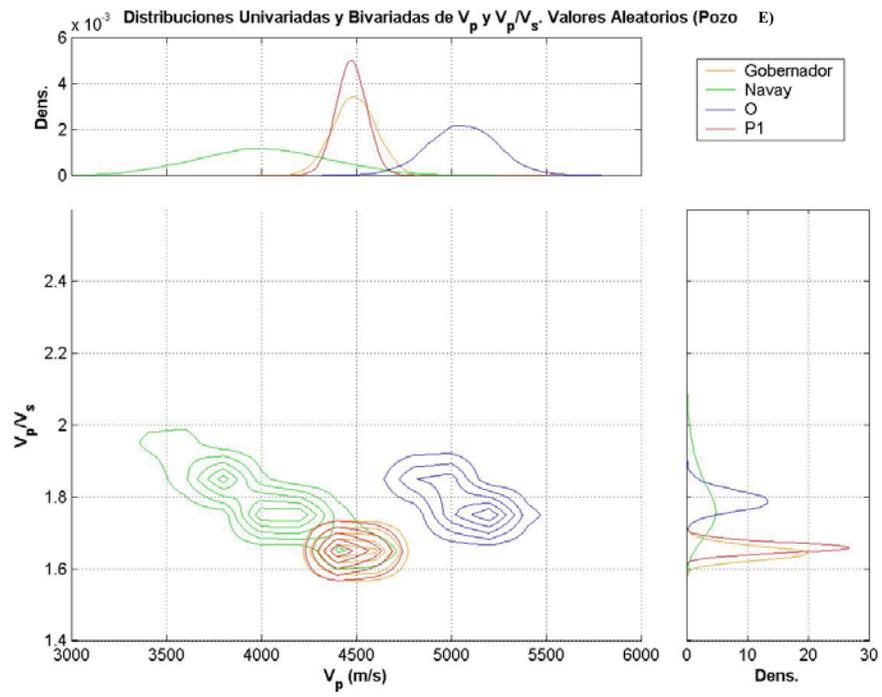


Figura 159. Distribución Bivariada  $V_p/V_s$  vs  $V_p$  (Pozo E).

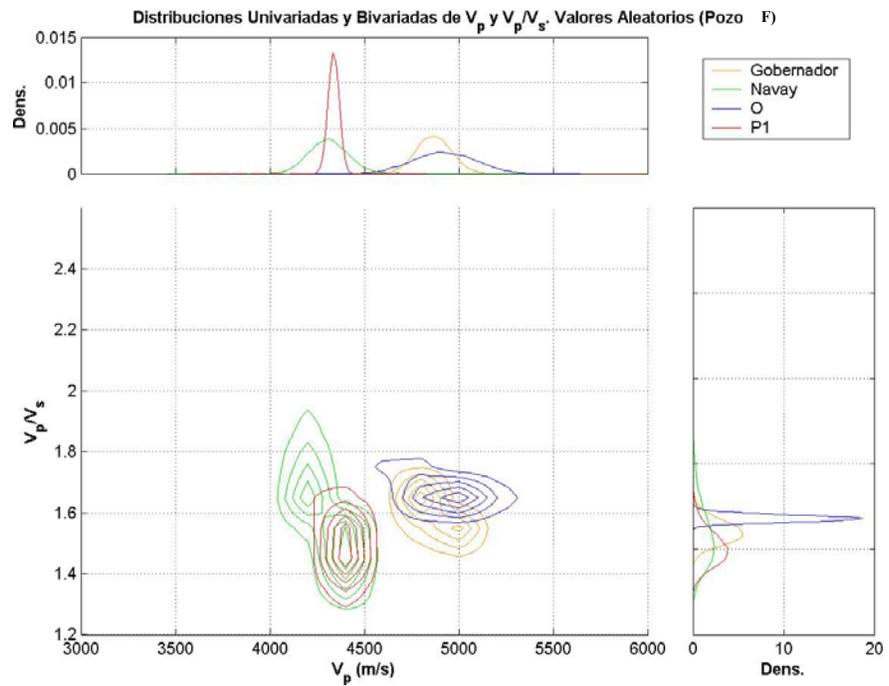


Figura 160. Distribución Bivariada  $V_p/V_s$  vs  $V_p$  (Pozo F).

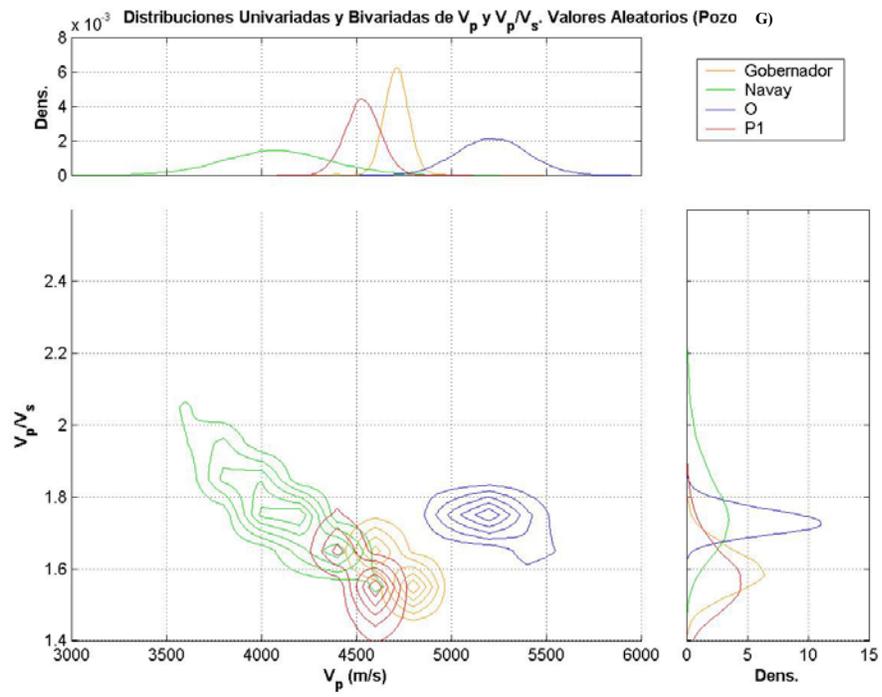


Figura 161. Distribución Bivariada  $V_p/V_s$  vs  $V_p$  (Pozo G).