

	UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA			
	Documento	Código	Fecha	Revisión
FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO	F-AC-DBL-007	10-04-2012	A	
Dependencia	Aprobado		Pág.	
DIVISIÓN DE BIBLIOTECA	SUBDIRECTOR ACADEMICO		1(289)	

RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTORES	CIRO ANDREY MARTINEZ OVALLOS JEISON STIVEN SEPULVEDA SANCHEZ		
FACULTAD	INGENIERIAS		
PLAN DE ESTUDIOS	INGENIERIA CIVIL		
DIRECTOR	ROMEL JESÚS GALLARDO AMAYA		
TÍTULO DE LA TESIS	DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DINÁMICOS EN LOS MATERIALES QUE COMPONEN LA FORMACIÓN ALGODONAL EN OCAÑA NORTE DE SANTANDER MEDIANTE MÉTODOS GEOFÍSICOS.		
RESUMEN (70 palabras aproximadamente)			
<p>EL PRESENTE TRABAJO DE GRADO TIENE POR OBJETIVO LA DETERMINACIÓN DE LA PROPIEDADES DINÁMICAS EN LOS MATERIALES QUE COMPONEN LA FORMACIÓN ALGODONAL, MEDIANTES LOS MÉTODOS DE REFRACCIÓN SÍSMICA Y MASW.</p> <p>AL ESTABLECER LAS VELOCIDADES DE ONDAS P Y ONDAS S, EN DIFERENTES PUNTOS DE ESTUDIO EN EL CASCO URBANO DE OCAÑA, Y POSTERIORMENTE CALCULAR LOS PARÁMETROS DINÁMICOS, SE REALIZÓ UN ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS PARA CONSIDERAR LA DISPERSIÓN DE ESTOS A FIN DE ESTABLECER LOS RANGOS DE VALORES TÍPICOS SOBRE LA FORMACIÓN.</p>			
CARACTERÍSTICAS			
PÁGINAS: 289	PLANOS:	ILUSTRACIONES:	CD-ROM:1



DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DINÁMICOS EN LOS MATERIALES
QUE COMPONEN LA FORMACIÓN ALGODONAL EN OCAÑA NORTE DE
SANTANDER MEDIANTE MÉTODOS GEOFÍSICOS.

AUTORES

CIRO ANDREY MARÍNEZ OVALLOS

JEISON STIVEN SEPÚLVEDA SÁNCHEZ

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Civil

DIRECTOR

MSc. ROMEL J. GALLARDO AMAYA
INGENIERO CIVIL

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

INGENIERÍA CIVIL

Ocaña, Colombia

Septiembre de 2017

Dedicatoria

Este logro, lo dedico inicialmente a mi madre Leonor Sánchez Hernández por su dedicación, apoyo y amor constante que han sido un pilar importante en todo el proceso de formación personal y profesional, porque es quien siempre me ha motivado a ser cada día mejor.

A mi hermano, Félix Andrés Sepúlveda Sánchez por estar siempre para ayudarme y apoyarme en todos los momentos de mi vida, y por su gran aporte a la realización de este proyecto.

A mi compañero de proyecto, Ciro Andrey Martínez Ovallos por su incansable trabajo para hacer de esta meta una realidad.

A cada una de las personas que me dieron su apoyo, que me ayudaron a ir construyendo este sueño, que ahora es una realidad.

Jeison Stiven Sepúlveda Sánchez

Dedicatoria

Finalizada una etapa volvemos la vista atrás, recordando esos momentos importantes y que han sido claves en el camino que nos llevó al lugar donde estamos, y recordamos a todas esas personas que estuvieron de nuestro lado, brindando un apoyo incondicional para continuar y dar nuestro mejor esfuerzo, es por ello que quiero dedicar este proyecto a mi familia, quien ha puesto en mí la confianza y el apoyo para afrontar los diferentes retos que a través de estos cinco años se han presentado y por estar siempre presentes en los momentos más difíciles con su guía y consejo.

A Dios, por ser mi refugio, y por guiar siempre mis decisiones, a mi madre Edelmira Ovallos por su increíble comprensión y amor incondicional, A mi padre Ciro Alfonso Martínez por su esfuerzo y confianza en mí, a Mis hermanos Sebastián Martínez y Anyi Liceth Martínez por ser las dos personas más valiosas y especiales en el mundo, a quienes debo mi esmero por alcanzar el éxito.

A mi compañero de tesis Jeison Stiven Sepúlveda, por su ayuda y compromiso en alcanzar juntos este logro, por su amistad y compañía que hicieron más ameno el desarrollo de este proyecto.

A mis compañeros Camilo Roper, Fernando Ovalle, Gabriela Oliveros, Jhon Sánchez y especialmente Alejandra Sanjuan, a quienes debo su amistad y confianza, y cinco años de increíbles experiencias.

Ciro Andrey Martínez Ovallos

Agradecimientos

Los autores de este proyecto expresan sus agradecimientos a todas aquellas personas que estuvieron involucradas en el mismo, inicialmente al ingeniero Romel Gallardo Amaya, por su apoyo y acompañamiento. A los ingenieros Agustín Armando Macgregor, Sandra Duran Duran y Pedro Báez por su tiempo y dedicación en la elaboración de este trabajo.

Al grupo de investigación PANGEA y al geofísico Jairo Alberto Torres, por su asesoría, Finalmente a Ciro Martínez, Edelmira Ovallos, Felix Sepúlveda, Jhon Sánchez, Angie Muños y José Sánchez, por su colaboración en el desarrollo de los ensayos de campo.

CONTENIDO

CAPITULO 1: DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DINÁMICOS EN LOS MATERIALES QUE COMPONEN LA FORMACIÓN ALGODONAL EN OCAÑA NORTE DE SANTANDER MEDIANTE MÉTODOS GEOFÍSICOS.....	1
1.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	1
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.3. OBJETIVOS	3
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	3
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.4. JUSTIFICACIÓN	3
1.5. DELIMITACIONES.....	5
CAPÍTULO 2: MARCO REFERENCIAL	7
2.1. MARCO HISTÓRICO.....	7
2.2. MARCO CONCEPTUAL.....	10
2.2.1. ONDA	10
2.2.2. ONDAS PRIMARIAS.....	11
2.2.3. ONDAS SECUNDARIAS:.....	13
2.2.4. ONDAS DE SUPERFICIE:	15
2.2.5. ONDAS DE RAYLEIGH	16
2.2.6. ONDAS LOVE:.....	17
2.2.7. PROPIEDADES DINÁMICAS:.....	18
2.3. MARCO TEÓRICO	19
2.3.1. ANTECEDENTES:.....	19
2.3.2. CONCEPTO DE RAYO	21
2.3.3. CONCEPTO DE ONDA	25
2.3.4. TEORÍA DE LA ELASTICIDAD	27
2.4. MARCO LEGAL	36
CAPÍTULO 3: DISEÑO METODOLÓGICO	38
3.5. TIPO DE INVESTIGACIÓN	38
3.6. POBLACIÓN	38
3.7. MUESTRA	38
3.8. INSTRUMENTOS PARA LA RECOLECCIÓN DE INVESTIGACIÓN.....	38
3.9. METODOLOGÍA.....	39
CAPÍTULO 4: ADMINISTRACIÓN DEL PROYECTO.....	41
4.1. RECURSOS.....	41
4.1.1. RECURSOS HUMANOS:	41
4.1.2. RECURSOS INSTITUCIONALES:	41
4.1.3. RECURSOS FINANCIEROS.....	43

CAPÍTULO 5: RESULTADOS	44
5.1. HALLAZGOS Y CONCLUSIONES	44
5.2. LIMITANTES	177
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES	179
CAPÍTULO 7: RECOMENDACIONES	186
REFERENCIAS	187

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de propagación de onda P.	12
Figura 2. Esquema de propagación de onda S.	14
Figura 3. Esquema de propagación de onda Rayleigh.	17
Figura 4. Esquema de propagación de onda Love.	18
Figura 5. Diagrama de frente de onda.	21
Figura 6. Representación del principio de Huygens.	22
Figura 7. Diagrama esquemático del Principio de Fermat para hallar la trayectoria de mínimo tiempo posible de una partícula que se propaga entre dos medios distintos.	23
Figura 8. Diagrama de la ley de refracción.	24
Figura 9. Esquema de la Ley de Snell mostrando la interface entre dos medios diferentes.	25
Figura 10. Diagrama de la ley de Hooke en sólidos.	29
Figura 11. Seguimiento de las oscilaciones de tres puntos en una cuerda, conforme la onda senoidal se propaga por ella. La cuerda se muestra en intervalos de tiempo de 1/8 de periodo para un total de un periodo T.	32
Figura 12. Valores típicos de velocidad de onda P para distintos materiales.	35
Figura 13. Valores típicos de velocidad de onda S para distintos materiales.	35
Figura 14. Esquema general del ensayo de refracción sísmica.	47
Figura 15. Sección del mapa de geología de la plancha 76 Ocaña, 1980 – INGEOMINAS. Esc. 1:100000.	53
Figura 16. Leyenda geológica generalizada.	54
Figura 17. Presencia de nódulos arcillosos en los estratos conglomeraticos.	56
Figura 18. Nódulo arcilloso en estrato conglomeratico.	56
Figura 19. Afloramiento de la formación algodonal en un talud del barrio Tacaloa.	57
Figura 20. Disposición estructural generalizada de los niveles de conglomerado C y el nivel arcilloso Ach.	58
Figura 21. Distribución estructural y litológica de los estratos en el talud del barrio Libardo Alonso.	59
Figura 22. Columna estratigráfica generalizada sector Tacaloa.	62
Figura 23. Columna estratigráfica generalizada sector Belén - Circunvalación.	63
Figura 24. Columna estratigráfica generalizada sector Libardo Alonso.	63
Figura 25. Sector de Anexos.	65
Figura 26. Sector de la Granja.	66
Figura 27. Sector vía a la Universidad.	66
Figura 28. Sector del barrio Acolsure.	67
Figura 29. Sector de la Circunvalar a la altura del barrio Belén.	67
Figura 30. Sector de Libardo Alonso.	68
Figura 31. Sector de Tacaloa.	68
Figura 32. Sector de Bella Vista.	69
Figura 33. Sector de Buenos Aires.	69
Figura 34. Sector de El Dorado.	70
Figura 35. Sector de Los Lagos.	70
Figura 36. Imagen satelital con la ubicación de los sitios de estudio.	71
Figura 37. Disposición de los geófonos en campo.	72
Figura 38. Perfil de velocidad de onda P con rms error de 0,888884 msec.	74
Figura 39. Perfil de velocidad de onda S con rms error de 1,254330%.	74

Figura 40. Perfil de velocidad de onda P con rms error de 1,019054 msec.....	75
Figura 41. Perfil de velocidad de onda S con rms error de 3,558521%	75
Figura 42. Perfil de velocidad de onda P con rms error de 1,206128 msec.....	76
Figura 43. Perfil de velocidad de onda S con rms error de 1,841337%	76
Figura 44. Perfil de velocidad de onda P con rms error de 1,005461 msec.....	77
Figura 45. Perfil de velocidad de onda S con rms error de 1,404665%	77
Figura 46. Perfil de velocidad de onda P con rms error de 2,726408 msec.....	78
Figura 47. Perfil de velocidad de onda S con rms error de 2,965421%	78
Figura 48. Perfil de velocidad de onda P con rms error de 1,117080 msec.....	79
Figura 49. Perfil de velocidad de onda S con rms error de 1,449896%	79
Figura 50. Perfil de velocidad de onda P con rms error de 1,797049 msec.....	80
Figura 51. Perfil de velocidad de onda S con rms error de 0,965012%	80
Figura 52. Perfil de velocidad de onda P con rms error de 1,133030 msec.....	81
Figura 53. Perfil de velocidad de onda S con rms error de 1,039062%	81
Figura 54. Perfil de velocidad de onda P con rms error de 2,195650 msec.....	82
Figura 55. Perfil de velocidad de onda S con rms error de 2,006552%	82
Figura 56. Perfil de velocidad de onda P con rms error de 2,087536 msec.....	83
Figura 57. Perfil de velocidad de onda S con rms error de 3,634672%	83
Figura 58. Perfil de velocidad de onda P con rms error de 1,496873 msec.....	84
Figura 59. Perfil de velocidad de onda S con rms error de 0,940672%	84
Figura 60. Grafica de las diferentes ecuaciones de correlación entre la velocidad de onda P y la densidad.	86
Figura 61. Relación densidad con velocidades de onda P y onda S	88
Figura 62. Grafica de la relación de V_P/V_S con respecto a la densidad.....	89
Figura 63. Histograma de los valores de densidad.	90
Figura 64. Distribución normal de los valores de densidad.....	90
Figura 65. Histograma de los valores de velocidad de Onda P.	93
Figura 66. Distribución de los valores de velocidad de onda P.	94
Figura 67. Histograma de los valores de velocidad de Onda S.	95
Figura 68. Distribución de los valores de velocidad de onda S.	95
Figura 69. Histograma de los valores de velocidad de Onda P.	96
Figura 70. Distribución de los valores de velocidad de onda P.	97
Figura 71. Histograma de los valores de velocidad de Onda S.	98
Figura 72. Distribución de los valores de velocidad de onda S.	98
Figura 73. Histograma de los valores de velocidad de Onda P.	99
Figura 74. Distribución de los valores de velocidad de onda P.	100
Figura 75. Histograma de los valores de velocidad de Onda S.	101
Figura 76. Distribución de los valores de velocidad de onda S.	101
Figura 77. Histograma de los valores de velocidad de Onda P.	103
Figura 78. Distribución de los valores de velocidad de onda S.	104
Figura 79. Histograma de los valores de velocidad de Onda S.	105
Figura 80. Distribución de los valores de velocidad de onda S.	105
Figura 81. Histograma de los valores de coeficiente de Poisson.	106
Figura 82. Distribución de los valores de coeficiente de Poisson.....	107
Figura 83. Histograma de los valores de módulo de rigidez.....	108
Figura 84. Distribución de los valores de módulo de rigidez.	108

Figura 85. Histograma de los valores de módulo de Young.....	109
Figura 86. Distribución de los valores de módulo Young.....	110
Figura 87. Histograma de los valores de velocidad de Onda P.....	111
Figura 88. Distribución de los valores de velocidad de onda P.....	111
Figura 89. Histograma de los valores de velocidad de Onda S.....	112
Figura 90. Distribución de los valores de velocidad de onda S.....	113
Figura 91. Histograma de los valores de coeficiente de Poisson.....	114
Figura 92. Distribución de los valores de coeficiente de Poisson.....	114
Figura 93. Histograma de los valores de módulo de rigidez.....	115
Figura 94. Distribución de los valores de módulo de rigidez.....	116
Figura 95. Histograma de los valores de módulo de Young.....	117
Figura 96. Distribución de los valores de módulo de Young.....	117
Figura 97. Curvas de correlación entre el módulo de rigidez y la velocidad de onda S.....	119
Figura 98. Curvas de correlación entre el módulo de Young y la velocidad de onda S.....	119
Figura 99. Curvas de correlación entre el coeficiente de Poisson y la velocidad de onda S.....	120
Figura 100. Curvas de correlación entre V_p/V_s y la velocidad de onda S.....	120
Figura 101. Curvas de correlación entre el módulo de rigidez y la densidad.....	121
Figura 102. Curvas de correlación entre el módulo de Young y la densidad.....	121
Figura 103. Curvas de correlación entre el coeficiente de Poisson y la densidad.....	122
Figura 104. Curvas de correlación entre el V_p/V_s y la densidad.....	122
Figura 105. Curvas de correlación entre el módulo de rigidez y la velocidad de onda S.....	123
Figura 106. Curvas de correlación entre el módulo de Young y la velocidad de onda S.....	123
Figura 107. Curvas de correlación entre el coeficiente de Poisson y la velocidad de onda S.....	124
Figura 108. Curvas de correlación entre el V_p/V_s y la velocidad de onda S.....	124
Figura 109. Curvas de correlación entre el módulo de rigidez y la densidad.....	125
Figura 110. Curvas de correlación entre el módulo de Young y la densidad.....	125
Figura 111. Curvas de correlación entre el coeficiente de Poisson y la densidad.....	126
Figura 112. Curvas de correlación entre V_p/V_s y la densidad.....	126
Figura 113. Curvas de correlación entre módulo de rigidez y la velocidad de onda S.....	129
Figura 114. Curvas de correlación entre el módulo de Young y la velocidad de onda S.....	129
Figura 115. Curvas de correlación entre el coeficiente de Poisson y la velocidad de onda S.....	130
Figura 116. Curvas de correlación entre V_p/V_s y la velocidad de onda S.....	130
Figura 117. Curvas de correlación entre la densidad y la velocidad de onda S.....	131
Figura 118. Curvas de correlación entre el módulo de rigidez y la densidad.....	131
Figura 119. Curvas de correlación entre el módulo de Young y la densidad.....	132
Figura 120. Curvas de correlación entre el coeficiente de Poisson y la densidad.....	132
Figura 121. Curvas de correlación entre V_p/V_s y la densidad.....	133
Figura 122. Curvas de correlación entre la velocidad de onda S y la densidad.....	133
Figura 123. Curvas de correlación entre el módulo de rigidez y la velocidad de onda S.....	134
Figura 124. Curvas de correlación entre el módulo de Young y la velocidad de onda S.....	134
Figura 125. Curvas de correlación entre el coeficiente de Poisson y la velocidad de onda S.....	135
Figura 126. Curvas de correlación entre V_p/V_s y la velocidad de onda S.....	135
Figura 127. Curvas de correlación entre la densidad y la velocidad de onda S.....	136
Figura 128. Curvas de correlación entre el módulo de rigidez y la densidad.....	136
Figura 129. Curvas de correlación entre el módulo de Young y la densidad.....	137
Figura 130. Curvas de correlación entre el coeficiente de Poisson y la densidad.....	137

Figura 131. Curvas de correlación entre V_p/V_s y la densidad.	138
Figura 132. Curvas de correlación entre la velocidad de onda S y la densidad.....	138
Figura 133. Curvas de correlación entre módulo de rigidez y la velocidad de onda S.....	141
Figura 134. Curvas de correlación entre módulo de Young y la velocidad de onda S.....	141
Figura 135. Curvas de correlación entre el coeficiente de Poisson y la velocidad de onda S. ...	142
Figura 136. Curvas de correlación entre V_p/V_s y la velocidad de onda S.	142
Figura 137. Curvas de correlación entre la densidad y la velocidad de onda S.....	143
Figura 138. Curvas de correlación entre el módulo de rigidez y la densidad.	143
Figura 139. Curvas de correlación entre el módulo de Young y la densidad.	144
Figura 140. Curvas de correlación entre el coeficiente de Poisson y la densidad.	144
Figura 141. Curvas de correlación entre V_p/V_s y la densidad.	145
Figura 142. Curvas de correlación entre la velocidad de onda S y la densidad.....	145
Figura 143. Curvas de correlación entre el módulo de rigidez y la velocidad de onda S.	146
Figura 144. Curvas de correlación entre el módulo de Young y la velocidad de onda S.	146
Figura 145. Curvas de correlación entre el coeficiente de Poisson y la velocidad de onda S. ...	147
Figura 146. Curvas de correlación entre V_p/V_s y la velocidad de onda S.	147
Figura 147. Curvas de correlación entre la densidad y la velocidad de onda S.....	148
Figura 148. Curvas de correlación entre el módulo de rigidez y la densidad.	148
Figura 149. Curvas de correlación entre el módulo de Young y la densidad.	149
Figura 150. Curvas de correlación entre el coeficiente de Poisson y la densidad.	149
Figura 151. Curvas de correlación entre V_p/V_s y la densidad.	150
Figura 152. Curvas de correlación entre la velocidad de onda S y la densidad.....	150
Figura 153. Relación V_p/V_s respecto al coeficiente de Poisson.	154
Figura 154. Histograma de valores de velocidad de onda P.	155
Figura 155. Distribución de valores de velocidad de onda P.....	155
Figura 156. Histograma de valores de velocidad de onda S.	156
Figura 157. Distribución de valores de velocidad de onda S.....	157
Figura 158. Histograma de valores de coeficiente de Poisson.....	158
Figura 159. Distribución de valores de coeficiente de Poisson.	158
Figura 160. Histograma de valores de módulo de rigidez.	159
Figura 161. Distribución de valores de módulo de rigidez.....	160
Figura 162. Histograma de valores de módulo de Young.	161
Figura 163. Distribución de valores de módulo de Young.	161
Figura 164. Histograma de valores de velocidad de onda P.	162
Figura 165. Distribución de valores de velocidad de onda P.....	163
Figura 166. Histograma de valores de velocidad de onda S.	164
Figura 167. Distribución de valores de velocidad de onda S.....	164
Figura 168. Histograma de valores de coeficiente de Poisson.....	165
Figura 169. Distribución de valores de coeficiente de Poisson.	166
Figura 170. Histograma de valores de módulo de rigidez.	167
Figura 171. Distribución de valores de módulo de rigidez.....	167
Figura 172. Histograma de valores de módulo de Young.	168
Figura 173. Distribución de valores de módulo de Young.	169
Figura 174. Diagrama de valores máximos, mínimos y medios de velocidad de onda P en cada zona para el material conglomerado.	171

Figura 175. Diagrama de valores máximos, mínimos y medios de velocidad de onda S en cada zona para el material conglomerado.	171
Figura 176. Diagrama de valores máximos, mínimos y medios de coeficiente de Poisson en cada zona para el material conglomerado.	172
Figura 177. Diagrama de valores máximos, mínimos y medios de módulo de rigidez en cada zona para el material conglomerado.	172
Figura 178. Diagrama de valores máximos, mínimos y medios de módulo de Young en cada zona para el material conglomerado.	173
Figura 179. Diagrama de valores máximos, mínimos y medios de velocidad de onda P en cada zona para las arcillotas.	175
Figura 180. Diagrama de valores máximos, mínimos y medios de velocidad de onda S en cada zona para las arcillotas.	175
Figura 181. Diagrama de valores máximos, mínimos y medios de coeficiente de Poisson en cada zona para las arcillotas.	176
Figura 182. Diagrama de valores máximos, mínimos y medios de módulo de rigidez en cada zona para las arcillotas.	176
Figura 183. Diagrama de valores máximos, mínimos y medios de módulo de Young en cada zona para las arcillotas.	177
Figura 185. Localización de la línea en el sector de Acolsure.	192
Figura 186. Domocronas observadas y calculas en el sector de Acolsure.	193
Figura 187. Curva de dispersión de velocidad de Onda S vs Frecuencia.	193
Figura 188. Localización de la línea en el sector de Anexos UFPSO.	194
Figura 189. Domocronas observadas y calculadas en el sector de Anexos UFPSO.	195
Figura 190. Curva de dispersión de velocidad de onda S vs Frecuencia.	195
Figura 191. Localización de la línea en el sector de Bella Vista.	196
Figura 192. Domocronas observadas y calculadas en el sector de Bella Vista.	197
Figura 193. Curva de dispersión de velocidad de onda S vs Frecuencia.	197
Figura 194. Localización de la línea en el sector de Buenos Aires.	198
Figura 195. Domocronas observadas y calculadas para el sector de Buenos Aires.	199
Figura 196. Curva de dispersión de velocidad de onda S vs Frecuencia.	199
Figura 197. Localización de la línea en el sector de la circunvalar a la altura del barrio Belén.	200
Figura 198. Domocronas observadas y calculadas para el sector de la circunvalar a la altura del barrio Belén.	201
Figura 199. Curva de dispersión de velocidad de onda S vs Frecuencia.	201
Figura 200. Localización de la línea en el sector de El Dorado.	202
Figura 201. Domocronas observadas y calculadas para el sector de El Dorado.	203
Figura 202. Dispersión de velocidad de onda S vs Frecuencia.	203
Figura 203. Localización de la línea en el sector de la Granja UFPSO.	204
Figura 204. Domocronas observadas y calculadas en el sector de la Granja UFPSO.	205
Figura 205. Curva de dispersión de velocidad vs Frecuencia.	205
Figura 206. Localización de la línea en el sector de la vía a la universidad.	206
Figura 207. Domocronas observadas y calculadas en el sector de la vía a la universidad.	207
Figura 208. Curva de dispersión de velocidad de onda S vs Frecuencia.	207
Figura 209. Localización de la línea en el sector de Los Lagos.	208
Figura 210. Domocronas observadas y calculadas en el sector de Los Lagos.	209
Figura 211. Curva de dispersión de velocidad de onda S vs Frecuencia.	209

Figura 212. Localización de la línea en el sector de Libardo Alonso.	210
Figura 213. Domocronas observadas y calculadas en el sector de Libardo Alonso.	211
Figura 214. Curva dispersión de velocidad de onda S vs Frecuencia.	211
Figura 215. Localización de la línea en el sector de Tacaloa.	212
Figura 216. Domocronas observadas y calculadas en el sector de Tacaloa.	213
Figura 217. Cueva de dispersión de velocidad de onda S vs Frecuencia.	213
Figura 218. Histograma de los valores de velocidad de Onda P.	238
Figura 219. Distribución de los valores de velocidad de onda P.	238
Figura 220. Histograma de los valores de velocidad de Onda S.	239
Figura 221. Distribución de los valores de velocidad de onda S.	240
Figura 222. Histograma de los valores de coeficiente de Poisson.	241
Figura 223. Distribución de los valores de coeficiente de Poisson.	241
Figura 224. Histograma de los valores de módulo de rigidez.	242
Figura 225. Distribución de los valores de módulo de rigidez.	243
Figura 226. Histograma de los valores de módulo de Young.	244
Figura 227. Distribución de los valores de módulo de Young.	244
Figura 228. Histograma de los valores de velocidad de Onda P.	245
Figura 229. Distribución de los valores de velocidad de onda P.	246
Figura 230. Histograma de los valores de velocidad de Onda S.	247
Figura 231. Distribución de los valores de velocidad de onda S.	247
Figura 232. Histograma de los valores de coeficiente de Poisson.	248
Figura 233. Distribución de los valores de coeficiente de Poisson.	249
Figura 234. Histograma de los valores de módulo de rigidez.	250
Figura 235. Distribución de los valores de módulo de rigidez.	250
Figura 236. Histograma de los valores de módulo de Young.	251
Figura 237. Distribución de los valores de módulo de Young.	252
Figura 238. Histograma de los valores de velocidad de onda P.	253
Figura 239. Distribución de los valores de velocidad de onda P.	253
Figura 240. Histograma de los valores de velocidad de onda S.	254
Figura 241. Distribución de los valores de velocidad de onda S.	255
Figura 242. Histograma de los valores de coeficiente de Poisson.	256
Figura 243. Distribución de los valores de coeficiente de Poisson.	256
Figura 244. Histograma de los valores de módulo de rigidez.	257
Figura 245. Distribución de los valores de módulo de rigidez.	258
Figura 246. Histograma de los valores de módulo de Young.	259
Figura 247. Distribución de los valores de módulo de Young.	259
Figura 248. Histograma de los valores de velocidad de onda P.	260
Figura 249. Distribución de los valores de velocidad de onda P.	261
Figura 250. Histograma de los valores de velocidad de onda S.	262
Figura 251. Distribución de los valores de velocidad de onda S.	262
Figura 252. Histograma de los valores de coeficiente de Poisson.	263
Figura 253. Distribución de los valores de coeficiente de Poisson.	264
Figura 254. Histograma de los valores de módulo de rigidez.	265
Figura 255. Distribución de los valores de módulo de rigidez.	265
Figura 256. Histograma de los valores de módulo de Young.	266
Figura 256. Distribución de los valores de módulo de Young.	267

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación de los perfiles de suelos.	15
Tabla 2. Parámetros típicos para análisis multicanal de ondas de superficie (MASW)	49
Tabla 3. Descripción litológica de los estratos encontrados en los taludes estudiados.	60
Tabla 4. Resultados de los ensayos de densidad en los sectores de Libardo Alonso y Circunvalar	87
Tabla 5. Medidas estadísticas de los valores de densidad	91
Tabla 6. Sector Anexos UFPS Ocaña.	92
Tabla 7. Medidas estadísticas de los valores de velocidad de onda P.	94
Tabla 8. Medidas estadísticas de los valores velocidad de onda S.	96
Tabla 9. Distribución de los valores de velocidad de onda P.	97
Tabla 10. Medidas estadísticas de los valores velocidad de onda S.	99
Tabla 11. Medidas estadísticas de los valores velocidad de onda P.	100
Tabla 12. Medidas estadísticas de los valores velocidad de onda S.	102
Tabla 13. Medidas estadísticas de los valores de velocidad de onda P.	104
Tabla 14. Medidas estadísticas de los valores de velocidad de onda S.	106
Tabla 15. Medidas estadísticas de los valores de coeficiente de Poisson.	107
Tabla 16. Medidas estadísticas de los valores de módulo de rigidez.....	109
Tabla 17. Medidas estadísticas de los valores de módulo de Young.....	110
Tabla 18. Medidas estadísticas de los valores de velocidad de onda P.	112
Tabla 19. Medidas estadísticas de los valores de velocidad de onda S.	113
Tabla 20. Medidas estadísticas de los valores de coeficiente de Poisson.	115
Tabla 21. Medidas estadísticas de los valores de módulo de rigidez.....	116
Tabla 22. Medidas estadísticas de los valores de módulo de Young.....	118
Tabla 23. Medidas estadísticas de los valores de velocidad de onda P.	156
Tabla 24. Medidas estadísticas de los valores de velocidad de onda S.	157
Tabla 25. Medidas estadísticas de los valores de coeficiente de Poisson.	159
Tabla 26. Medidas estadísticas de los valores de módulo de rigidez.....	160
Tabla 27. Medidas estadísticas de los valores de módulo de elasticidad.....	162
Tabla 28. Medidas estadísticas de los valores de velocidad de onda P.	163
Tabla 29. Medidas estadísticas de los valores de velocidad de onda S.	165
Tabla 30. Medidas estadísticas de los valores de módulo de Poisson.	166
Tabla 31. Medidas estadísticas de los valores de módulo de rigidez.....	168
Tabla 32. Medidas estadísticas de los valores de módulo de elasticidad.....	169
Tabla 33. Resumen de variaciones de los parámetros dinámicos para el material conglomerado en la formación algodonol.....	170
Tabla 34. Resumen de variaciones de los parámetros dinámicos para las arcillolitas en la formación algodonol.	173
Tabla 35. Medidas estadísticas de los valores de velocidad de onda P.	239
Tabla 36. Medidas estadísticas de los valores de velocidad de onda S.	240
Tabla 37. Medidas estadísticas de los valores de coeficiente de Poisson.	242
Tabla 38. Medidas estadísticas de los valores de módulo de rigidez.....	243
Tabla 39. Medidas estadísticas de los valores de módulo de Young.....	245
Tabla 40. Medidas estadísticas de los valores de velocidad de onda P.	246
Tabla 41. Medidas estadísticas de los valores de velocidad de onda S.	248

Tabla 42. Medidas estadísticas de los valores de coeficiente de Poisson.	249
Tabla 43. Medidas estadísticas de los valores de módulo de rigidez.....	251
Tabla 44. Medidas estadísticas de los valores de módulo de Young.....	252
Tabla 45. Medidas estadísticas de los valores de velocidad de onda P.	254
Tabla 46. Medidas estadísticas de los valores de velocidad de onda S.	255
Tabla 47. Medidas estadísticas de los valores de coeficiente de Poisson.	257
Tabla 48. Medidas estadísticas de los valores de módulo de rigidez.....	258
Tabla 49. Medidas estadísticas de los valores de módulo de Young.....	260
Tabla 50. Medidas estadísticas de los valores de velocidad de onda P.	261
Tabla 51. Medidas estadísticas de los valores de velocidad de onda S.	263
Tabla 52. Medidas estadísticas de los valores de coeficiente de Poisson.	264
Tabla 53. Medidas estadísticas de los valores de módulo de rigidez.....	266
Tabla 54. Medidas estadísticas de los valores de módulo de elasticidad.....	267

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Descripción del presupuesto.	43
Cuadro 2. Detalle del presupuesto de recursos humanos.....	43
Cuadro 3. Resumen de las ecuaciones de correlación para el material conglomerado.....	127
Cuadro 4. Resumen de las ecuaciones de correlación para las arcillolitas.	128
Cuadro 5. Resumen de las ecuaciones de correlación para el material conglomerado.....	139
Cuadro 6. Resumen de las ecuaciones de correlación para las arcillolitas.	140
Cuadro 7. Resumen de las ecuaciones de correlación para el material conglomerado.....	151
Cuadro 8. Resumen de las ecuaciones de correlación para las arcillolitas.	152

INTRODUCCIÓN

El suelo es por excelencia una de las principales variables a considerar en la concepción, ejecución y puesta en marcha de algún proyecto de infraestructura, por ello no es de extrañar que, se destine gran parte de los recursos y del tiempo, para establecer las condiciones de este. El suelo constituye una de las variables que como ingenieros no podemos controlar, y con esto nos referimos al hecho de que no podemos decidir el tipo de suelo en el cual cimentaremos nuestros proyectos, sin embargo está claro que podemos modificar las condiciones de este, para que se ajuste a las necesidades del proyecto, y al respecto se han desarrollado varias teorías, métodos y procedimiento. El punto al que vamos es que las condiciones locales del suelo intervienen en forma directa con la infraestructura, por ende es de supremo interés el conocimiento de estas condiciones, que permitan la toma de decisiones respecto a la planeación y curso de nuestros proyectos.

A fin de establecer las condiciones del suelo, se realiza la estimación de diferentes parámetros que describen el comportamiento de este, mediante ensayos de laboratorio o in situ, generalmente estos ensayos se encuentran enmarcados en la teorías de mecánica de suelos, y no consideran el comportamiento del suelo cuando es sometido a cargas cíclicas como las que se genera durante los sismos, y es entonces cuando es necesario recurrir a métodos alternativos de exploración, como lo son los métodos geofísicos. Estos métodos parten de la observación de fenómenos físicos como, sismos y velocidades de ondas (Imai, 1997), para determinar las condiciones del comportamiento del suelo, estas condiciones están influenciadas entre otros aspectos por las propiedades dinámicas de este.

Las propiedades dinámicas ayudan a comprender el comportamiento elástico del suelo, y se pueden determinar a través de métodos directos o indirectos. Los métodos sísmicos son un tipo de exploración indirecta, que básicamente utilizan los mismos tipos de mediciones que se realizan en terremotos, sin embargo las fuentes de energía son controladas y móviles (García, 2006). La refracción sísmica y el MASW son dos métodos de este tipo que miden las velocidades de las ondas P y ondas S respectivamente, en su paso por las diferentes capas del subsuelo (Villamizar, 2011). Estas velocidades, permiten establecer las propiedades dinámicas del suelo a través de correlaciones matemáticas, basadas en el comportamiento elástico.

Con el desarrollo del siguiente trabajo se pretendió establecer el comportamiento de los parámetros dinámicos de la Formación Algodonal, incluyendo las velocidades de ondas P y ondas S, es importante resaltar que la formación algodonal es una de las principales formaciones geológicas del municipio de Ocaña, y sobre esta se extiende gran parte del casco urbano de la ciudad, además, aquí se encuentran las zonas con mayor potencial de expansión. Para tal propósito se realizaron una serie de ensayos con los métodos de Refracción sísmica y MASW, con lo cual se obtuvieron el valor de las velocidades de onda ya mencionadas, y posteriormente se emplearon para el cálculo de las principales propiedades dinámicas, y finalmente se realiza un análisis de las variaciones y comportamiento de estas variables, intentando establecer un rango o conjunto de datos, que generalizaran el valor de estas variables a toda la formación, obteniendo como producto final, unas formulas y tablas que indiquen los valores típicos de estos parámetros.

CAPITULO 1: Determinación de los parámetros dinámicos en los materiales que componen la formación algodonal en Ocaña Norte de Santander mediante métodos geofísicos.

1.1. Formulación del problema

¿Cuáles son los valores característicos de las propiedades dinámicas de los materiales que componen la formación algodonal en Ocaña Norte de Santander?

1.2. Planteamiento del problema

El país yace sobre dos zonas de subducción importantes, las placas nazca y caribe, situadas paralelamente a las costas colombianas. Y Algunas de las zonas con mayor actividad sísmica en el país son: Santander, Nariño, Norte de Santander, Risaralda, Caldas, Quindío y el Norte del Choco. (Taboda, Dimatè, & Fuenzalida, 1998). Además en la Norma sismo resistente colombiana, Ocaña se cataloga en un nivel de amenaza intermedio, lo anterior denota la necesidad de entender el comportamiento del suelo cuando se somete a las cargas generadas por los sismos, pues bajo estas condiciones el suelo posee una respuesta que, dada la anisotropía del mismo, no puede ser analizado desde un punto de vista estático, ya que este no es lineal, y el comportamiento dinámico de los suelos se establece con base a los parámetros del mismo.

Dada la situación sismológica del país y específicamente el potencial de riesgo del municipio de Ocaña que sumado a que “Históricamente Ocaña ha sido receptor de población, recibiendo 10.196 personas pertenecientes a 2.228 hogares, lo que lo convierte

en el segundo mayor receptor del departamento, después de la capital. Sumado a esto, la cifra de recepción registrada por Ocaña equivale al 0,30% del total nacional (Tovar Ordóñez, 2011). Lo cual representa una reducción considerable de los espacios para expandirse, lo que ha llevado a la aparición de asentamientos subnormales en zonas de ladera para la poblaciones de bajos recursos, y aquellos con la suficiente solvencia económica optan por asentarse dentro del perímetro urbano, pero sin un área suficiente para albergarlos se incurre en una densificación de la ciudad, con la construcción de edificaciones más altas que puedan alojar un mayor número de habitantes. Los terrenos sobre los que se desarrollan estas construcciones requieren de estudios técnicos, que brinden información que permita realizar el análisis del comportamiento del suelo, particularmente los parámetros dinámicos, los cuales se establecen en la ciudad a través de correlaciones basadas en los datos que se obtienen en los ensayos de SPT, que corresponden a ecuaciones empíricas planteadas por autores como: Ohta y Goto (1978), Imai y Yoshimura (1970), Ohba y Toriumi (1970), en condiciones probablemente diferentes a las de la ciudad de Ocaña; Y aunque puedan dar una idea del valor de los parámetros dinámicos del suelo, existe una alta probabilidad de imprecisión en ellos. Lo anterior debido a que en la ciudad no se cuenta hasta el momento con procedimientos ni equipo especializado que permita su obtención directa.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Definir los parámetros dinámicos característicos en los materiales que componen la formación algodonala en Ocaña Norte de Santander mediante métodos geofísicos, para un posterior estudio de la interacción suelo estructura.

1.3.2. Objetivos específicos

- Establecer los fundamentos teóricos de la aplicabilidad de los métodos geofísicos para la caracterización de los parámetros dinámicos de los suelos.
- Determinar los perfiles de velocidad de ondas P y ondas S en los materiales que componen la formación algodonala.
- Establecer los parámetros dinámicos característicos de la formación algodonala a partir de los valores de velocidades de las ondas P y ondas S obtenidas en campo.

1.4. Justificación

Dado el historial de eventos sísmicos que han ocurrido en todo el mundo y que algunos de ellos representan las más grandes tragedias sufridas por la humanidad, se han hecho grandes esfuerzos por comprender el poder destructivo de estas fuerzas, y en forma conjunta se ha trabajado en la forma de mitigar los daños que estas puedan generar. Colombia debido a su ubicación posee un largo historial de eventos sísmicos devastadores, que causaron gran cantidad de daños y víctimas (Ramírez, 1975), por lo cual se hace realmente

importante el uso de técnicas y equipo especializado en la medición de los diferentes parámetros dinámicos del suelo, estos valores posteriormente se pueden usar en el análisis dinámicos de estructuras, y son útiles para los diferentes métodos de interacción suelo estructura.

Ocaña, al igual que muchas ciudades en el país aún no cuenta con un estudio de microzonificación sísmica que permita establecer el comportamiento de los suelos durante un sismo, y así realizar recomendaciones precisas para el diseño y construcción de estructuras sismo resistentes. Además teniendo en cuenta que la mayor parte del perímetro urbano está construido sobre materiales de una formación geológica de origen sedimentario llamada formación algodonal, es preciso determinar los parámetros dinámicos de estos materiales que la componen. En la medida que se logre determinar dichos parámetros se podrá realizar diseños estructurales que tomen en cuenta las características dinámicas de los suelos a través de diferentes métodos de interacción suelo estructura.

Por otro lado, el desarrollo de esta investigación es un primer aporte al estudio de microzonificación, además a futuro podrán realizarse en la ciudad proyectos que tengan en cuenta el verdadero comportamiento de los suelos durante un evento sísmico y así reducir los riesgos que estos generan. También es un punto de partida para investigaciones posteriores que involucren la sísmica y el comportamiento de las diferentes ondas a través del suelo, afianzando el conocimiento y acumulando experiencia en la región sobre el manejo y adquisición de datos sísmicos.

1.5. Delimitaciones

1.5.1. Geográficas: El proyecto es aplicable a los materiales que conforma la formación algodonal en el municipio de Ocaña, teniendo como referencia aquellos que se encuentran en la zona sur, centro-occidente y sur-oriente de la ciudad de Ocaña.

1.5.2. Conceptuales: Cuando se determinan las propiedades dinámicas de los suelos a través de métodos geofísicos, es necesario conocer principios referentes al método sísmico como: Frente de onda, concepto de rayo, el principio de Huygens, La Ley de Snell, El principio de Fermat y el principio de reciprocidad. Además los parámetros dinámicos del suelo que se van a calcular como: Modulo de Poisson, módulo de rigidez, módulo de Young, además otros parámetros como la capacidad portante ultima, las capacidad portante admisible, la densidad del terreno.

1.5.3. Operativas: Para la adquisición de datos en campo mediante el ensayo de refracción sísmica y MASW con el fin de obtener los parámetros dinámicos de la formación algodonal se hará uso de un sismógrafo Geode de 24 canales, una estación topográfica, para el procesamiento de dichos datos se empleara el software Seisimaager/2D y el Seisimaager/SW 2D, adicionalmente para la realización en campo de las adquisiciones de datos en los ensayos de refracción sísmica y MASW, es necesario un equipo mínimo de cinco personas, y el transporte hasta el lugar de realización del ensayo. Además se requiere la asesoría de profesionales expertos en el área.

1.5.4. Temporales: Este proyecto se desarrollara durante un periodo correspondiente a un semestre académico.

Capítulo 2: Marco referencial

2.1. Marco histórico:

Incluso antes del comienzo de la mecánica de suelos en de 1920, había un interés extendido entre los constructores por determinar las características de los suelos y así poder comprender y predecir el comportamiento de estas al construir sobre ellos. El origen de la dinámica de suelos se remonta a Japón con la publicación del trabajo de Mononobe y Matsuo en 1929 sobre la presión lateral sísmica. Saita y Suzuki en 1934 señalaron la importante relación entre el daño estructural y las condiciones locales del sitio. (Bran, Gonzàles, & Ortiz, 2009). Eventos de este tipo establecieron las bases teóricas de los que hoy conocemos como “Dinámica de Suelos” cuyo papel para los ingenieros civiles se fundamenta en la caracterización del suelo a fin de conocer los parámetros que determinan la respuesta sísmica del suelo.

En los estados unidos hacia los años de 1950 se intensifica el estudio del Fenómeno de propagación de ondas en el terreno, asociadas con las explosiones nucleares. Con los sismos ocurridos en Anchorage, Alaska y Niigata, Japón, se motivó el estudio acerca de la medición de las propiedades dinámicas. Desde entonces y a lo largo de más de cuatro décadas, la dinámica de suelos ha evolucionado ante la creciente necesidad de describir, explicar y predecir el comportamiento dinámico de los suelos expuestos a esfuerzos que varían con el tiempo, y de las estructuras cimentadas sobre ellos (Bran, Gonzàles, & Ortiz, 2009).

Desde la época de 1970, y debido a los avances realizados en la electrónica, se comenzaron a desarrollar las pruebas geofísicas, principalmente orientadas al estudio sísmico, para estudiar suelos. Los primeros métodos geofísicos usados fueron la refracción sísmica, crosshole y downhole. Ya en la década de 1980 se incorporó el uso de análisis de ondas de superficie. De forma progresiva en varios lugares del mundo se comenzó una preocupación general por comprender el comportamiento de las masas de suelos durante la ocurrencia de un evento sísmico, estos avances resultaron en una extensa bibliografía de trabajos realizados en este campo, como los libros y publicaciones del Dr. Leonardo Zeevaert sobre las recomendaciones del uso de las propiedades dinámicas del suelo en el diseños sísmico (Lazcano, 2007).

En los que se refiere a la actividad sísmica, el territorio Colombiano comprende un dominio continental deformado, situado en el límite de tres placas tectónicas mayores: la placa suramericana, la placa nazca y la placa caribe. Los movimientos relativos de estas placas durante la era cenozoica dieron origen al sistema orogénico de los Andes del Norte, compuesto por distintas cadenas montañosas. La información sobre la sismicidad colombiana ha sido recopilada en diversos catálogos que cubren diferentes periodos. El más reciente de ellos, es el catálogo de sismos de Colombia, 1566-1995, que recopila la información del catálogo de terremotos para América del sur (Taboda, Dimatè, & Fuenzalida, 1998).

Entre los sismos más destructores están los de 1805, 1827 y 1875. El sismo de 1805, con una magnitud de 7,0 ocasiono más de un centenar de muertos y viviendas destruidas en los municipios de Honda y Mariquita en el valle medio del río Magdalena. El sismo de

1827 localizado en el flanco oriental sur de la Cordillera Oriental, causo daños en los departamentos del Huila, Cauca y Cundinamarca, originando el represamiento de varios ríos, la formación de grandes grietas en la tierra (...) El sismo de 1875, con epicentro en la zona donde la cordillera Oriental colombiana se separa de los Andes de Mérida, destruyo totalmente la ciudad de Cúcuta y la Villa del Rosario. Este evento estuvo acompañado de varios sismos premonitorios y numerosas replicas (Taboda, Dimatè, & Fuenzalida, 1998).

Dentro de los registros históricos a nivel local, se han desarrollado proyectos que involucran una descripción ambiental, describiendo la geología urbana de la ciudad de Ocaña. En los que se puede diferenciar, las terrazas aluviales, constituida por sedimentos cuaternarios inconsolidados, que afloran en una franja paralela a los ríos tejo, chiquito y drenajes menores. La Formación algodonal que se compone por rocas sedimentarias poco consolidadas y altamente meteorizadas y que afloran en la mayor parte de la superficie del área urbana. Y los depósitos cuaternarios recientes, que corresponden a materiales de origen aluvial y diluvial, acumulados por los flujos torrenciales generados en temporadas de invierno. Así mismo, las investigaciones y proyectos desarrollados mencionan la geología estructural y neotectónica, identificando las estructuras geológicas más importantes en la región de Ocaña y que forman parte del sistema de falla de Bucaramanga, el cual tiene importancia regional en el contexto tectónico del nororiente colombiano (CORPONOR, 2011).

Dada la situación de riesgo en Ocaña debido a su geología estructural de la región el plan municipal de gestión del riesgo de desastres, contempla los riesgos por sismos. Ya que la falla Bucaramanga-Santa Marta atraviesa al municipio de sur a norte por el costado oeste

y afecta de manera directa todo el municipio, ya que esta falla es de tipo regional y se encuentra activa, el municipio de Ocaña presenta un grado de amenaza intermedio donde existe la probabilidad de alcanzar valores de aceleración pico efectiva mayores de 0,10 g y menores o iguales a 0,20 g. como antecedente se determina que entre 1664 y 1960 el área del departamento ha sido afectada por numerosos sismos destructores, seis de ellos con intensidades mayores o iguales a VII. Y localmente este nivel de amenaza se incrementa para la mayoría de los sectores de la ciudad, debido a los efectos de la amplificación de las ondas sísmicas a causa de las características de la topografía del terreno (CMGRD, 2012).

Podemos evidenciar que históricamente Colombia dada su conformación tectónica, ha presenciado eventos sísmicos que han causado la muerte de cientos de colombianos, y la destrucción de viviendas y edificaciones, razón por la cual se ha apuntado al estudio y monitoreo de los fenómenos asociados a la actividad sísmica. Además de desarrollo de estudios de microzonificación sísmica, y una normativa que regula la construcción sismo-resistente en el territorio colombiano.

2.2. Marco conceptual:

2.2.1. Onda: Una onda se podría definir como una perturbación que se propaga en un espacio y un tiempo, en el cual existe una transferencia de energía con el medio por el cual se propaga. Se dice que una onda es mecánica si la perturbación en si deforma el medio material. Por otro lado una onda es elásticas si la perturbación permanece en el rango elástico. Para el caso de geomateriales naturales, las ondas elásticas se denominan sísmicas (Czelada, 2009).

En un sismo se transmiten ondas que viajan desde el interior de la tierra, siguiendo caminos curvos de acuerdo a la variada densidad y composición de las capas de la corteza. Podría definirse a las ondas sísmicas como una cantidad pequeña de energía elástica de deformación que viaja a través del subsuelo desde la fuente sísmica a velocidades que depende de las densidades del medio por el cual viajan, pero también de su módulo de elasticidad. Considerando al subsuelo como un medio elástico es decir un material que está sujeto a sufrir deformaciones reversibles, por la acción de fuerzas exteriores, como son la magnitud y orientación del esfuerzo y el tiempo en el cual es sometido el material (Lazcano, 2007).

2.2.2. Ondas primarias: También llamada onda dilatacional, longitudinal, irrotacional, compresional u Ondas P, este último nombre se debe a un hecho particular, pues durante un evento sísmico estas ondas son las primeras en registrarse en el punto de observación y tienen una amplitud relativamente pequeña y periodo corto. Generan un movimiento de partículas en la dirección de propagación, comprimiendo y dilatando el medio por el cual se propagan, como se indica en la figura 1.

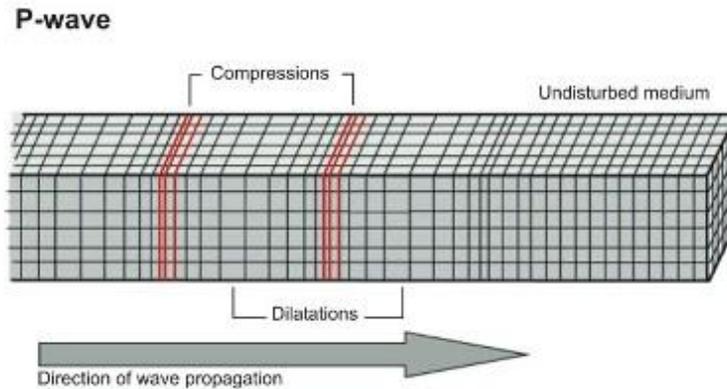


Figura 1. Esquema de propagación de onda P.

Fuente: The Worlds of David Darling. Visible body: Encyclopedia of science. U.S. Geological Survey.

Estas ondas generalmente viajan a una velocidad entre 70 y 140% mayor que las ondas S, para valores de la relación de Poisson (μ) de entre 0,25 y 0,4 rango frecuente en suelos y rocas (Lazcano, 2007). Estas ondas pueden viajar a través de cualquier tipo de material líquido o sólido. En un medio homogéneo e isotrópico la velocidad de propagación de las ondas p es:

$$\sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}}$$

Donde K es el módulo de compresibilidad, μ es el módulo de corte o rigidez y ρ la densidad del material a través del cual se propaga la onda mecánica. De estos tres parámetros, la densidad es la que presenta menor variación por lo que la velocidad esta principalmente determinada por K y μ (Saavedra, 2013). La velocidad de propagación en los materiales geológicos varía de acuerdo con:

- Grado de acidez de la roca
- Grado de saturación de cualquier fluido
- Consolidación, consistencia y compactación
- Cantidad de agua retenida en los poros
- Fracturamiento
- Densidad
- Meteorización
- Profundidad
- Alteración

2.2.3. Ondas secundarias: Las ondas S o secundarias, también llamadas onda cortante, transversal, rotacional o de cizallamiento, son ondas mecánicas en las cuales el desplazamiento es transversal a la dirección de propagación como se muestra en la figura 2. Su velocidad es menor que la de las ondas primarias. Razón por lo que estas aparecen en el terreno algo después que las primeras. Estas ondas son las que generan las oscilaciones durante el movimiento sísmico y solo se trasladan a través de elementos sólidos, debido a que los líquidos no pueden soportar esfuerzos de corte. Su velocidad es alrededor de 59% de la de una onda P para cualquier material sólido (Avilés & Barzallo, 2016).

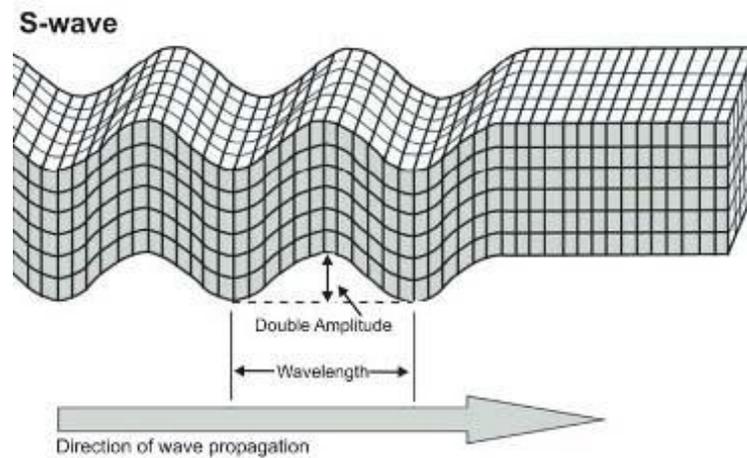


Figura 2. Esquema de propagación de onda S.

Fuente: The Worlds of David Darling. Visible body: Encyclopedia of science. U.S. Geological Survey.

La velocidad de propagación de la onda S en medios isotrópicos y homogéneos depende del módulo de corte μ y de la densidad ρ del material (Saavedra, 2013).

$$v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

Dependiendo del rango de velocidad de las ondas S la Reglamentación colombiana de construcción sísmo resistente establece un tipo de perfil de suelo, como se muestra a continuación en la tabla 1.

Tabla 1: Clasificación de los perfiles de suelos.

Tipo de perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente	$\bar{V}_s \geq 1500$ m/s
B	Perfil de roca rigidez media	1500 m/s $> \bar{V}_s \geq 760$ m/s
C	Perfiles de suelo muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$760 > \bar{V}_s \geq 360$ m/s
	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$\bar{N} \geq 50$, o $\bar{S}_u \geq 100$ kPa (≈ 1 kgf/cm ²)
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	360 m/s $> \bar{V}_s \geq 180$ m/s
	Perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	$50 > \bar{N} \geq 15$, o 100 kPa (≈ 1 kgf/cm ²) $>$ $\bar{S}_u \geq 50$ kPa ($\approx 0,5$ kgf/cm ²)
E	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda cortante, o	180 m/s $> \bar{V}_s$
F	Perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas	IP > 20 W ≥ 40 % 50 kPa ($\approx 0,5$ kgf/cm ²) $>$ \bar{S}_u
	Los perfiles de suelo tipo F requieren de una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnia de acuerdo con el procedimiento de A.2.10. Se contemplan las siguientes subclases: F ₁ – Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc. F ₂ – Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas (H > 3 m para una turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas). F ₃ – Arcillas de muy alta plasticidad (H > 7,5 m con índice de plasticidad IP > 75) F ₄ – Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda (H > 36 m)	

Nota. Clasificación de los perfiles de suelo con base a la velocidad de ondas S.

Fuente: Reglamento colombiano de construcción sismo resistente título A

2.2.4. Ondas de superficie: Cuando se golpea en la superficie de un depósito de suelos, se generan ondas elásticas tanto de cuerpo (primarias y secundarias) como de superficie. 67% de la energía aplicada se propaga como ondas Rayleigh, 27% como ondas secundarias y 7% como ondas primarias (Woods, 1968). Este hecho era conocido desde hace tiempo, pero dadas las circunstancias de la época y la falta de tecnología suficiente para monitorear las ondas de superficie, los métodos geofísicos estuvieron únicamente enfocados al registro y análisis de ondas primarias y secundarias (Lazcano, 2007).

Las ondas superficiales se propagan cuando las ondas internas o de volumen alcanzan un sólido que posee una superficie libre, como la superficie de la tierra, propagándose a lo largo de dicha discontinuidad. Se propagan más lentamente que las ondas de volumen y alcanzan amplitudes de varios centímetros. Su afcción en profundidad depende de la longitud de la onda. Se caracterizan por ser dispersivas, teniendo un comportamiento individual de cada onda en su propagación en un frente de ondas, en función de su longitud de onda o su frecuencia (Álvarez, 2015). Pueden alcanzar amplitudes muy largas en la superficie, pero decaen exponencialmente con la profundidad. Tienen la particularidad de ser más complejas en cuanto al registro de las ondas, ya que estas pueden reflejarse y refractarse varias veces de modo que pueden cambiar de tipo de onda.

2.2.5. Ondas de Rayleigh: Se empiezan a transmitir alrededor del epicentro o proyección del foco sobre la superficie terrestre. Este tipo de ondas tienen su máxima amplitud en la superficie libre, la cual decrece exponencialmente con la profundidad. Son más lentas que las ondas de cuerpo y su velocidad de propagación es casi un 70% de la velocidad de las ondas S. Se conocen como ondas de Rayleigh en honor al científico que predijo su existencia. La trayectoria que describen las partículas del medio al propagarse la onda es elíptica retrograda y ocurre en el plano de propagación de la onda (Bran, Gonzàles, & Ortiz, 2009).

Tienen un movimiento similar al de las ondas de la superficie del agua, haciendo vibrar las partículas sobre un plano que apunta en dirección de la trayectoria de las ondas, con movimientos elípticos y verticales simultáneamente. La figura 3 describe la trayectoria y deformación que experimenta una partícula bajo la influencia de una onda Rayleigh.

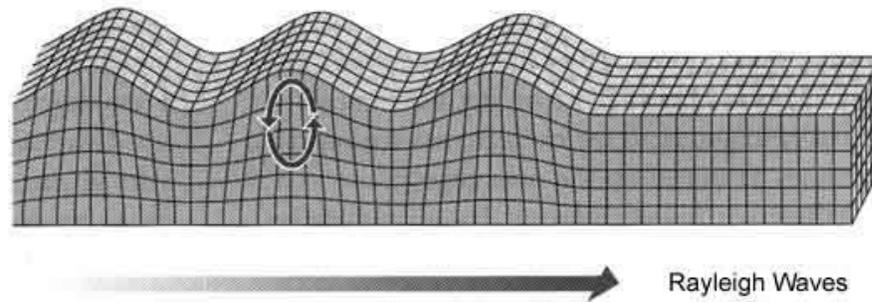


Figura 3. Esquema de propagación de onda Rayleigh

Fuente: USGS science for a changing world. Visible body: Earthquake Glossary – Rayleigh wave.

En un depósito de suelo perfectamente homogéneo, la onda Rayleigh viajara a una velocidad que es independiente de su longitud de onda. Sin embargo, en el suelo hay estratos con rigideces, densidades o relaciones de (Matthews, Hope, & Clayton, 1996) poisson variables, entonces la velocidad de la onda de Rayleigh dependerá de su longitud de onda. Cuando la velocidad de los componentes de onda depende de la frecuencia, se dice que la onda es dispersiva. Este comportamiento que exhiben las ondas Rayleigh en materiales no uniformes es el principio en el que se fundamentan los diferentes métodos de análisis de onda de superficie (Matthews, Hope, & Clayton, 1996). Las ondas Rayleigh son las principales causantes de las sacudidas sentidas durante la ocurrencia de un terremoto, por lo tanto son las principales responsables de los daños causados a las estructuras durante el desarrollo de estos fenómenos.

2.2.6. Ondas Love: Llamadas así en honor al científico que las estudio. El británico A. E. H. Love quien desarrollo un modelo matemático de estas ondas en 1911. La velocidad de las ondas Love es un 90% de la velocidad de las ondas S y es ligeramente

superior a la velocidad de las ondas Rayleigh. Estas se generan solo cuando un medio elástico se encuentra estratificado. Se propagan en forma similar que las ondas S haciendo vibrar las partículas horizontalmente en sentido perpendicular al de propagación, pero sin movimiento vertical. Las ondas Love puede considerarse como ondas S “atrapadas” en la superficie. La trayectoria que describen las partículas del medio al propagarse la onda es elíptica retrograda y ocurre en el plano de la propagación de la onda (Ver figura 4) (Bran, Gonzàles, & Ortiz, 2009).

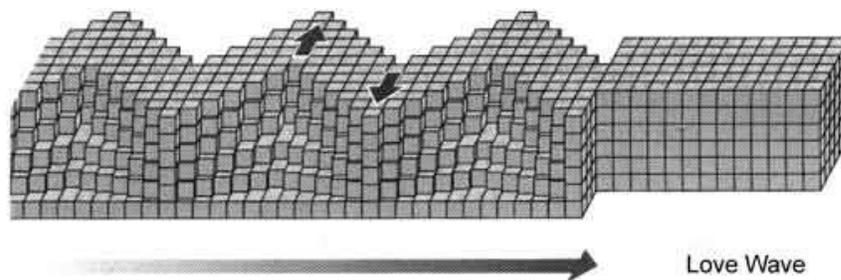


Figura 4. Esquema de propagación de onda Love.

Fuente: USGS science for a changing world. Visible body: Earthquake Glossary – Love wave.

2.2.7. Propiedades Dinámicas: Algunos de los fenómenos que se presentan durante un episodio sísmico se deben en gran medida a las propiedades dinámicas del suelo. Estas propiedades son la rigidez del suelo y el amortiguamiento, que son indicadores para evaluar la respuesta de sitio. A su vez la rigidez se puede calcular a partir del módulo de cizalla G que se determina a través de unas correlaciones con la velocidad de ondas sísmicas. Otras propiedades de interés son la incompresibilidad volumétrica o módulo de volumen, el módulo de Young, el módulo de cizalla o rigidez, el coeficiente de Poisson y la capacidad de carga.

La dinámica de suelos pretende el estudio de los suelos bajo cargas cíclicas que varían en función del tiempo, en estas condiciones el suelo describe un comportamiento no lineal y no uniforme que no puede ser abordado desde la mecánica de suelos clásica, pues involucran propiedades asociadas a las fuerzas de inercia, la frecuencia, las cargas, los esfuerzos y las deformaciones.

2.3. Marco teórico:

2.3.1. Antecedentes:

- En el año 2013 en la Pontificia Universidad Católica De Chile, sede en Santiago, se llevó a cabo el trabajo de investigación titulado: “APLICACIÓN DE MÉTODOS BASADOS EN ONDAS SUPERFICIALES PARA LA CARACTERIZACIÓN SÍSMICA DE SUELOS. APLICACIÓN A LA MICROZONIFICACIÓN ÍSMICA DEL NORTE Y PONIENTE DE SANTIAGO”. El objetivo de esta investigación es estudiar la aplicación del análisis multi-canal de ondas superficiales en sus variantes activa y pasiva, para la caracterización dinámica de suelos. Los resultados de esta investigación permitieron definir recomendaciones sobre la aplicación de este método para distintas clases sísmicas de suelos.

- La Universidad De El Salvador, en el año 2007, desarrolló un trabajo de investigación titulado: “APLICACIÓN DEL MÉTODO DE REFRACCIÓN

SÍSMICA PARA LA DETERMINACIÓN DE VELOCIDADES DE ONDAS P”

Donde se analizó el uso de del método de refracción sísmica en El Salvador y la importancia de este para la obtención y evaluación de parámetros dinámicos del suelo.

- La Universidad de Buenos Aires, en Argentina, en el año 2009, realizó el trabajo de investigación titulado: “MEDICIÓN DEL MÓDULO DE YOUNG Y MÓDULO DE CORTE MEDIANTE TÉCNICAS GEOFÍSICAS”; en donde, se introdujo la teoría de propagación de ondas de manera conceptual, con el objetivo de conocer el comportamiento de las ondas de compresión y las ondas de Rayleigh cuando se propagan a través de terrenos con diferentes estratigrafías. Además, se obtuvieron las propiedades mecánicas del suelo a través de las velocidades de propagación de las ondas P y R, además se pudo calcular el módulo de Young y el módulo de Corte a baja deformación.

- La Pontificia Universidad Javeriana, sede Bogotá, en el año 2011, desarrolló la investigación titulada:” EVALUACIÓN DE MÉTODOS NO CONVENCIONALES DE CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA”. Aclarando que en Colombia, la caracterización de los suelos con base en la velocidad de onda de corte V_s se encuentra incluida dentro de las regulaciones para el diseño sismo resistente descritas en los títulos A y H del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente 2010; y que también que con base en este parámetro es posible establecer y analizar el comportamiento de depósitos de suelo ante cargas cíclicas.

2.3.2. Concepto de rayo

2.3.2.1. Definición: en términos generales, definimos un frente de onda como el lugar geométrico de todos los puntos adyacentes en los cuales la fase de vibración de una magnitud física, asociada con la onda, es la misma. Es decir, en cualquier instante, todos los puntos de un frente de onda están en la misma parte de su ciclo de variación (Young, Freedman, & Ford, 2005).

Desde el punto de vista ondulatorio un rayo es una línea imaginaria a lo largo de la dirección de propagación de la luz (Young, Freedman, & Ford, 2005).

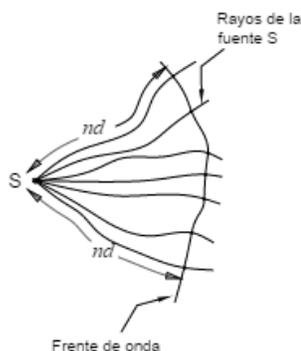


Figura 5. Diagrama de frente de onda.

Fuente: Barbosa, Y. M. (2012). *El frente de onda y su representación con polinomios de Zernike*. Ciencia & Tecnología para la Salud Visual y Ocular, 9(2), 145-166.

2.3.2.2. Principio de HUYGENS: El principio de Huygens es una construcción geométrica para usar el conocimiento de un frente de onda anterior, para determinar la posición de un frente de onda nuevo en algún instante. En la construcción de Huygens todos los puntos en un frente de onda determinado se toman como fuentes puntuales para la producción de ondas esféricas secundarias, llamadas trenes de ondas, que se propagan hacia afuera por un medio con magnitudes de velocidad características de ondas en ese medio.

Después de algún intervalo de tiempo transcurrido la nueva posición del frente de onda es la superficie tangente a los trenes de ondas (Serway & Jewett, 2009).

El Principio de Huygens establece que todo punto alcanzado en un tiempo t_1 por un frente de onda o un particular rayo sísmico, se comporta como una nueva fuente emisora ondas sísmicas secundarias, y que la envolvente de todos los frentes de onda en un tiempo Δt , componen un nuevo frente de ondas en un tiempo t_2 , y así sucesivamente (Estrada, 2012).

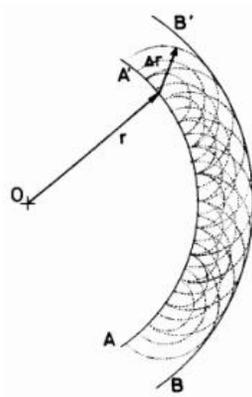


Figura 6. Representación del principio de Huygens.

Fuente: Llinares Galiana, J., Llopis Reyna, A., Vendrell, S., & Javier, F. (1996). *Acústica arquitectónica y urbanística*. Editorial Universitat Politècnica de València.

2.3.2.3. Principio de FERMAT: En un medio homogéneo (con el mismo índice de refracción), la luz se propaga en línea recta. En esta condición es válido afirmar que la distancia más corta entre dos puntos, es la recta que los une. Cuando durante la propagación de la luz, ésta pasa de un medio a otro medio con diferentes índices de refracción, su trayectoria estará formada por dos rectas con una discontinuidad justo en la interface entre los dos medios y en el punto de incidencia. Esto se debe a que la luz requiere recorrer una distancia mínima en su trayectoria al cambiar de medio. Pero si ahora el medio de propagación presenta cambios continuos (heterogeneidades) en el índice de

refracción, entonces la trayectoria que seguirá será una curva. Estas diferentes trayectorias se pueden explicar por el Principio propuesto por Pierre Fermat (1601-1665) que dice que la luz al propagarse recorre un camino óptico cuya longitud es extrema (mínima, máxima o sin cambio) (Argáez-Mendoza & Oliva, 2011).

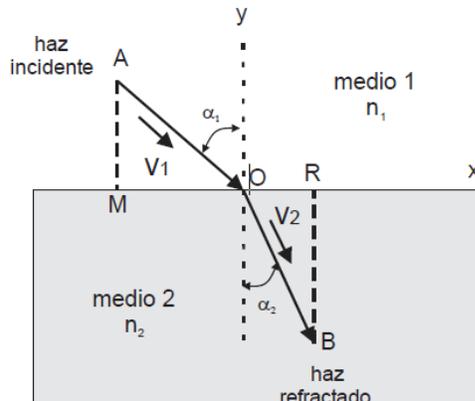


Figura 7. Diagrama esquemático del Principio de Fermat para hallar la trayectoria de mínimo tiempo posible de una partícula que se propaga entre dos medios distintos.

Fuente: Oliva, A; Argáez-Mendoza, S; (2011). El principio de Fermat, la braquistócrona y ¿la curvatura de la luz?. *Ingeniería*, 15() 47-55.

2.3.2.4. Ley de la refracción: La Ley de la Refracción establece que un rayo que parte de A, e incide o choca en un punto B contra la superficie de un material con distinta velocidad de propagación, llegará a un punto C desviándose de la normal con un ángulo mayor o menor que el de incidencia, según sea un material de mayor o menor velocidad de propagación.

Si la distancia horizontal entre A y C es s , y los ángulos de incidencia y de refracción son θ_1 y θ_2 , el tiempo total será la suma de los tiempos parciales en los caminos AB y BC.

Entonces tendremos:

$$t = \frac{(x^2+y^2)^{1/2}}{V_1} + \frac{((s-x)^2+z^2)^{1/2}}{V_2}$$

También puede concluirse que pasado un cierto ángulo de incidencia llamado ángulo crítico, la refracción se produce paralela a la separación de los medios, pero por el medio más veloz. En términos físicos esto significa que a medida que aumenta el ángulo de incidencia, también aumenta el de refracción, y hay un ángulo límite a partir del cual, por más que aumente el de incidencia, no puede aumentar más el de refracción que ya está a 90° de la normal (Estrada, 2012).

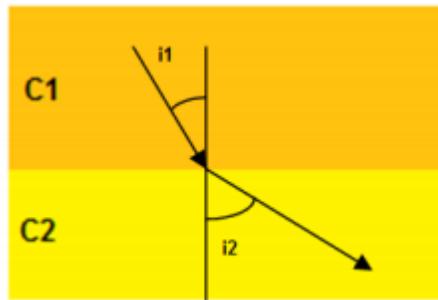


Figura 8. Diagrama de la ley de refracción.

Fuente: Saavedra Morales, O. (2014). Análisis de ondas sísmicas en entorno MATLAB.

2.3.2.5. Ley de SNELL: El ángulo de refracción depende de la rapidez de la luz en los dos medios y del ángulo de incidencia. Hacia 1621, Willebord Snell (1591-1626) determinó experimentalmente una relación analítica entre θ_1 y θ_2 . Se le conoce como la ley de Snell y se escribe

$$n_1 \text{sen} \theta_1 = n_2 \text{sen} \theta_2$$

θ_1 es el ángulo de incidencia y θ_2 es el ángulo de refracción; n_1 y n_2 son los respectivos índices de refracción en los materiales.

A partir de la ley de Snell es claro que, si $n_2 > n_1$, entonces $\theta_2 < \theta_1$. Es decir, si la luz entra a un medio donde n es mas grande (y su rapidez menor), entonces el rayo se dobla hacia la normal. Y si $n_2 < n_1$, entonces $\theta_2 > \theta_1$, así que el rayo se dobla alejándose de la normal (Giancoli, 2006).

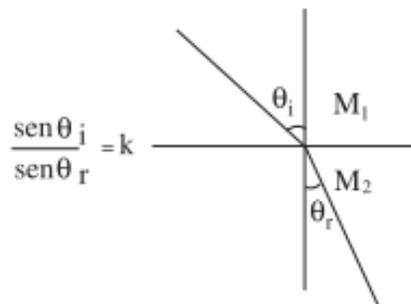


Figura 9. Esquema de la Ley de Snell mostrando la interface entre dos medios diferentes.

Fuente: Bromberg, S., & Rivaud, J. J. (2001). Fermat y el Cálculo Diferencial e Integral.

2.3.3. Concepto de onda

2.3.3.1. Definición: Se define como onda a una perturbación que se propaga en espacio y tiempo, en el cual existe una transferencia de energía con el medio por el cual se propaga (Czelada, 2009).

Una onda es mecánica si la perturbación deforma a un medio material. Entre ellas, una onda es elástica, si la perturbación permanece en el rango elástico (Czelada, 2009).

Para el caso de geo materiales naturales, las ondas elásticas se denominan sísmicas

2.3.3.2. Descripción de las ondas: Los parámetros que se usan para describir una onda son: la frecuencia, $f = 1/T$, y la frecuencia angular, $\omega = 2\pi / T$, donde T es el período; y el número de onda, $\kappa = 2\pi / \lambda$, donde λ es la longitud de la onda (Lopez, Mejia, & Vega, 2008).

2.3.3.3. Ondas elásticas: Pequeñas perturbaciones mecánicas en depósitos de suelos, tales como el impacto de un marro, causan la propagación de ondas elásticas que no alteran prácticamente las condiciones del suelo. Las ondas elásticas se dividen en dos grandes grupos, las de cuerpo, que viajan en el interior del medio elástico, y las de superficie, que se propagan a lo largo de la frontera de un medio semi-infinito, como es la superficie de un depósito de suelos. Las ondas de cuerpo se subdividen a su vez en ondas de compresión o primarias (VP) y de corte o secundarias (VS). Las ondas VP viajan a una velocidad entre 70 y 140% mayor que las VS, para valores de la relación de Poisson (μ) de entre 0.25 y 0.4, rango frecuente en suelos y rocas (Díaz del Castillo, 2007).

2.3.3.4. Contenido espectral de las ondas: En los métodos de refracción y reflexión de la geofísica aplicada, que miden principalmente la llegada de las ondas P, de frentes de ondas que se han refractado o reflejado en las diversas capas de suelo, las frecuencias asociadas con la reflexión se mantienen en una banda entre los 20 y 100 Hz, mientras que en la refracción se encuentran entre 1 y 20 Hz (Cantos, 1973).

Por su parte, la ingeniería y la dinámica de suelos están interesadas en los periodos característicos de vibración de los suelos y los edificios. La respuesta de los edificios depende de la frecuencia predominante del movimiento sísmico – las frecuencias predominantes de las ondas S y P - y de las frecuencias naturales de la columna de suelo y del edificio. La respuesta del edificio se verá afectada si las dos frecuencias coinciden (Sauter, 1989).

2.3.3.5. Interferencia: Se denomina interferencia a la superposición o suma de dos o más ondas. Dependiendo fundamentalmente de las longitudes de onda, amplitudes y de la distancia relativa entre las mismas se distinguen dos tipos de interferencias (Recursostic, 2017):

- **Constructiva:** se produce cuando las ondas chocan o se superponen en fases, obteniendo una onda resultante de mayor amplitud que las ondas iniciales.

- **Destructiva:** es la superposición de ondas en antifase, obteniendo una onda resultante de menor amplitud que las ondas iniciales.

2.3.4. Teoría de la elasticidad

2.3.4.1. Esfuerzo: La fuerza por unidad de área, o la intensidad de las fuerzas distribuidas a través de una sección dada, se llama esfuerzo sobre esa sección y se representa con la letra griega σ (sigma). El esfuerzo en un elemento con área transversal A

sometido a una carga axial P se obtiene, por lo tanto, al dividir la magnitud P de la carga entre el área A (Ferdinand, Johnston, Dewolf, & Mazurek, 2010).

Si la fuerza es perpendicular al área se llama esfuerzo normal de compresión. Cuando la fuerza es tangencial al área el esfuerzo se conoce como esfuerzo cortante o de cizalla (Rosales, 2001).

2.3.4.2. Deformación: Cuando se aplica una fuerza a un cuerpo, esta tiende a cambiar la forma y el tamaño del cuerpo. A esos cambios se les llama deformación y ésta puede ser visible o prácticamente inadvertida si no se emplea el equipo apropiado para hacer mediciones precisas (Hibbeler, 2006).

En sentido general, la deformación de un cuerpo no será uniforme a través de su volumen, por lo que el cambio en la geometría de un segmento de línea dentro del cuerpo puede variar a lo largo de su longitud (Hibbeler, 2006).

2.3.4.3. Ley de Hooke: Para calcular las deformaciones cuando los esfuerzos son conocidos, se debe conocer la relación que existe entre el esfuerzo y la deformación. Cuando las deformaciones son pequeñas esta relación está dada por la ley de Hooke, la cual establece que, dada una deformación, esta es directamente proporcional al esfuerzo producido. Cuando existen varios esfuerzos, cada uno produce deformaciones, independiente de los otros esfuerzos, entonces el total de las deformaciones es la suma de las deformaciones individuales producidas por cada esfuerzo (Saavedra, 2013).

En medios isotrópicos es decir, cuando las propiedades o características del medio no varían, o no dependen de la dirección sobre la cual se aplican las fuerzas, la relación entre esfuerzo y deformación puede definirse de la siguiente forma:

$$\sigma_{ii} = \lambda * \Delta + 2 * \mu * \varepsilon_{ii} \text{ , donde } i = x, y, z;$$

$$\sigma_{ij} = \mu * \varepsilon_{ij} \text{ , donde } ij = x, y, z \text{ para } i \neq j.$$

Donde λ y μ son las constantes elásticas de Lamé; Δ es la dilatación y ε_{ii} y ε_{ij} las deformaciones, μ es una medida a la deformación cortante y es conocido como el **Módulo de rigidez** al cortante o módulo de cizalla. Los líquidos no oponen resistencia a la cizalla, por lo tanto $\mu = 0$ (Saavedra, 2013).

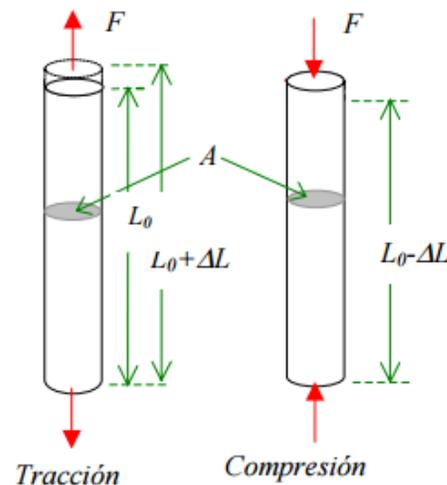


Figura 10. Diagrama de la ley de Hooke en sólidos.

Fuente: Gil, S. (2005). Introducción a la Teoría de la Elasticidad.

2.3.4.4. Constantes elásticas en medios isotrópicos: La isotropía es una medida de las propiedades direccionales de un material. Por ejemplo, con un criterio estadístico, un

cuerpo granular será isotrópico si todos sus granos tienen una orientación al azar y cuando un plano de dimensiones equivalentes lo intercepta, en cualquier dirección, corta al mismo en un número igual o equivalente de granos (Farmer, 1968).

En la litósfera las rocas se aproximan a medios isotrópicos, es decir que no lo son completamente. Especialmente las rocas sedimentarias y metamórficas presentan anisotropías. Por ejemplo, las rocas sedimentarias presentan diferencias en sus propiedades si son medidas en planos paralelos o perpendiculares al plano de estratificación (Briceño & Cuellar, 1991).

Para definir cualquier material elásticamente se requieren dos de las cinco constantes elásticas disponibles: E (módulo de elasticidad), ν (coeficiente de Poisson), K (módulo de compresibilidad), G (módulo de rigidez) y λ (constante de Lamé). En la teoría elástica las más convenientes son G y λ , pero en los problemas de ingeniería donde la medida de la relación directa de una roca a una fuerza, se requiere una medida directa, E y ν son las más comúnmente citadas. A pesar de ella en la mayoría de las rocas cuasi y semi-elásticas, todas las constantes elásticas pueden ser relacionadas con un buen grado de precisión (Farmer, 1968).

2.3.4.5. Constantes elásticas en medios anisotrópicos: La propagación de ondas elásticas difiere significativamente entre medios iso y anisotrópicos:

- Mientras que en medios isotrópicos son suficientes dos variables elásticas, en anisotrópicos se requieren 21 constantes elásticas independientes.

- Hay un fenómeno de partición de la onda (análogo al caso de óptica de doble refracción), para ondas con componentes transversales.
- Las ondas viajan a diferentes velocidades dependiendo de la dirección de propagación y de la polarización (aplica a ondas S u ondas superficiales).
- La polarización de las ondas de compresión y de cortante puede no ser perpendicular o paralela al frente de ondas (Rosales, 2001).

Los suelos, de gran interés en la ingeniería civil, no se aproximan tanto como las rocas a medios isotrópicos. Para esto se supone que los medios están estratificados, y cada estrato es homogéneo e isotrópico, razón por la cual se pueden emplear las constantes que describen el comportamiento elástico isotrópico. El coeficiente de Poisson puede ser un indicativo de anisotropía en depósitos sedimentarios. Así, por ejemplo, Pickering (1970) en Salem (2000), demostró teóricamente que el rango $-\sigma < 1,0 < 0,5$ corresponde a suelos anisotrópicos. Por su parte Salem (2000) encontró que los valores negativos de σ en suelos pueden indicar anisotropía (Rosales, 2001).

2.3.4.6. Ecuación de la onda: Muchas características de las ondas periódicas pueden describirse usando los conceptos de rapidez de onda, amplitud, periodo, frecuencia y longitud de onda; sin embargo, es común que necesitemos una descripción más detallada de las posiciones y los movimientos de las partículas individuales del medio en instantes específicos durante la propagación de una onda. Para esta descripción, necesitamos el concepto de función de onda, una función que describe la posición de cualquier partícula en el medio en cualquier instante (Young & Freedman, 2009).

Cada partícula de una cuerda oscila en movimiento armónico simple con la misma amplitud y frecuencia; pero las oscilaciones de partículas en diferentes puntos de la cuerda no están todas coordinadas. La partícula marcada con el punto B en la figura 11 está en su máximo valor positivo de y en $t = 0$ y vuelve a $y = 0$ en esto mismo sucede con una partícula en el punto A o en el punto C en y exactamente medio periodo después (Young & Freedman, 2009).

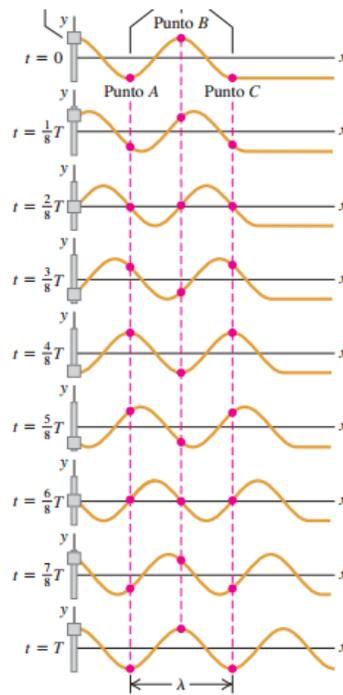


Figura 11. Seguimiento de las oscilaciones de tres puntos en una cuerda, conforme la onda senoidal se propaga por ella. La cuerda se muestra en intervalos de tiempo de $1/8$ de periodo para un total de un periodo T .

Fuente: Young, H., & Freedman, R. (2009). *Física universitaria* (Decimosegunda ed., Vol. I). (V. Flores, Trad.) Ciudad de México: Pearson educación.

Para cualesquiera dos partículas de la cuerda, el movimiento de la partícula de la derecha (en términos de la onda, la partícula “de bajada”) se retrasa con respecto al movimiento de la partícula de la izquierda en una cantidad proporcional a la distancia entre las partículas. Así, los movimientos cíclicos de diversos puntos de la cuerda están

desfasados entre sí en diversas fracciones de un ciclo. Llamamos a éstas diferencias de fase, y decimos que la fase del movimiento es diferente para diferentes puntos. Por ejemplo, si un punto tiene su desplazamiento positivo máximo al mismo tiempo que otro tiene su desplazamiento negativo máximo, los dos están desfasados medio ciclo. (Éste es el caso de los punto A y B, o de los puntos B y C) (Young & Freedman, 2009).

Suponga que el desplazamiento de una partícula en el extremo izquierdo de la cuerda ($x = 0$), donde la onda se origina, está dado por:

$$y(x = 0, t) = A \cos \omega t = A \cos 2\pi f t$$

Es decir, la partícula oscila en movimiento armónico simple con amplitud A , frecuencia f y frecuencia angular ω . La notación $y(x = 0, t)$ nos recuerda que el movimiento de esta partícula es un caso especial de la función de onda $y(x, t)$ que describe toda la onda. En $t = 0$, la partícula en $x = 0$ tiene máximo desplazamiento positivo ($y = A$) y está instantáneamente en reposo (porque el valor de y es un máximo) (Young & Freedman, 2009).

2.3.4.7. Velocidades de las ondas elásticas: En un sólido pueden transmitirse dos tipos de onda. El primer tipo es conocido como onda de compresión, porque consiste en la transmisión de compresiones y rarefracciones como en el caso de la transmisión del sonido; en este caso las partículas del medio se mueven en el mismo sentido en que se propaga la onda. El segundo tipo es conocido como ondas transversales o cizallamiento; las partículas

se mueven ahora en dirección perpendicular a la dirección de propagación de onda (Espíndola & Jimenez, 1994).

Las ondas compresionales y transversales han sido llamadas P y S respectivamente. Son también conocidas como ondas internas porque se propagan en el interior de un sólido elástico (Espíndola & Jimenez, 1994).

La velocidad de las ondas P y S vienen dadas por las siguientes ecuaciones (Sarria, 1996):

$$Cp = \left[\frac{E(1 - \sigma)}{\rho} (1 + \sigma)(1 - 2\sigma) \right]^{1/2}$$
$$CS = \left[\frac{\mu}{\rho} \right]^{1/2}$$

En la figura 12 y 13 se muestran valores típicos de velocidad de onda P y onda S para algunos materiales:

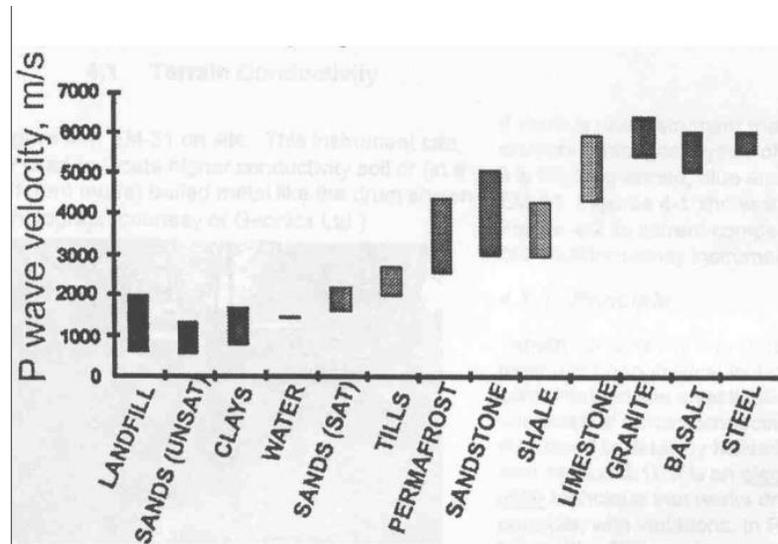


Figura 12. Valores típicos de velocidad de onda P para distintos materiales.

Fuente: Greenhouse, J., PHEME, P., Coulter, D., & Yarie, Q. (1998). Trends in geophysical site characterization. *In Geotechnical site characterization—proceedings of the first international conference*, Atlanta, Georgia, 19-22 April (pp. 23-34).

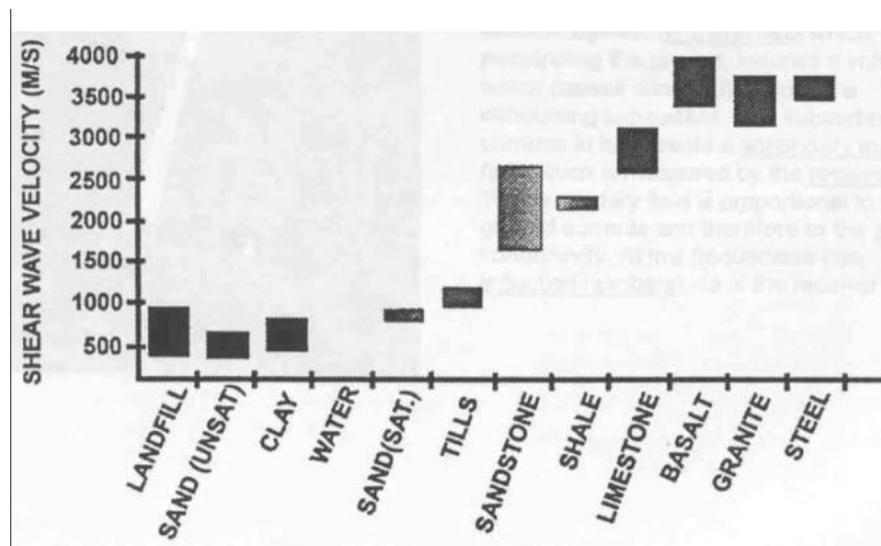


Figura 13. Valores típicos de velocidad de onda S para distintos materiales.

Fuente: Greenhouse, J., PHEME, P., Coulter, D., & Yarie, Q. (1998). Trends in geophysical site characterization. *In Geotechnical site characterization—proceedings of the first international conference*, Atlanta, Georgia, 19-22 April (pp. 23-34).

2.4. Marco legal:

Para garantizar una viabilidad normativa, el desarrollo de este proyecto debe estar acorde a los requisitos legales y normativos. Por ende se menciona lo siguiente:

Ley 1523 de 2012: Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones. A través de esta norma, se da paso a la identificación de los diferentes riesgos que pueden afectar al municipio, incluyendo si es el caso la actividad sísmica.

Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres: Según en lo dispuesto en la Ley 1523 del 2012, el consejo municipal para la gestión del riesgo de desastres CMGRD crea este plan de gestión del riesgo, donde se identifican y mencionan los diferentes escenarios de riesgos y las estrategias de prevención, manejo y mitigación. Incluyendo en caso particular para el proyecto que se plantea “La caracterización general del escenario de riesgo por sismos” En forma particular este plan municipal, reconoce al municipio como una zona de amena sísmica, y establece los factores que contribuyen al riesgo de desastres. Y se prioriza la actividad sísmica como riesgo potencial de desastre.

Ley 400 de 1997 (Modificada Ley 1229 de 2008): Por el cual se adoptan normas sobre construcciones sismo-resistentes. Estableciendo criterios y requisitos mínimos para el diseño, construcción y supervisión técnica de edificaciones nuevas, así como de aquellas indispensables para la recuperación de la comunidad con posterioridad a la ocurrencia de un sismo. Con esta norma, se establece entre otras cosas las zonas de amenazas sísmicas,

además de los conceptos adoptados para el territorio Colombiano en cuanto a sismos y la clasificación de suelos con base a la velocidad de ondas s.

ASTM D5777 - 00(2011) e1 “Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation”, Normativa internacional, para la ejecución del método de Refracción sísmica. Esta contiene las indicaciones, procedimientos y equipos para la realización de los ensayos de refracción sísmica.

Licencia de Software. Ley 603 del 2000 sobre legalización del software.

Norma del Instituto Nacional de Vías I.N.V. E – 161 – 07, que contiene los procedimientos, equipos y cálculos necesarios para la determinación de densidad o masa unitaria del suelo en el terreno mediante el método del cono de arena.

Capítulo 3: Diseño metodológico

3.5. Tipo de investigación:

El tipo de investigación que se plantea es de tipo Descriptiva, pues se parte de la recolección y análisis de variables y posteriormente se describen los datos y características de la población o fenómeno de estudio que son las propiedades dinámicas de los materiales que componen la formación algodonol.

3.6. Población:

La población consiste en todos aquellos materiales pertenecientes a la formación algodonol que compone la geología del municipio del Ocaña norte de Santander.

3.7. Muestra:

Se trabajara con un tipo de muestreo Intencional u opinático, seleccionando los materiales que pertenecen a la formación algodonol localizados en los sectores sur, sur-oriente y centro-occidente de la ciudad de Ocaña, sobre los cuales se tiene información previa, y a juicio de los investigadores son aptos para el desarrollo de los ensayos de campo. Se estableció un número mínimo de zonas de diez, en los cuales se realizaran diez ensayos de refracción y diez de MASW.

3.8. Instrumentos para la recolección de investigación:

Las técnicas de recolección de información utilizadas para el desarrollo de este proyecto, se realiza mediante el uso de fuentes primarias, como lo es el uso de internet,

Norma sismo resistente colombiana. Además de las visitas y ensayos de campo en los lugares seleccionados. Finalmente se recurre al uso de los softwares Seisimaager/2D y Seisimaager/SW2D para el procesamiento de la información.

3.9. Metodología:

El objetivo principal de este proyecto está enfocado a la determinación de los parámetros dinámicos de los materiales que conforman la formación algodonal.

Para lograr tal propósito se plantean cuatro etapas:

Una primera etapa consiste en la recolección y posterior revisión bibliográfica de los trabajos e investigaciones realizadas, a fin de establecer los fundamentos teóricos en torno a los métodos geofísicos que permitan la medición de las ondas de velocidad del terreno y posteriormente definir las correlaciones que permitan el cálculo de las propiedades dinámicas de interés.

En la segunda etapa se seleccionaran los terrenos donde es posible la adquisición de datos sísmicos, con un área suficiente que permita la extensión de las líneas de adquisición y posteriormente se realizaran los ensayos de campo, con los dos métodos planteados, MASW y Refracción sísmica.

En la tercera etapa se realizara el procesamiento de datos, una vez adquiridos y almacenados los datos de campo y posteriormente a sus clasificación se procederá al

cálculo de los perfiles de velocidad de ondas P y ondas S haciendo uso del software Seisimaager/2D y Seisimaager/SW2D respectivamente.

En la cuarta y última etapa se realizara un análisis de los resultados obtenidos a fin de aplicar métodos estadísticos sobre el análisis experimental para establecer las propiedades dinámicas de los materiales de la formación algodonol en el municipio de Ocaña, calculando a su vez el error relativo de las muestras.

Capítulo 4: Administración del proyecto

4.1.1. Recursos

4.1.2. Recursos humanos:

- Ciro Andrey Martínez Ovallos, estudiante de ingeniería civil.
- Jeison Stiven Sepúlveda Sánchez, estudiante de ingeniería civil.
- Msc Romel Gallardo Amaya, director temático del proyecto.
- Esp. Agustín Armando Macgregor, ingeniero asesor.
- Msc Jairo Alberto Torres Peña, Físico.
- Alejandra Sanjuan Quintero, estudiante de ingeniería civil.

4.1.3. Recursos institucionales:

La Universidad Francisco de Paula Santander seccional Ocaña, aportara para la realización de esta investigación los siguientes recursos:

1. Fuente de generación de ondas sísmicas.
 - 1.1. Martillo con su respectivo cable de 300 metros
 - 1.2. Placa de polipropileno
2. Detección de ondas
 - 2.1. Geófonos
 - 2.2. Cables de geófonos de 120 metros cada uno
3. Adquisición y almacenamiento.

- 3.1. Geode Seismograph de 24 canales
- 3.2. Computador portátil
- 3.3. Software de adquisición de datos: Geometrics Seismodule Controller
4. Procesamiento de datos
- 4.1. Software de picado de primeros arribos: Pickwin(Pick First Breaks or

Dispersion Curves)

- 4.2. Software para procesamiento de refracción sísmica: Plotrefa(Refraction Analysis)
- 4.3. Software para procesamiento de MASW: WaveEq(Surface Wave Analysis)
5. Equipo de topografía.
- 5.1. GPS Mobile Mapper.
- 5.2. Estación total SOUTH
- 5.3. Prisma
- 5.4. Porta prisma
- 5.5. Trípode
- 5.6. Cinta métrica
- 5.7. Radios de comunicación

4.1.4. Recursos financieros

Cuadro 1. Descripción del presupuesto.

Descripción	Cantidad	Valor unitario	Valor total	Valor item	Recursos	
					Propio	UFPSO
Trabajo de campo				\$ 20.140.000		
Transporte de equipo	20	\$ 7.000	\$ 140.000		×	
Levantamientos topograficos	10	\$ 1.000.000	\$ 10.000.000			×
Ensayo de refracción sísmica y MASW	10	\$ 1.000.000	\$ 10.000.000			×
Papelería				\$ 24.500		
Formatos para toma de datos	30	\$ 50	\$ 1.500		×	
Implementos de oficina			\$ 20.000		×	
Impresión de anteproyecto	60	\$ 50	\$ 3.000		×	
Recursos humanos				\$ 3.149.280		
Recursos humanos			\$ 3.149.280		×	
Gastos de viaje				\$ 1.000.000		
Asesoramiento en la ciudad de Pamplona	1	\$ 1.000.000	\$ 1.000.000			×
Imprevistos				\$ 1.215.689		
5% del subtotal			\$ 1.058.225		×	
Valor total				\$ 25.529.469		

Fuente: Autores, 2017.

Cuadro 2. Detalle del presupuesto de recursos humanos.

Ítem	Número de horas	Valor hora	Valor ítem
Trabajo de campo	320	6561	\$ 2.099.520
Trabajo de oficina	160	6561	\$ 1.049.760
Total			\$ 3.149.280

Fuente: Autores, 2017.

Capítulo 5: Resultados

5.1. Hallazgos y conclusiones

5.1.1. Definir los parámetros dinámicos característicos en los materiales que componen la formación algodonala en Ocaña Norte de Santander mediante métodos geofísicos, para un posterior estudio de la interacción suelo estructura.

Los parámetros dinámicos corresponden a un conjunto de valores que describen de forma aproximada el comportamiento elástico del suelo, entendiendo que este último debido a su naturaleza isotrópica, no posee el mismo comportamiento de materiales rígidos, continuos y homogéneos, por lo cual, los valores que corresponden a estos parámetros se establecen a partir de un conjunto de condiciones iniciales, incluyendo el estado de esfuerzos al cual se encuentra sometido, y de cambiar estas condiciones, los valores correspondientes cambian de igual manera. Para la investigación desarrollada estos valores se calcularon a partir de fórmulas que correlacionan las velocidades de onda con las diferentes propiedades como: Coeficiente de Poisson, Módulo de Young y Módulo de Rigidez.

Las estimación de los valores de velocidades de onda para su correspondiente correlación con los parámetros dinámicos de los materiales que conforman la formación algodonala, en el sector de estudio de la ciudad de Ocaña, requirió del desarrollo de los objetivos específicos tal y como se describe a continuación:

5.1.1.1. Establecer los fundamentos teóricos de la aplicabilidad de los métodos geofísicos para la caracterización de los parámetros dinámicos de los suelos.

Los métodos geofísicos hacen parte de los ensayos de campo para la realización de estudios geotécnicos, son de tipo indirecto en la medida que no se extraen muestras in situ del terreno, a su vez, estos métodos pueden ser de superficie, sondeos o métodos mixtos. En los de superficie se encuentran los métodos Gravimétricos, Magnéticos y Sísmicos, este último mide las variaciones de la velocidad de ondas de choque a través del terreno (García, 2006), ya sea con el método de Refracción Sísmica o MASW, entre otros.

El desarrollo de esta investigación inicio con una revisión bibliográfica de trabajos y producciones científicas, que lograsen precisar los fundamentos teóricos con respecto a definiciones y conceptos, a fin de unificar teorías y consolidar los saberes respecto a la investigación, en relación al movimiento de ondas a través del terreno y los métodos para medir su velocidad. Con lo anterior se estableció el marco referencial del presente trabajo, y además brindo las herramientas para la comprensión de los métodos geofísicos, sus teorías, y el procedimiento de campo para la medición de las velocidades de onda.

Método de refracción sísmica: El método de la refracción sísmica consiste en la medición del tiempo de viaje de la primera onda detectada (onda de compresión u onda P) en una serie de puntos separados a intervalos regulares a lo largo de una línea de referencia ubicada sobre la superficie de la tierra. Dicha línea se conoce como línea de inspección, y en cada punto de la misma se encuentra un dispositivo receptor de señales llamado geófono. Las ondas detectadas en cada receptor son originadas a partir de una fuente de

energía de tipo impulsiva en una ubicación estratégica conocida con el nombre de punto de disparo, pudiendo utilizar una explosión o el impacto de un objeto sobre el terreno (López, Mejía, & Vega, 2008).

El instante en que se originan las ondas (llamado tiempo cero) es registrado dentro del archivo de pulsos de llegada. Cada expediente consta de un conjunto de registros individuales provenientes de cada geófono (López, Mejía, & Vega, 2008).

Durante el procesamiento de los datos contenidos en un archivo, estos son manipulados para ser presentados en un formato gráfico llamado curva tiempo-distancia o domocrónica cuya forma está relacionada con las condiciones geológicas del lugar en estudio. Este gráfico es el punto de partida para determinar la variación de la velocidad de las ondas con respecto a la profundidad alcanzada durante el desarrollo de un ensayo de refracción. Las velocidades calculadas están relacionadas a la identificación y cuantificación de diferentes tipos de material detectados en profundidad (López, Mejía, & Vega, 2008).

Entre las aplicaciones más importantes en la Ingeniería Civil, está la utilización para la medición de espesores de recubrimiento, profundidad de nivel freático, prospección petrolera y en la realización estudios hidrogeológicos. Este método permite la localización (profundidad del sustrato), posición del acuífero bajo ciertas condiciones, así como la caracterización de suelos (López, Mejía, & Vega, 2008).

Algunas limitaciones en entornos urbanos el Método está restringido por la cantidad y accesibilidad de zonas descubiertas o zonas verdes con suficiente extensión de tal manera que las extensiones de terrenos disponibles en el área de estudio limitan los alcances de la aplicación del método y por ende la profundidad de exploración. Además si existe un estrato o capa que tiene una velocidad sísmica más baja que la capa inmediata superior a esta (caso de inversión de velocidad), la capa con baja velocidad sísmica no puede ser detectada (López, Mejía, & Vega, 2008).

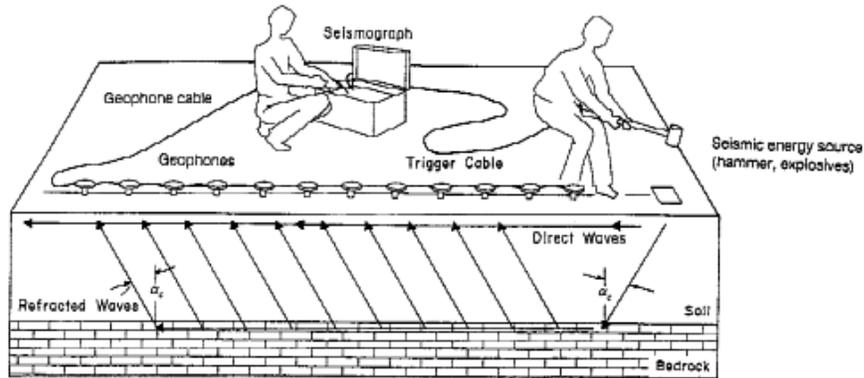


Figura 14. Esquema general del ensayo de refracción sísmica.

Fuente: Standard, A. S. T. M. D5777, 2000e1, "Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2000.

Análisis multicanal de ondas superficiales (MASW): La determinación de las fases de velocidades de ondas superficiales requiere la adquisición multicanal de datos. Y las variables determinantes en estos ensayos son el espesor de cada una de las capas que componen el perfil y su respectiva velocidad de onda de corte asociada (Serna Vásquez, 2015).

En términos generales, la adquisición de datos para MASW no es muy diferente de los procedimientos comunes adoptados en los estudios de refracción. En realidad, es más sencillo porque, por ejemplo, solo se requiere la generación de una fuente de onda activa. Dos aspectos triviales a considerar relacionan la posible saturación del trazo (recorte) y la atenuación del ruido incoherente por medio de un apilamiento vertical (es decir, la suma de trazas de disparos múltiples) (Dal Moro, 2015).

En los estudios de refracción (donde la cantidad que debe ser identificada con precisión es el tiempo de llegada), la saturación de trazas no es un problema ya que la amplitud precisa de las señales (que durante su procesamiento aparecen trucadas) no suele ser relevante. Pero el análisis de las ondas superficiales (que, en cierta medida requiere la evaluación de los espectros de amplitud), esto puede convertirse en un problema. Como consecuencia, el adquirir datos para los análisis de dispersión o atenuación, se debe evitar cuidadosamente la saturación fijando un valor de ampliación apropiado (idealmente las ampliaciones deben ser las mismas para todos los canales) o utilizando un sismógrafo de alta calidad con un rango dinámico elevado (Dal Moro, 2015).

La determinación de las fases de velocidades de onda superficiales requiere la adquisición de un conjunto de datos multicanal y la tabla 2 resume los parámetros fundamentales que se deben considerar cuando se trata de adquisiciones activas.

Tabla 2. Parámetros típicos para análisis multicanal de ondas de superficie (MASW)

Offset Mínimo (distancia entre la fuente y el primer geófono)	5 – 20 m Puede decidir adquirir un par de conjuntos de datos moviendo la fuente (Escoger el mejor conjunto de datos mientras analiza los respectivos espectros de velocidad)
Separación de geófonos	El punto es el siguiente: La longitud de la matriz de geófonos debe ser lo más larga posible. Si el espacio disponible es, por ejemplo, 75 m y usted tiene 24 geófonos, entonces puede fijar la distancia de los geófonos como 3 m (Con un offset mínimo de 5 m) Dos hechos críticos a considerar: 1. La profundidad de penetración máxima que puede considerarse aproximadamente no mayor que la mitad de la matriz de geófonos 2. EL número de geófonos no es relevante
Tipos de geófonos	Componente vertical de las ondas de Rayleigh: Geófonos verticales Componente radial de las ondas Rayleigh: Geófonos horizontales fijados radialmente a la matriz Ondas Love: Geófonos horizontales perpendiculares a la matriz Frecuencia propia 4,5 Hz (o menos)
Tiempo de registro	2 s Sueles ser más que suficientes (es esencial que la tendencia total de la onda superficial sea registrada enteramente incluso en el último canal/traza)
Número de canales	12 – 24 Menos números de canales a veces son suficientes, el punto crucial de cualquier forma es la longitud total de la matriz, posiblemente no menos que 50 m, mucho mejor 70 – 90 m (Para alcanzar la longitud sugerida, basta con modificar la distancia de los geófonos)
dt (intervalo de muestreo)	Para aplicaciones geofísicas próximas a la superficie, 1 m es definitivamente más que suficiente
Notas	No AGC (Control automáticos de ganancia) Sin mantener el filtro, es posible el mismo valor de amplificación/ganancia para todos los canales (esto es imprescindible cuando nos interesan los análisis de atenuación). Tenga cuidado: no saturar los canales cerca de la fuente, y mantener una buena relación señal-ruido para las distancias de Offsets (Donde la amplitud de la señal es necesariamente bajas)

Nota. Fuente: SURFACE WAVE ANALYSIS FOR NEAR SURFACE APPLICATIONS. Giancarlo Dal Moro. Intitute of Rock Structure and Mechanics Academy of Sciences of the Czech Republic, Prague, Czech Republic & Eliosoft, Udine, Italy

Ya específicamente en lo que tiene que ver con los parámetros dinámicos, también llamados constantes elásticas o módulos elásticos, estos son de gran importancia, desde un punto de vista geotécnico, porque la velocidad de las ondas sísmicas depende de estos parámetros además de la densidad, y su conocimiento en ingeniería representa grandes ventajas en cuanto a la disminución de riesgos asociados al comportamiento del suelo cuando se somete a cargas sísmicas y en la medida que sea posible realizar un análisis de la interacción suelo-estructura. Entendiendo la importancia que tiene la determinación de estas propiedades se realizó una búsqueda de ecuaciones de correlación que permitan la obtención de los parámetros dinámicos a partir de velocidades de ondas P y ondas S, estas ecuaciones se muestran a continuación:

Coefficiente de Poisson: Representa la “tasa de deformación compresiva (normal aplicada a la carga) a la carga axial (paralela a la carga) y puede ser calculado como (Jaimes, 2011) :”

$$\sigma = \frac{\left(\frac{Vp}{Vs}\right)^2 - 2}{2\left(\frac{Vp}{Vs}\right)^2 - 2}$$

Siendo:

σ = Coeficiente de Poisson

Vp = Valor de velocidad de onda P

Vs = Valor de velocidad de onda S

Módulo de rigidez: Es la “Tasa de esfuerzo cortante a deformación cortante para un material y detalla el comportamiento del mismo ante un esfuerzo de corte y se expresa matemáticamente como (Jaimes, 2011):”

$$G = \rho V_s^2$$

Siendo:

G = Módulo de rigidez

ρ = Densidad del terreno

V_s = Velocidad de onda S

Módulo de Young: “Determinado como la relación entre el esfuerzo uniaxial y la deformación uniaxial, proporcionando el valor de rigidez de un material elástico isotrópico calculado como (Jaimes, 2011):”

$$E = 2\rho V_s^2 \left(1 + \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2} \right)$$

Donde:

E = Módulo de Young

V_p = Valor de velocidad de onda P

V_s = Valor de velocidad de onda S

ρ = Densidad del terreno

5.1.1.2. Determinar los perfiles de velocidad de ondas P y ondas S en los materiales que componen la formación algodonal.

5.1.1.2.1. Descripción geológica de la formación algodonal.

5.1.1.2.1.1. Geología regional: La ubicación de Ocaña según la Carta Cronoestratigráfica de Colombia (CCC, Ingeominas 2005) hace parte del terreno Santander. De forma generalizada en este municipio se identifican dos formaciones geológicas que afloran en esta región, la primera y más representativa es de carácter sedimentario, y es conocida como la Formación Algodonal (Tpa), la cual está definida en la CCC, como de ambiente continental aluvio-fluvial, constituida por conglomerados con fragmentos de roca y cuarzo de color amarillo y gris, con intercalaciones de areniscas arcillosas de color verde y gris y arcillolitas gris verdosa y amarillenta. La edad de la formación es incierta, pero se estima del Cenozoico tardío, específicamente del Plioceno. La otra Formación, de carácter ígneo es conocida como el Complejo intrusivo – extrusivo (Jci), hace parte del complejo ígneo metamórfico denominado “Macizo Santander” e incluye rocas ígneas del juratriásico (entre 144 y 245 MA). Constituido por una fase intrusiva cuya composición predominante es cuarzo – monzonita, pórfidos riolíticos, diques básicos de diabasas y basalto; también incluye material piroclástico con presencia de toba, brechas y aglomerados. Ver la figura 15 y la leyenda geológica en la figura 16 (Baez, 2017).

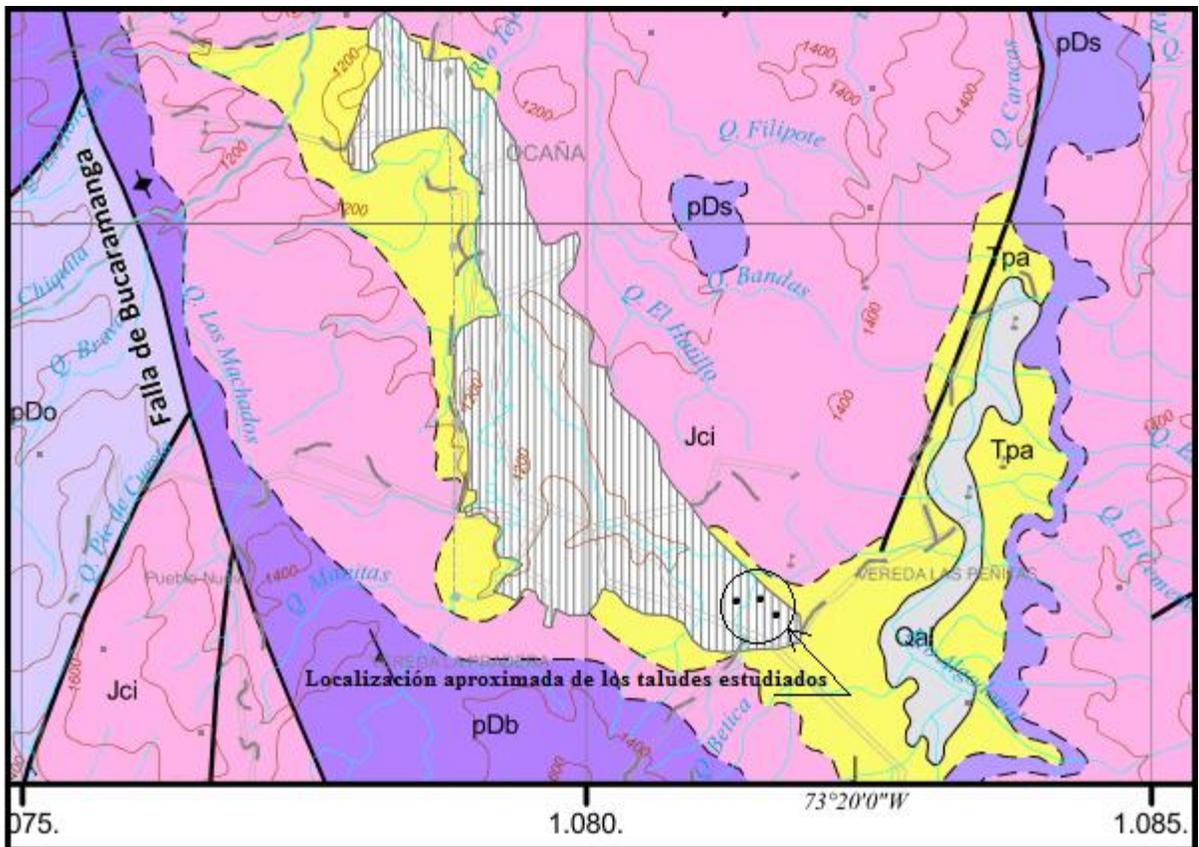


Figura 15. Sección del mapa de geología de la plancha 76 Ocaña, 1980 – INGEOMINAS. Esc. 1:100000

Fuente: Servicio Geológico Colombiano y modificado.

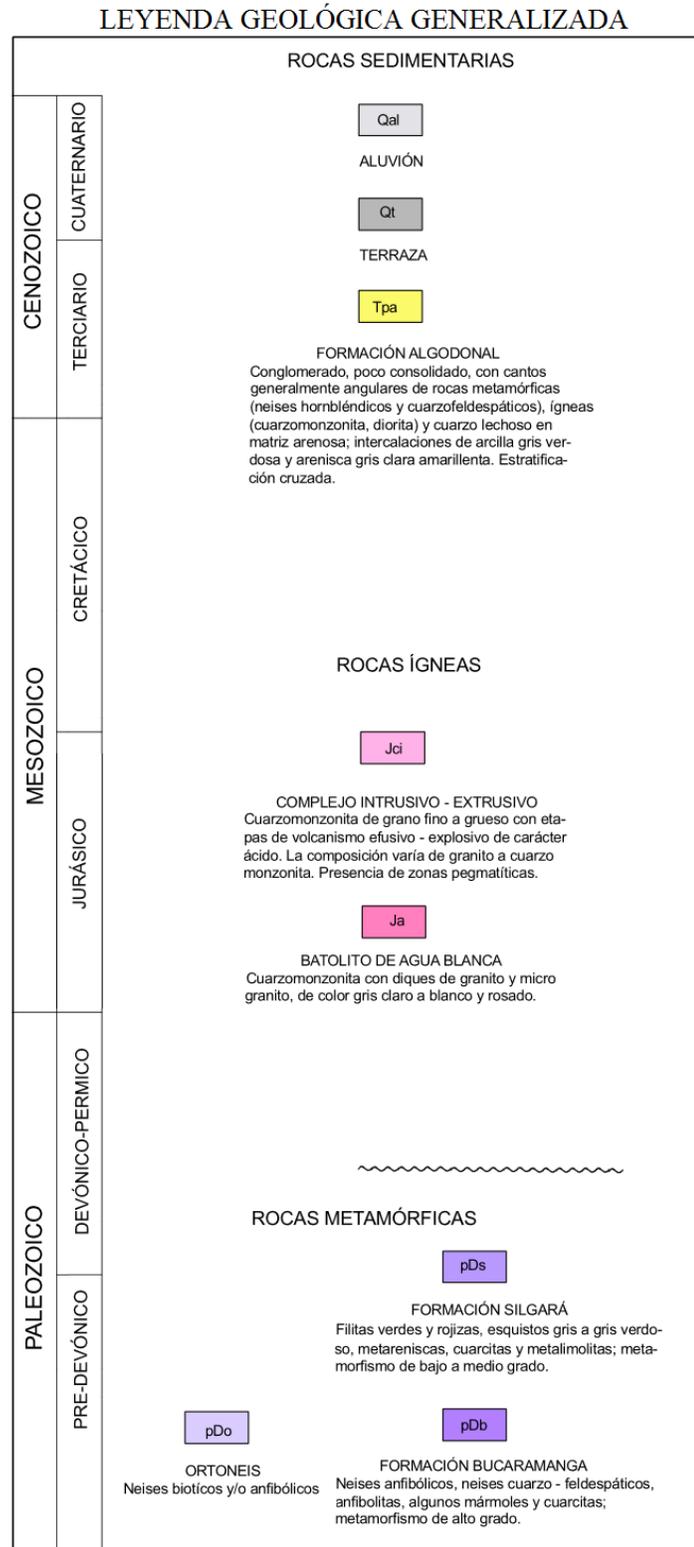


Figura 16. Leyenda geológica generalizada.

Fuente: Servicio Geológico Colombiano.

5.1.1.2.1.2. Geología local:

Talud vertical de explanación en el sector de Tacaloa

La Formación algodonal en este talud tiene un espesor variable entre 2 y 10 m. de altura está representada en su parte basal por rocas conglomeráticas y en su parte media y superior por la intercalación de arcillolitas y conglomerados. Superficialmente posee un suelo residual de escasos centímetros. Su disposición estratigráfica general es N72°E/24S (Baez, 2017).

Esta formación en la literatura geológica es descrita con un espesor aproximado de 554 metros de rocas sedimentarias de origen variado (lacustre, conos aluviales, depósitos torrenciales). La expresión geomorfológica de la Formación consiste mesas con superficie horizontal o suavemente inclinada hacia el oriente, locamente se observan cerros redondeados producto de la erosión. Aunque la edad de la formación es incierta, se ha postulado como del terciario tardío al cuaternario temprano (entre 1 y 1.5 M.A). Generalmente la unidad presenta estructuras sedimentarias diversas tales como estratificación cruzada, estratificación gradada, notables claramente en los estratos de grano grueso como conglomerado y arenisca, también se observaron marcas de corriente (Baez, 2017).

La constitución principal en esta zona es de conglomerados matrizsoportados poco consolidados con intercalaciones nodulares de arcilla abigarrada friable, ver las figuras 17 y 18. Las arcillolitas son de color pardo amarillento a beige localmente limosas. A nivel local los estratos presentan una leve inclinación o buzamiento generalizado de las capas de 24° S (Baez, 2017).



Figura 17. Presencia de nódulos arcillosos en los estratos conglomeraticos.

Fuente: Báez, 2017.



Figura 18. Nódulo arcilloso en estrato conglomeratico.

Fuente: Báez, 2017.

La disposición estructural de las rocas sedimentarias en este afloramiento es compleja podría tratarse de facies de borde de canal o de una estructura tectónica tipo sinclinal con eje de pliegue en sentido este-oeste e inclinación aproximada de los flancos de 10° , indicio de

esto son las familias de diaclasas evidenciadas en los estratos arcillosos y las fracturas tanto en las arcillolitas como en los conglomerados, estructuras no muy comunes en las rocas de la Formación Algodonal salvo en estratos que están bastante inclinados afectados por algún evento tectónico regional. Ver figura 19 (Baez, 2017).



Figura 19. Afloramiento de la formación algodonal en un talud del barrio Tacaloa
Fuente: Báez, 2017.

Talud vertical de explanación en Belén-Circunvalación.

En este sector la Formación Algodonal se encuentra representada básicamente por conglomerados homogéneos potentes de color pardo rojizo con intercalaciones de lentes y nódulos arcillosos de color gris verdoso, localmente aparecen niveles de arcillolitas en la parte superior. La distribución estructural de la estratificación es relativamente compleja, ver figura 20, adicionada a la estratificación cruzada que se observa en los conglomerados y revela un movimiento tectónico que orientó los estratos de forma inclinada con disposición N84E/19S para los estratos conglomeráticos y N67E/27S para el nivel arcilloso superior (Baez, 2017).

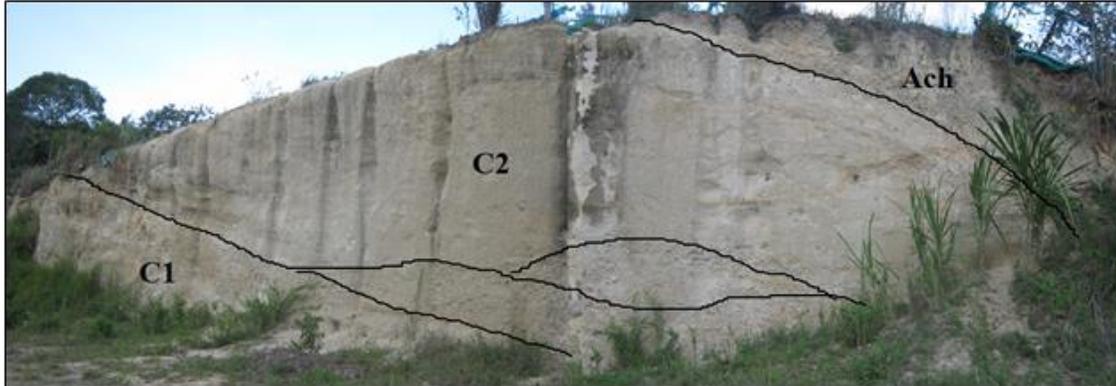


Figura 20. Disposicion estructural generalizada de los niveles de conglomerado C y el nivel arcilloso Ach.

Fuente: Báez, 2017.

Talud vertical de explanación en el barrio Libardo Alonso

A diferencia de los dos anteriores en este afloramiento las rocas predominantes son las de grano fino como las arcillolitas ubicándose en la parte basal y media y en la parte superior aparece un conglomerado, su disposición estructural es aparentemente horizontal con N21E/11E. Los estratos de arcillolita presentan contactos gradacionales y localmente tajante, especialmente entre la arcillolita 3 (Ach 3) y el conglomerado 1, ver figura 21. En este caso los estratos arcillosos presentan niveles conglomeráticos especialmente en los contactos entre estratos, entre las arcillolitas 2 y 3 existe un nivel arcillolimoso de color pardo amarillento que contrasta con el gris verdoso característico de las arcillolitas (Baez, 2017).

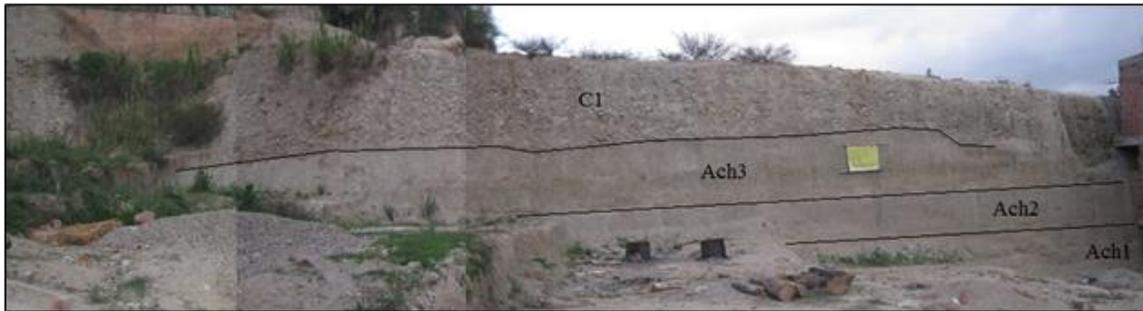


Figura 21. Distribucion estructural y litologica de los estratos en el talud del barrio Libardo Alonso.

Fuente: Báez, 2017.

Perfiles estratigráficos

Los perfiles estratigráficos se definieron a partir de la observación directa en los afloramientos de rocas en los taludes estudiados. Los espesores de algunos estratos son variables, por tanto la columna estratigráfica generalizada solo es una representación de un valor promedio aproximado del espesor real visible, en algunos casos cuando los espesores son constantes el valor reflejado en la columna es el directamente observado en el afloramiento. Las capas descritas en la tabla 1 se enumeran estratigráficamente en orden ascendente. Ver tabla 3, y figuras 22 a 24 (Baez, 2017).

Tabla 3. Descripción litológica de los estratos encontrados en los taludes estudiados.

ESTRATO	DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA
TALUD SECTOR TACALOA	
Capa 8: Suelo Residual.	Con 0.15-0.25 cm de espesor, de color pardo oscuro, arcilloso, disgregable con los dedos, y con la presencia superficial de abundantes gramíneas, localmente con cantos de cuarzo y roca.
Capa 7: Conglomerado 4.	De color beige, matriz soportado, localmente clasto soportado, con clastos predominantemente de fragmentos de rocas ígneas y metamórficas y de cuarzo, su espesor visible actual es de 1.2 m. aproximadamente.
Capa 6: Arcillolita 2.	Arcillolita limosa (10%) de color pardo amarillento, localmente con tonalidades rojizas a naranja, y moteado de blanco, con lineamientos en el sentido de la estratificación, e inclusiones de minerales de feldespato y cuarzo. Se observa diaclasada y fracturada. Espesor variable aproximado de 1.5 m. en promedio.
Capa 5: Conglomerado 3.	De color beige, matriz soportado, los clastos son de fragmentos de rocas ígneas y metamórficas, presenta varias fracturas perpendiculares a la estratificación su espesor aproximado es de 2 m.
Capa 4: Arcillolita 1.	Arcillolita de color gris verdoso, localmente con tonalidades paradas, amarillentas, con inclusiones (< 10%) de minerales de feldespato y cuarzo. Presenta al parecer dos sistemas de diaclasas y localmente fracturas regulares de corta distancia. Espesor aproximado 2.5 m.
Capa 3: Conglomerado 2.	De color pardo más amarillento que el inferior y con niveles arcillosos entre C1 Y C2, matriz soportado, con clastos de fragmentos de rocas ígneas y metamórficas subredondeados y blocosos de hasta 22 cm de diámetro, en su interior a los 80 cm de espesor posee niveles de arcillas limosas de color beige y líneas delgadas rojizas con espesor de 35 cm. Su espesor aproximado es de 7.4 metros. En los niveles arcillosos la disposición estratigráfica es N74E/24S.
Capa 2: Conglomerado 1.	De color beige, pardo amarillento, matriz soportado, la matriz es arenosa y los clastos son de fragmentos de rocas ígneas y metamórficas entre 0.5 – 11 cm de diámetro, posee una imbricación aparente en dirección sur y un espesor visible de 1.15 metros. Se pudo medir la disposición estructural la estratificación N71E/24S.
Capa 1: Conglomerado 0.	De color beige, matriz soportado, los clastos son de fragmentos de rocas ígneas y metamórficas, su espesor visible es de 4.5 m.
TALUD SECTOR BELÉN-CIRCUNVALACIÓN	
Capa 4: Suelo residual.	Es escaso y no aparece en todo el afloramiento de unos pocos centímetros de espesor, no mayor de 10 o 15 cm., y favoreciendo el crecimiento de las plantas por suelos transportados depositados sobre este en algunas pequeñas vertientes de la parte superior del talud. De color pardo grisáceo y compuesto predominantemente por material arcilloso.
Capa 3: Arcillolita.	De color variado predominantemente gris verdosa, localmente pardo amarillento y ocasionalmente negro. Friable, fácilmente disgregable con los dedos; heterogénea, con abundantes inclusiones de clastos tamaño limo y arena fina a media, localmente limolítica y arenosa. En menor proporción moteado de blanco tamaño arena fina. Sucia. Presenta un fracturamiento paralelo a la estratificación con disposición estructural N67E/27S. Su espesor visible es de aproximadamente 2.5 metros.

Fuente: Báez, 2017.

Tabla 3. Continuación.

Capa 2: Conglomerado 2.	De color gris claro a pardo amarillento, localmente con colores pardo rojizo. Aparecen algunos niveles arcillosos de espesor considerable (1 metro.). Hacia la superficie posee un nivel arcillo-limoso con laminación de color pardo rojiza. Potente, heterogéneo, con aparente estratificación cruzada, matriz soportado, con clastos pequeños (menor diámetro que los de C1 no mayores predominantemente a 15 cm). Presenta erosión laminar, varias acanaladuras superficiales de entre 20 – 30 cm de espesor y no mayores a 10 cm de profundidad en el sentido de la pendiente vertical del talud debido a la escorrentía superficial. Su espesor visible es de 4.74 metros.
Capa 1: Conglomerado 1.	De color gris a pardo grisáceo-amarillento con intercalaciones de lentes y nódulos arcillosos gris verdosos de espesor variable entre 43 y 35 cm. Al igual que el estrato anterior presenta erosión laminar en el sentido vertical de la pendiente del talud debido a la escorrentía superficial. La imbricación es en sentido este. Y la disposición estructural de la estratificación es N84E/19S. El espesor visible es de 1.56 metros.
TALUD SECTOR LIBARDO ALONSO	
Capa 4: Conglomerado 1.	De color pardo amarillento claro a grisáceo; matriz soportado con clastos angulosos, blocosos, subredondeados en menor proporción y ocasionalmente aplanados de fragmentos de rocas ígneas, metamórficas y cuarzo lecho con diámetros entre 0.5 – 25 cm. Potente y homogéneo con un espesor variable y aparente de 2.2 metros.
Capa 3: Arcillolita 3.	De color gris verdosa, localmente parda amarillenta, abigarrada ocasionalmente; heterogénea, con abundantes inclusiones de cuarzo, feldespato y en una escasa proporción fragmentos de roca. Presenta un nivel areno-conglomerático hacia la base que desaparece mientras se extiende en sentido EW. Tiene un contacto semi-tajante con C1. Su espesor aparente es de 1.8 metros.
Capa 2: Arcillolita 2.	De color gris verdoso característico, friable, con abundantes inclusiones de cuarzo lechozo con diámetros entre 1 – 2 cm. Su espesor aparente es de 1.4 metros.
Capa 1: Arcillolita 1.	De color predominantemente pardo amarillento con lentes limo-arenosos hacia la base, su característica principal es que es limosa o limo arcillosa. Su espesor aparente es de 2.1 metros.

Fuente: Báez, 2017.

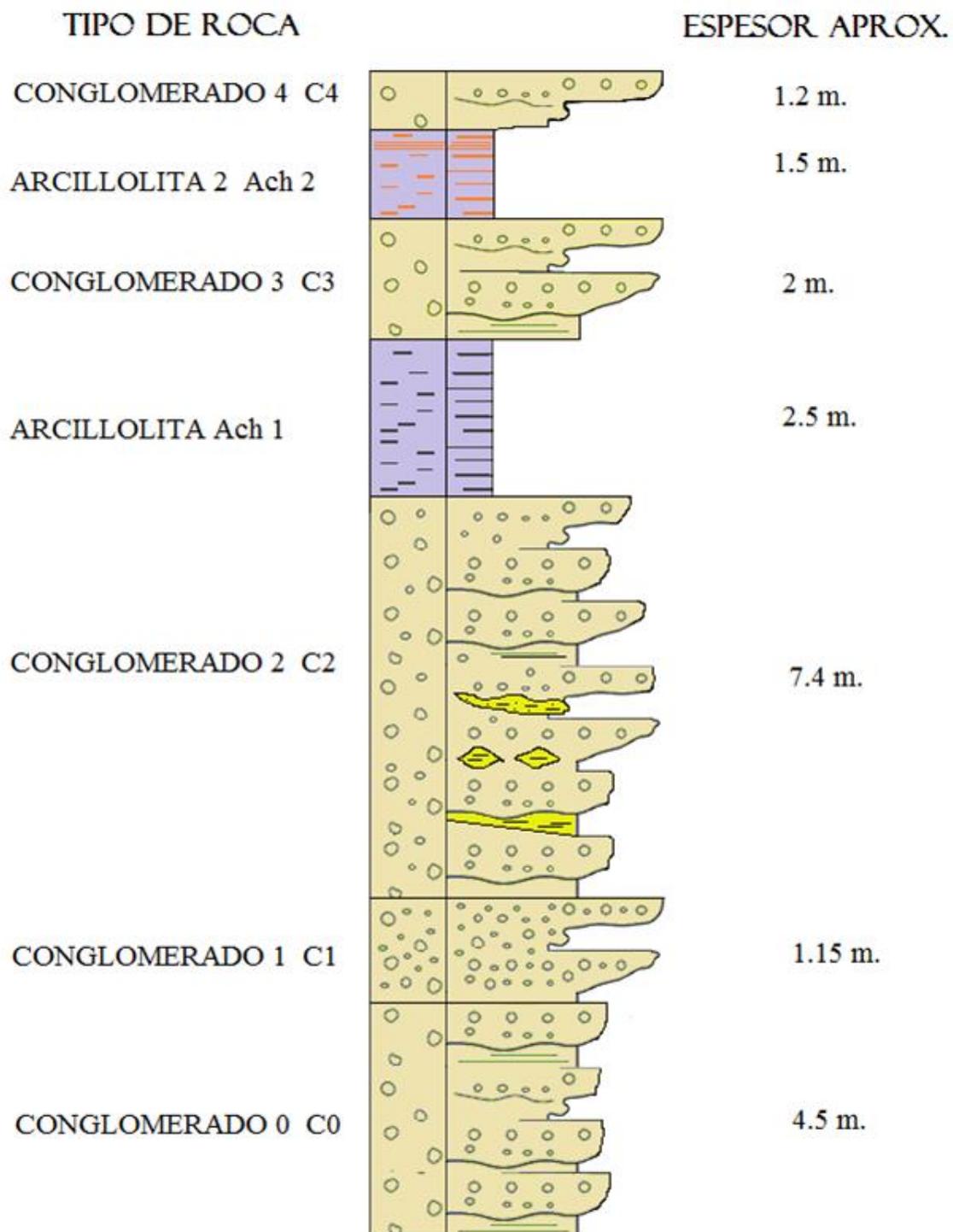


Figura 22. Columna estratigráfica generalizada sector Tacaloa.

Fuente: Báez, 2017.

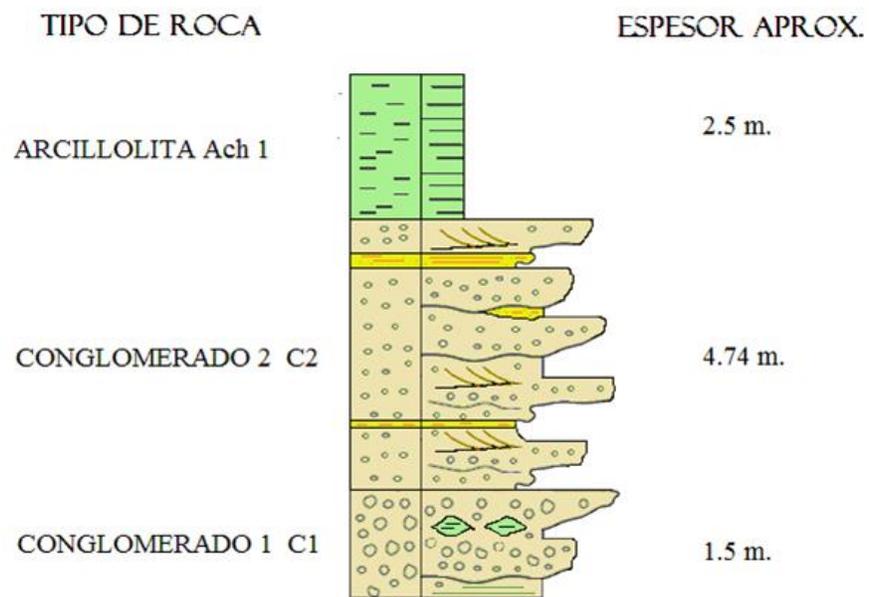


Figura 23. Columna estratigráfica generalizada sector Belén - Circunvalación.

Fuente: Báez, 2017.

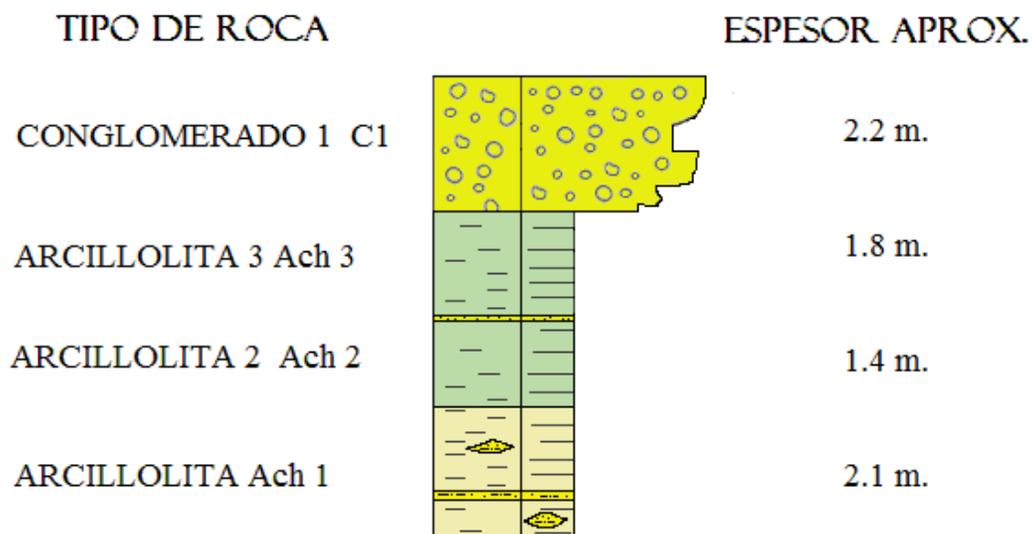


Figura 24. Columna estratigráfica generalizada sector Libardo Alonso.

Fuente: Báez, 2017.

5.1.1.2.2. *Determinación de los perfiles de velocidades de ondas sísmicas.*

Para el desarrollo de este objetivo inicialmente se seleccionaron 11 sitios alrededor de la ciudad para la realización de los ensayos de campo con forme a la muestra escogida, alrededor de la zona sur, sur-oriental y centro-occidental de la ciudad. En estas zonas se tenía previo conocimiento de la presencia de la formación algodonal, basándonos en el mapa geológico de la región y en inspecciones visuales realizadas en campo.

Adicionalmente se realizó la visita a los diferentes sectores seleccionados para estudiar los factores externos como tránsito, flujo peatonal, geometría, accesibilidad y demás factores que pudieran afectar la adquisición de datos.

Para la selección de los sectores a estudiar, se consideró inicialmente que tuviesen una extensión mínima de 50 metros, lo que permitiría una separación entre geófonos de 2 metros, con una longitud total de 46 metros, y 2 metros en cada extremo para los disparos al inicio y final de la línea. Con esta separación se logra una profundidad de registro de velocidades correspondiente a un tercio de la longitud total, es decir 15,3 metros de profundidad, para el caso de refracción sísmica. Considerando que la longitud entre geófonos puede ser incluso de 10 metros de separación, logrando penetrar hasta 76,6 metros en el subsuelo, se optó por una separación de 2 metros, ya que para el caso particular de Ocaña, y con conocimiento previo de resultados de varios estudios de suelos y proyectos desarrollados en la ciudad, la profundidad de penetración con equipo de perforación por percusión no supera los catorce metros y además, la mayoría de las edificaciones en la ciudad están cimentadas a profundidades inferiores a los 10 m.

Los ensayos de campo se realizaron durante los días sábados y domingos, en los cuales se esperaba un menor impacto de factores externos (especialmente el tráfico de vehículos), iniciando en un sector de la zona sur oriental de la ciudad, y a partir de este sitio se realizaron los demás ensayos hacia la zona sur y centro occidental del perímetro urbano de la ciudad. Una imagen de cada sitio de estudio se muestra a continuación en la figuras 25 a 35:

Zona Sur Oriental:

Anexos UFPS Ocaña



Figura 25. Sector de Anexos.

Fuente: Autores, 2017.

La Granja UFPS Ocaña



Figura 26. Sector de la Granja.

Fuente: Autores, 2017.

Vía a la Universidad



Figura 27. Sector vía a la Universidad.

Fuente: Autores, 2017.

Zona Sur:

Barrio Acolsure



Figura 28. Sector del barrio Acolsure.

Fuente: Autores, 2017.

La Circunvalar a la altura del barrio Belén



Figura 29. Sector de la Circunvalar a la altura del barrio Belén.

Fuente: Autores, 2017.

Libardo Alonso



Figura 30. Sector de Libardo Alonso.

Fuente: Autores, 2017.

Tacaloa



Figura 31. Sector de Tacaloa.

Fuente: Autores, 2017.

Zona Centro-Occidente

Bella Vista



Figura 32. Sector de Bella Vista.

Fuente: Autores, 2017.

Buenos Aires



Figura 33. Sector de Buenos Aires.

Fuente: Autores, 2017.

El Dorado



Figura 34. Sector de El Dorado.

Fuente: Autores, 2017.

Los Lagos



Figura 35. Sector de Los Lagos.

Fuente: Autores, 2017.

A continuación en la figura 36, se presenta una imagen satelital de los sectores de estudio.

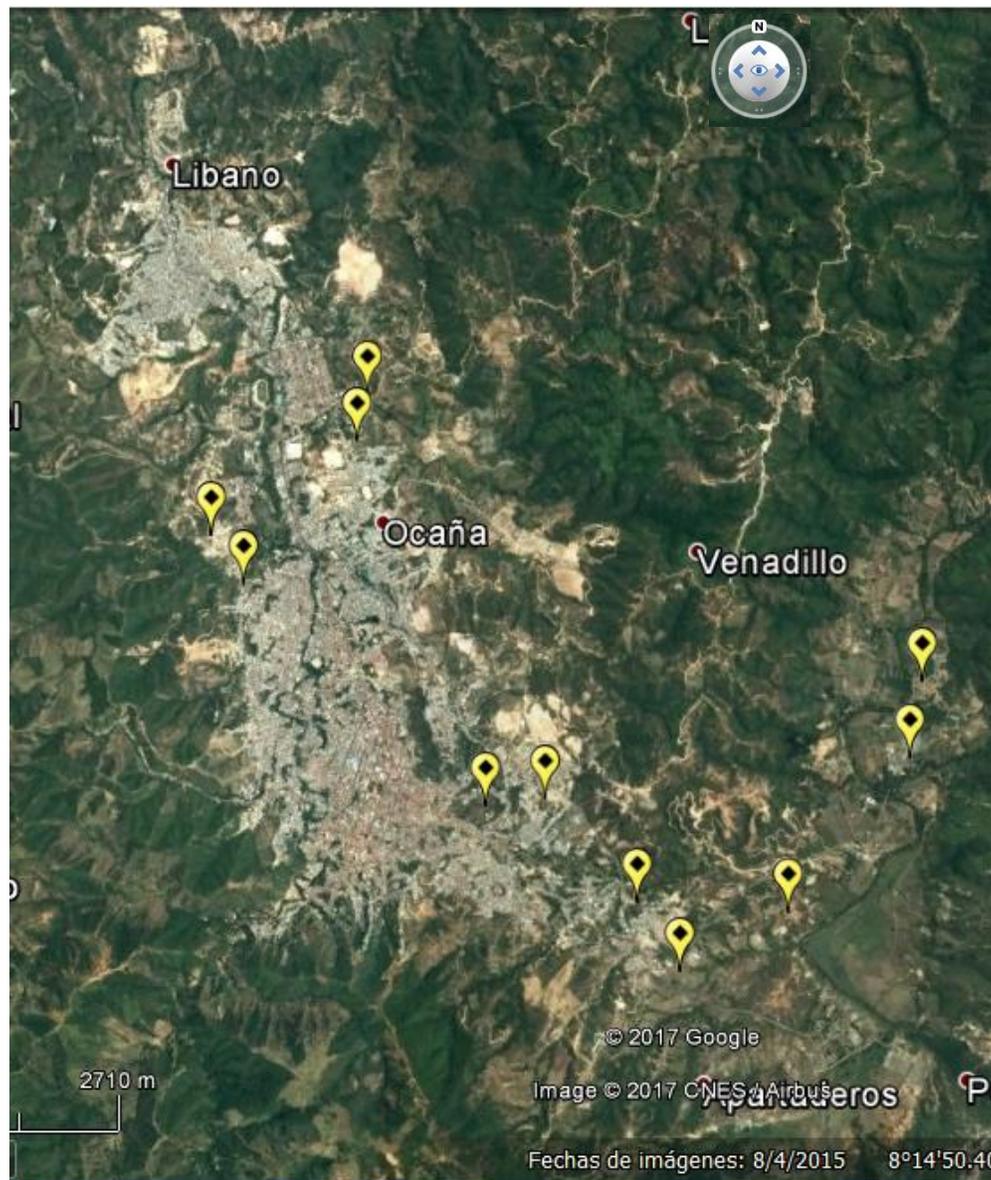


Figura 36. Imagen satelital con la ubicación de los sitios de estudio.

Fuente: Google Earth modificado, 2017.

Una vez en campo, se seleccionaba un lugar con baja pendiente, para situar los equipos, y la estación de registro, a partir de allí, se ubicaban los geófonos con una

separación de dos metros, posteriormente se extendía el cable al cual iban conectados, ver figura 37. Luego de realizar todas las conexiones e iniciar el software de adquisición, se procedía a realizar los diferentes disparos, que dependiendo del ruido ambiental variaba entre 4 y 5 disparos. El primer ensayo en realizarse era el de refracción sísmica, ubicando la placa de disparo al inicio y final de la línea y en los cuartos medios de la misma.



Figura 37. Disposición de los geófonos en campo.

Fuente: Autores, 2017.

Posteriormente se configuraba el software para la realización del ensayo de MASW, de igual forma se determinó un número de disparos, y dado que se optó por realizar MASW en 2D era necesario realizar la serie de disparos entre cada par de geófonos, es decir un número total de 25 series de disparo. Finalizado el proceso de adquisición se procedía a realizar el levantamiento topográfico del terreno, incluyendo la línea con los 24 geófonos. En algunos de los ensayos que se realizaron se optó por hacer una segunda línea a una

separación aproximada de 10 m paralela a la línea inicial con el fin de obtener información de respaldo.

En total se realizaron 32 ensayos de refracción sísmica y 31 ensayos de MASW, para un total de 903 archivos de información, en formato “.DAT” que se organizaron en carpetas y subcarpetas para llevar un manejo eficiente de la información. Adicionalmente se organizó el registro fotográfico correspondiente a los diferentes ensayos realizados. Ya dispuesta toda la información se comenzó por procesar los archivos topográficos, realizando sus respectivos trazados en AutoCAD, y adicionalmente se extrajo la información de las coordenadas correspondientes a los 24 geófonos en formato “.TXT” que posteriormente se importan al software de procesamiento para que las tomografías de los perfiles de velocidad de ondas P y ondas S se muestren con las elevación de cada punto.

Como resultado final se obtuvieron las siguientes tomografías mostradas en las figuras 38 a 59, con sus respectivos rangos de error.

Sector de Acolsure

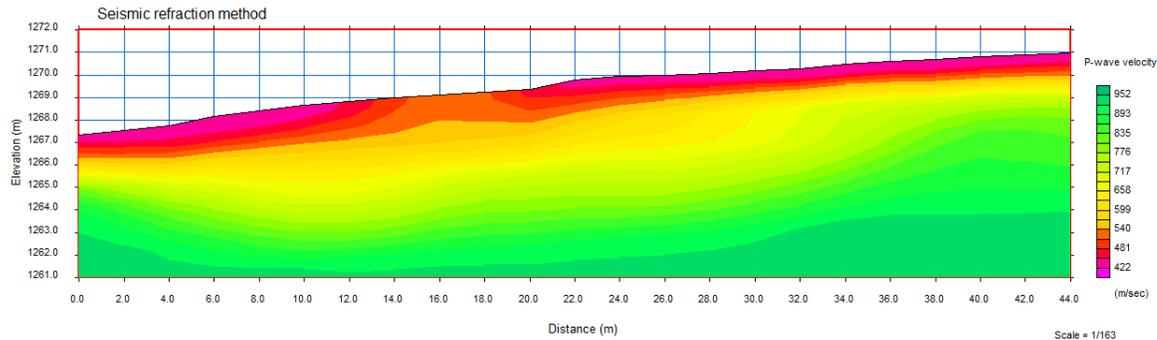


Figura 38. Perfil de velocidad de onda P con rms error de 0,888884 msec

Fuente: Autores, 2017.

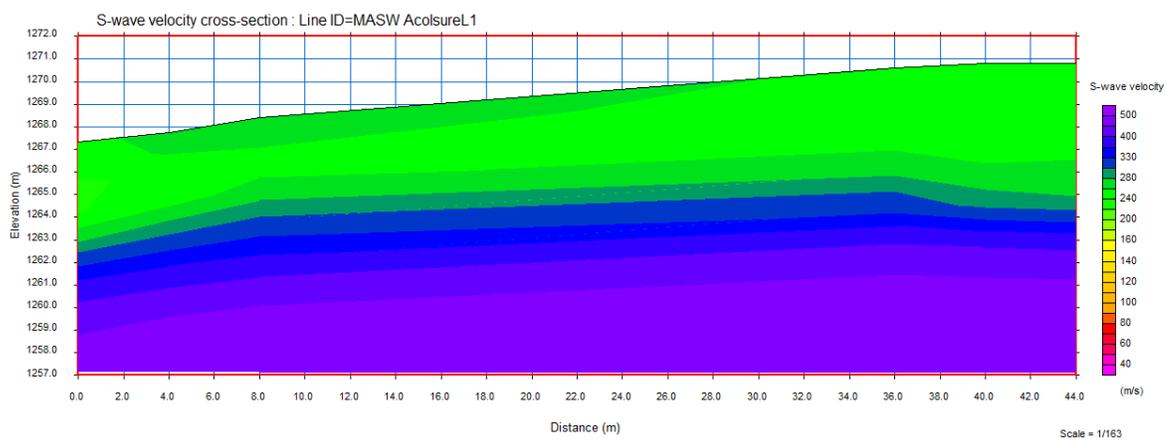


Figura 39. Perfil de velocidad de onda S con rms error de 1,254330%.

Fuente: Autores, 2017.

Sector de Anexos UFPS Ocaña

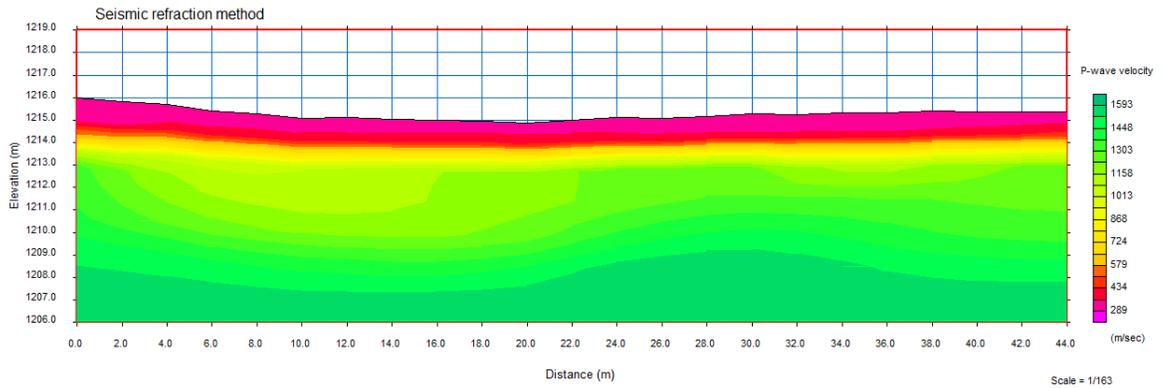


Figura 40. Perfil de velocidad de onda P con rms error de 1,019054 msec

Fuente: Autores, 2017.

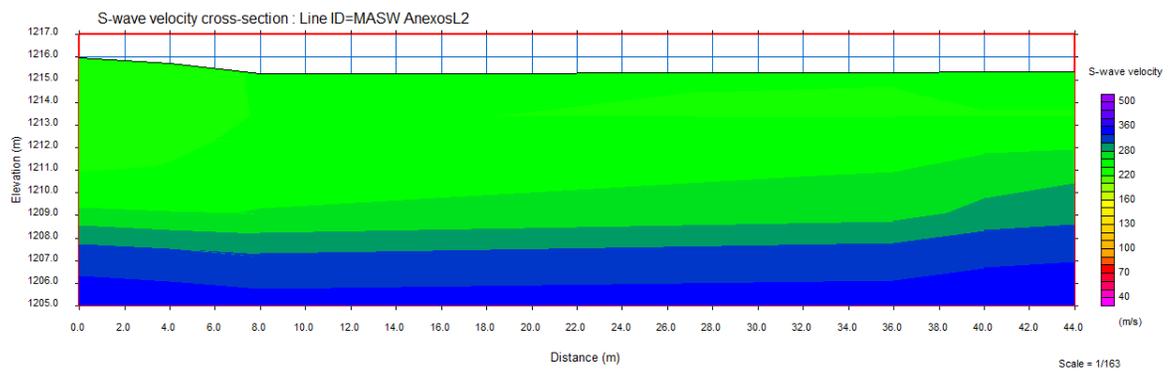


Figura 41. Perfil de velocidad de onda S con rms error de 3,558521%

Fuente: Autores, 2017.

Sector de Bella Vista

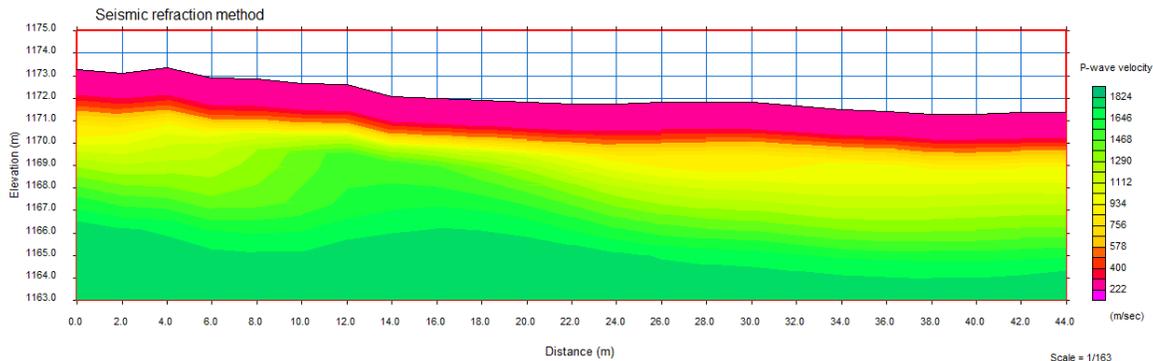


Figura 42. Perfil de velocidad de onda P con rms error de 1,206128 msec

Fuente: Autores, 2017.

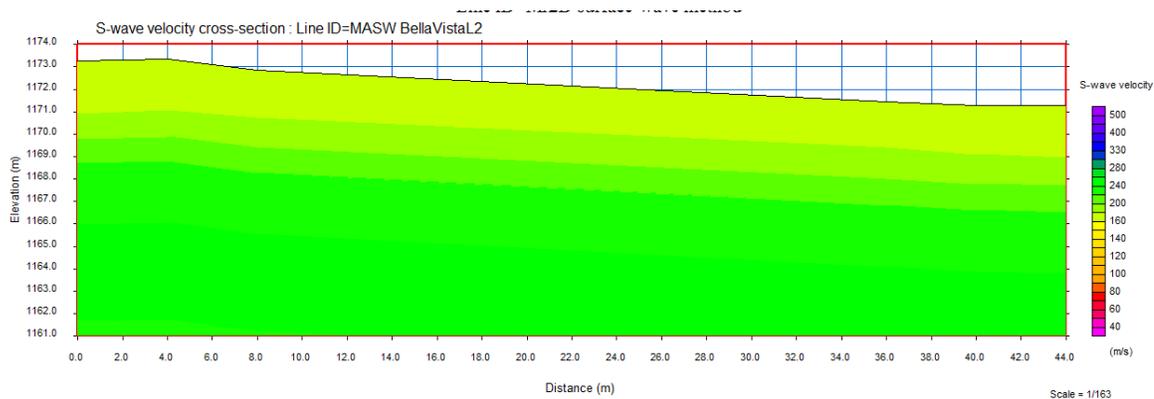


Figura 43. Perfil de velocidad de onda S con rms error de 1,841337%

Fuente: Autores, 2017.

Sector de Buenos Aires

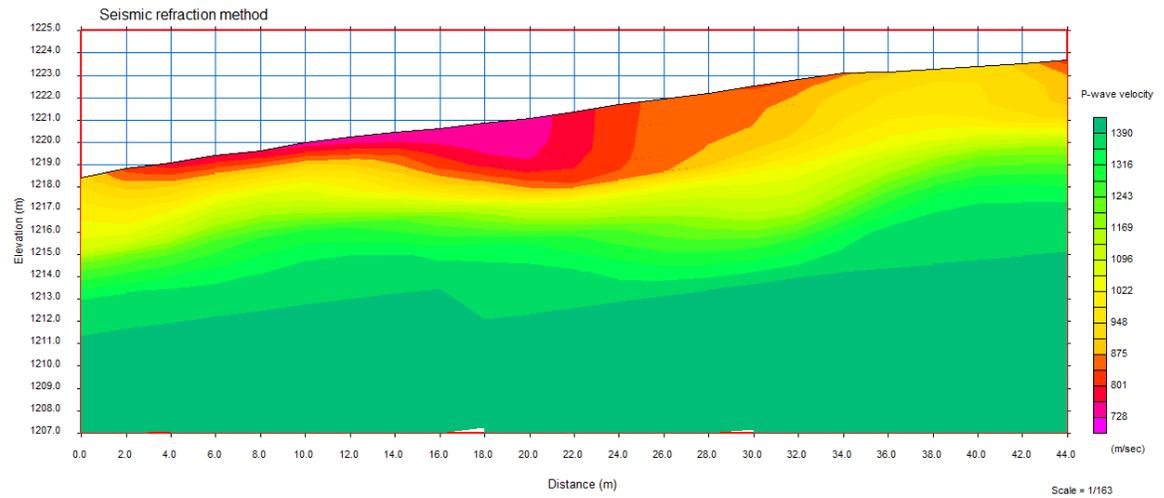


Figura 44. Perfil de velocidad de onda P con rms error de 1,005461 msec

Fuente: Autores, 2017.

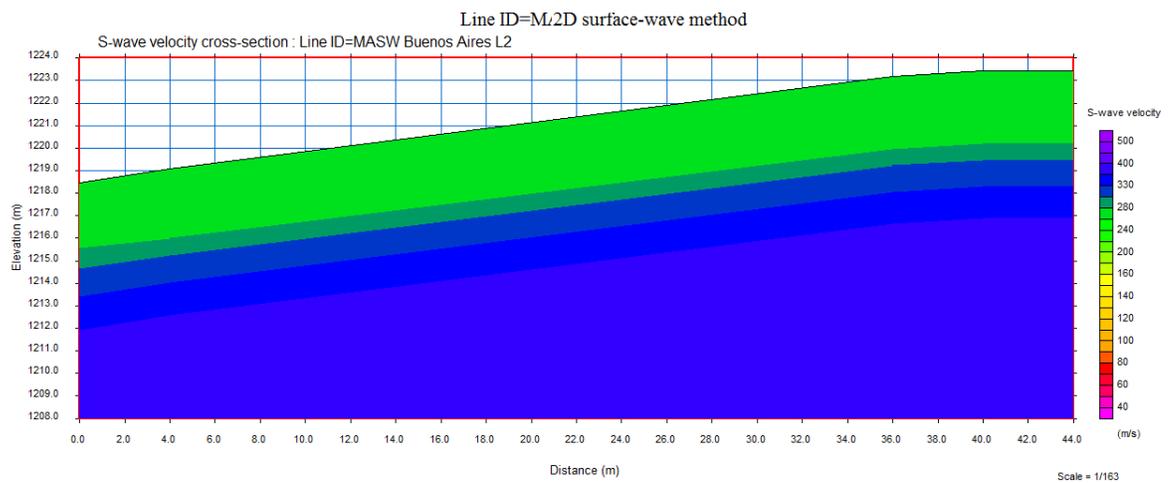


Figura 45. Perfil de velocidad de onda S con rms error de 1,404665%

Fuente: Autores, 2017.

Sector de la Circunvalar a la altura del barrio Belén

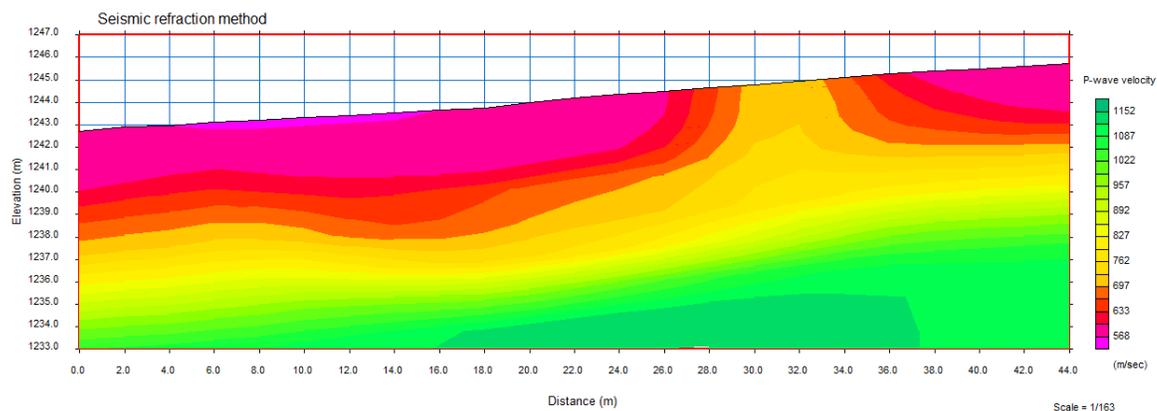


Figura 46. Perfil de velocidad de onda P con rms error de 2,726408 msec

Fuente: Autores, 2017.

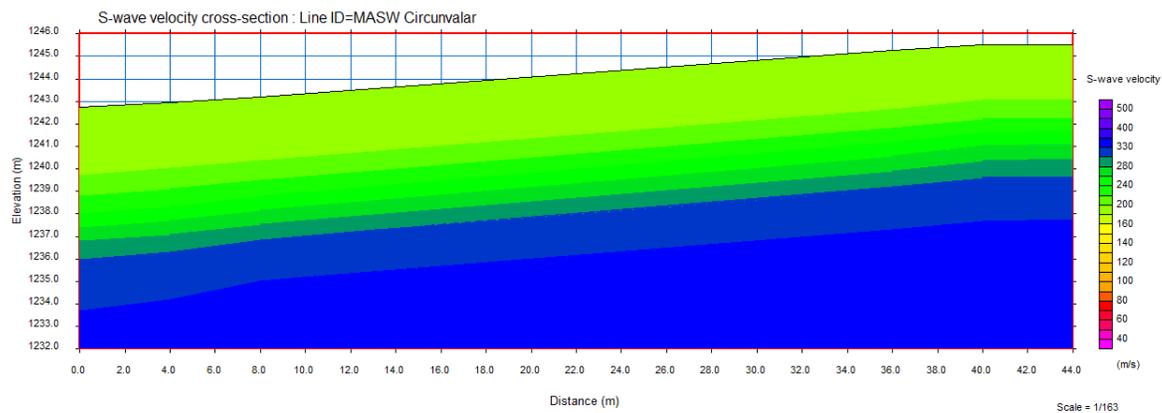


Figura 47. Perfil de velocidad de onda S con rms error de 2,965421%

Fuente: Autores, 2017.

Sector de El Dorado

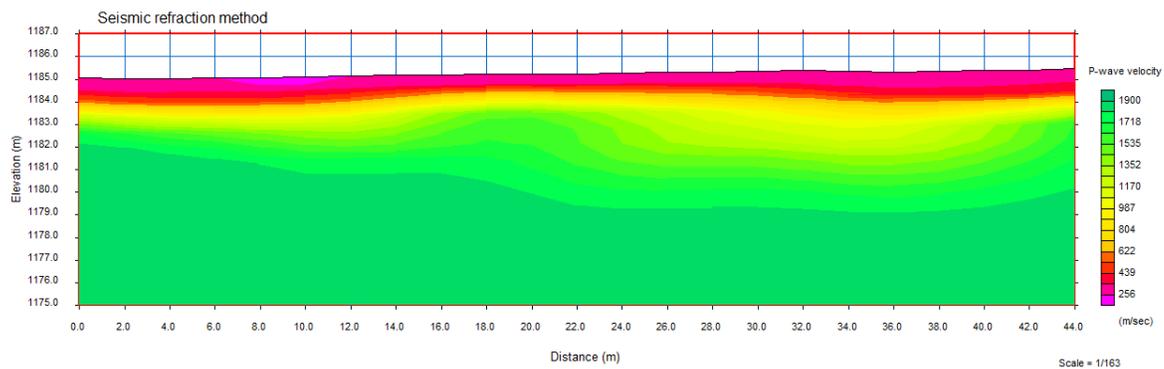


Figura 48. Perfil de velocidad de onda P con rms error de 1,17080 msec

Fuente: Autores, 2017.

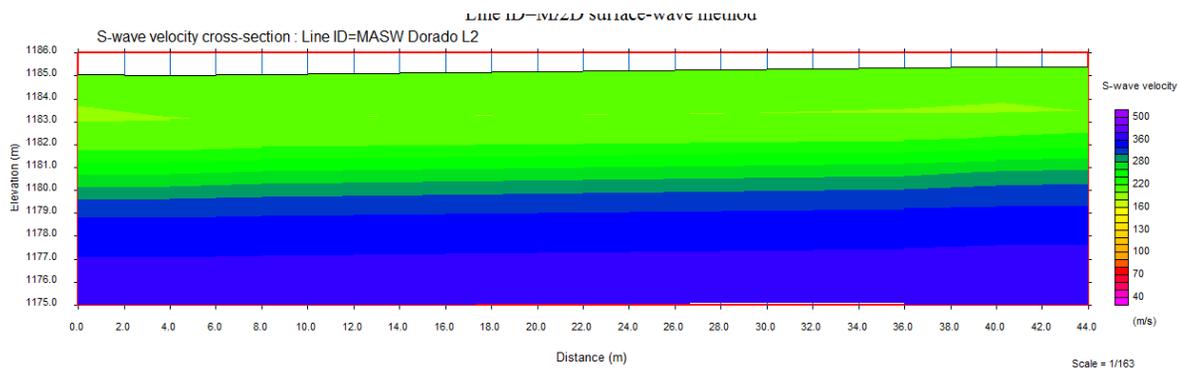


Figura 49. Perfil de velocidad de onda S con rms error de 1,449896%

Fuente: Autores, 2017.

Sector de la Granja UFPS Ocaña

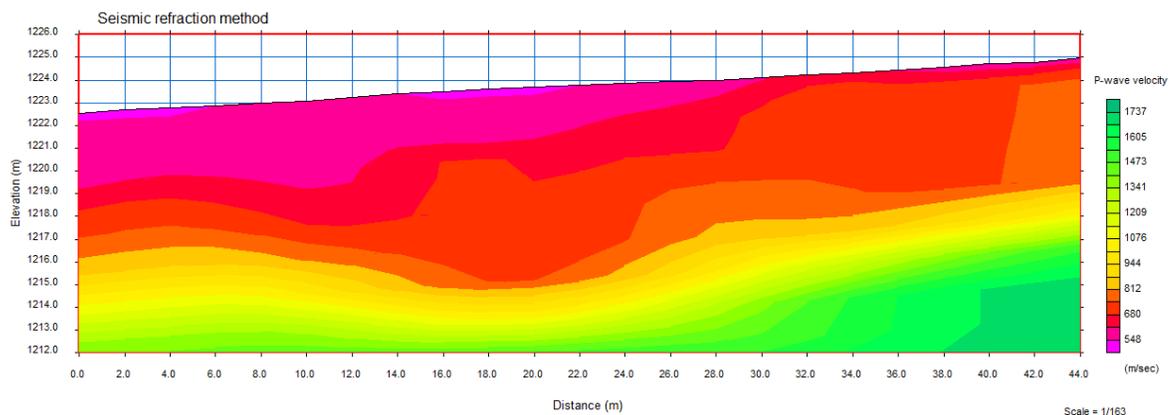


Figura 50. Perfil de velocidad de onda P con rms error de 1,797049 msec

Fuente: Autores, 2017.

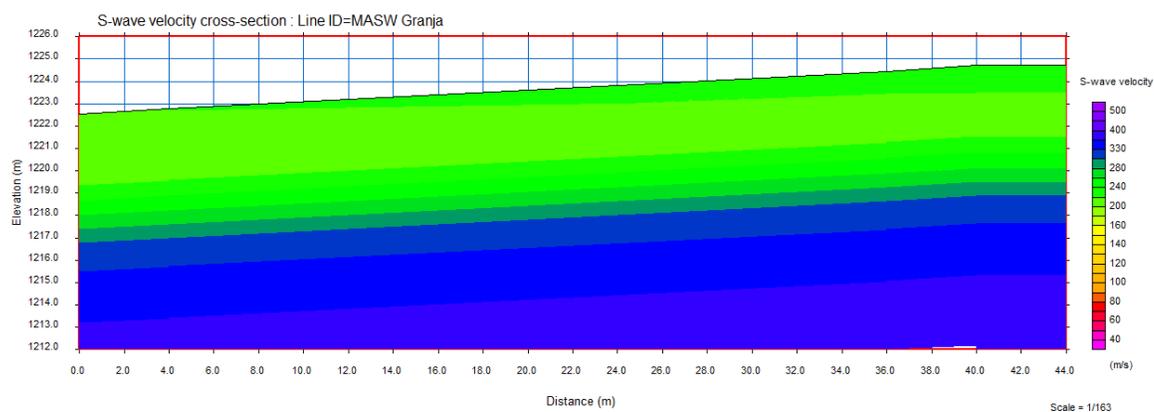


Figura 51. Perfil de velocidad de onda S con rms error de 0,965012%

Fuente: Autores, 2017.

Sector Vía a la UFPS Ocaña

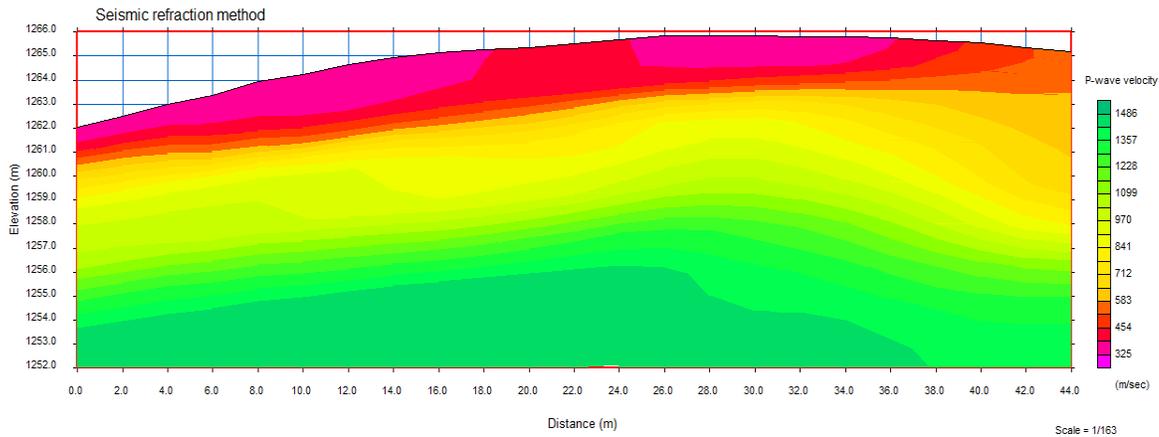


Figura 52. Perfil de velocidad de onda P con rms error de 1,133030 msec

Fuente: Autores, 2017.

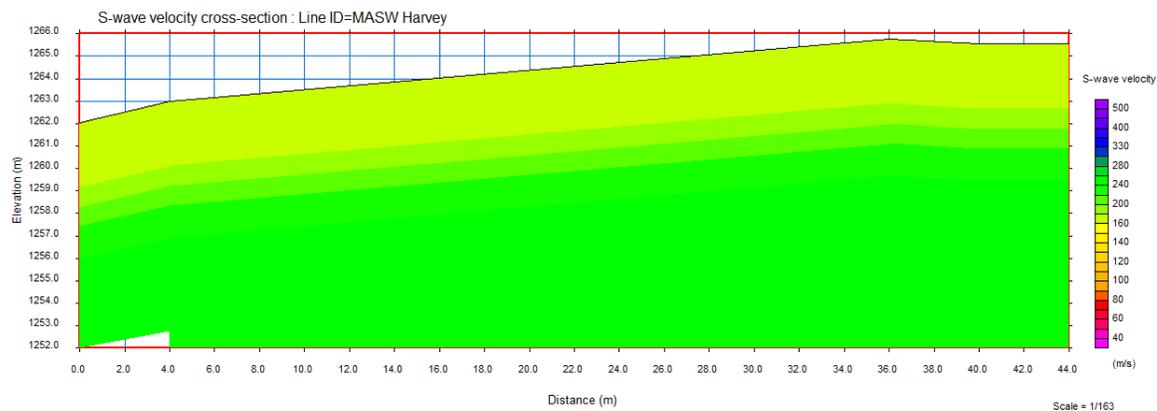


Figura 53. Perfil de velocidad de onda S con rms error de 1,039062%

Fuente: Autores, 2017.

Sector Los Lagos

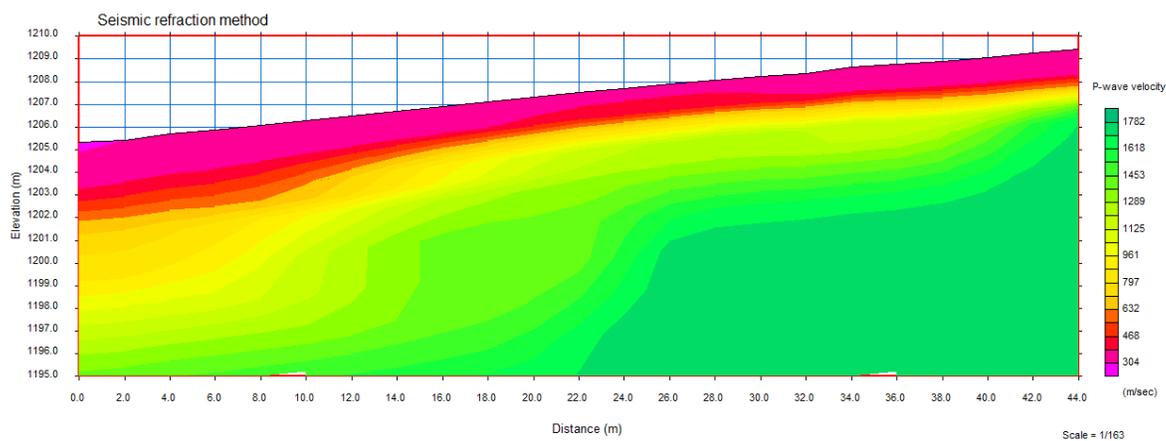


Figura 54. Perfil de velocidad de onda P con rms error de 2,195650 msec

Fuente: Autores, 2017.

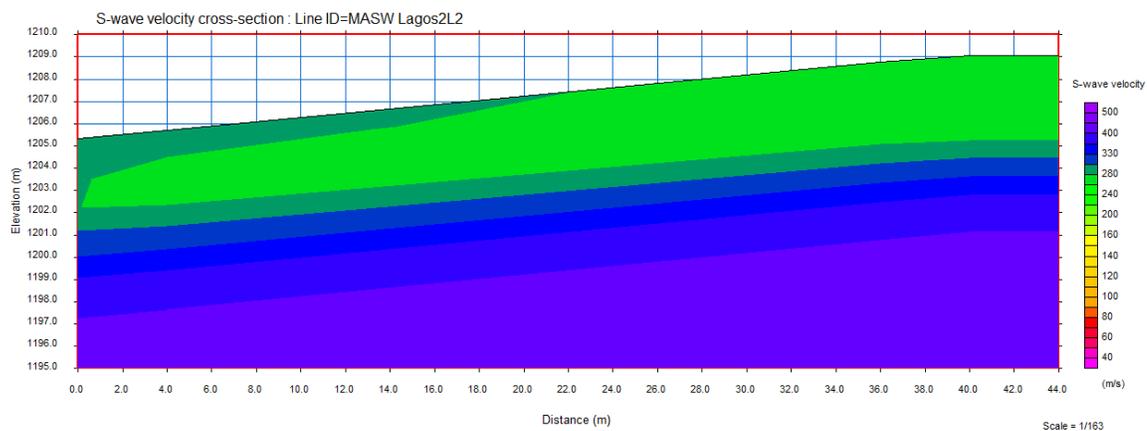


Figura 55. Perfil de velocidad de onda S con rms error de 2,006552%

Fuente: Autores, 2017.

Sector de Libardo Alonso

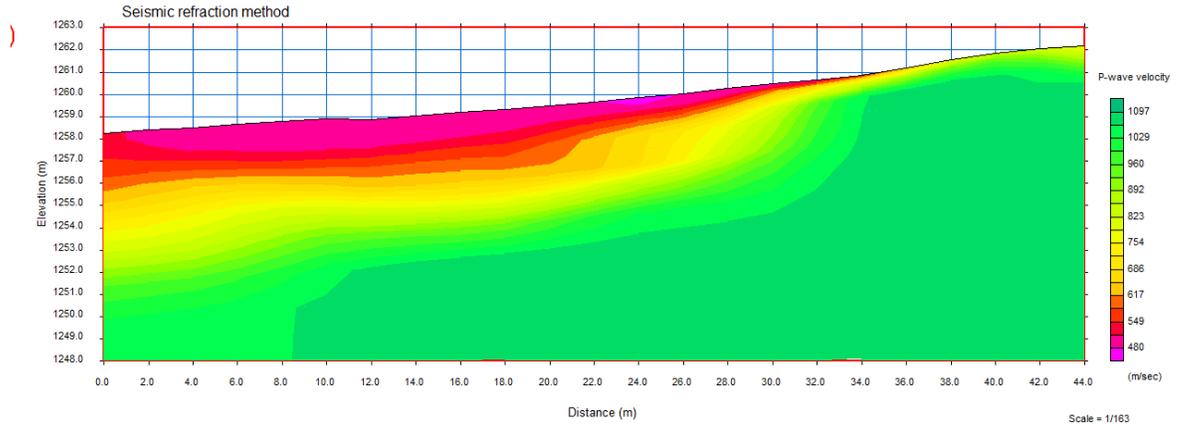


Figura 56. Perfil de velocidad de onda P con rms error de 2,087536 msec

Fuente: Autores, 2017.

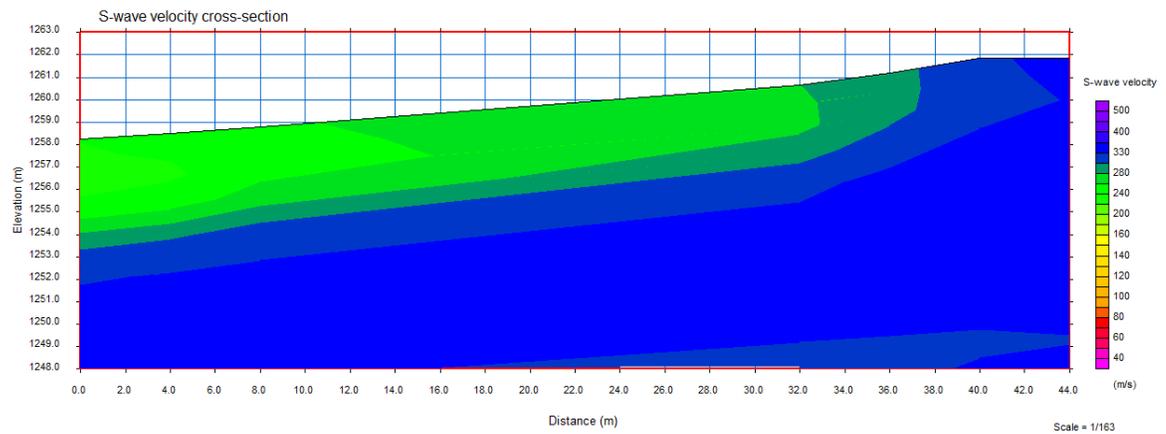


Figura 57. Perfil de velocidad de onda S con rms error de 3,634672%

Fuente: Autores, 2017.

Sector de Tacaloa

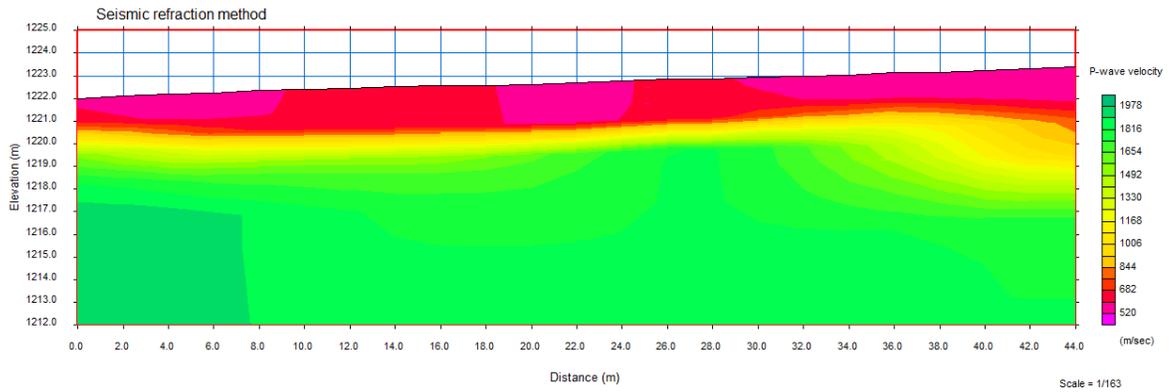


Figura 58. Perfil de velocidad de onda P con rms error de 1,496873 msec

Fuente: Autores, 2017.

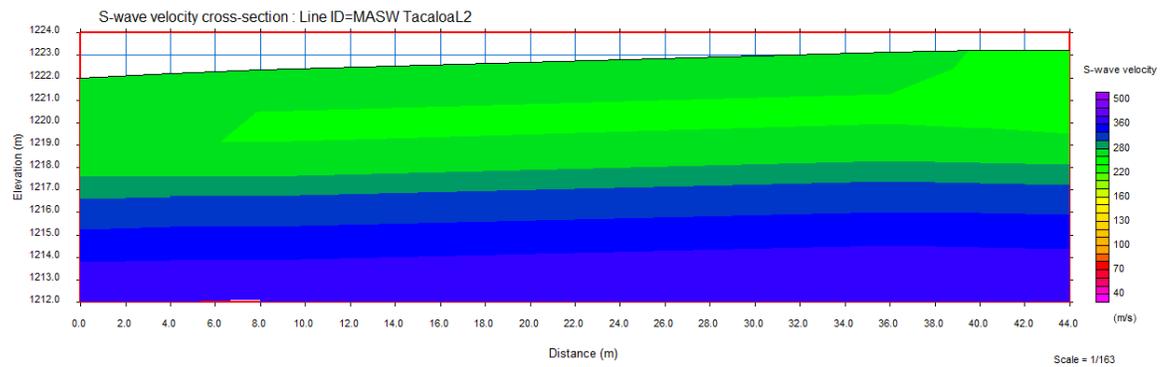


Figura 59. Perfil de velocidad de onda S con rms error de 0,940672%

Fuente: Autores, 2017.

5.1.1.3. Establecer los parámetros dinámicos característicos de la formación algodonálica a partir de los valores de velocidades de las ondas P y ondas S obtenidas en campo.

Este objetivo comprende la aplicación de las formulas establecidas durante el desarrollo del primer objetivo, partiendo de los valores de velocidad de ondas P y ondas S calculadas durante la ejecución del segundo objetivo. Adicionalmente el cálculo de dichos parámetros está condicionado al valor de la densidad, por lo cual inicialmente se debía establecer el valor de esta a diferentes profundidades en cada terreno, y ya que no se cuenta con una técnica o equipo especializado que permita el cálculo directo en campo de esta variable, fue necesario recurrir al uso de ensayos de campo y fórmulas de correlación entre la densidad y el valor de la onda P y S.

A continuación se muestra en la figura 60 una correlación entre la densidad y la velocidad de onda P, en esta gráfica se aprecia algunas de las ecuaciones planteadas en forma empírica para la densidad como una función de la onda P, para diferentes intervalos de velocidades de onda, estas ecuaciones corresponden a la relación Nafe-Drake publicada por Ludwig et al. (1970) para una amplia variedad de tipos de rocas sedimentarias y cristalinas. Muchas de las mediciones para estas relaciones corresponden en su mayoría al norte de California (Brocher, 2005).

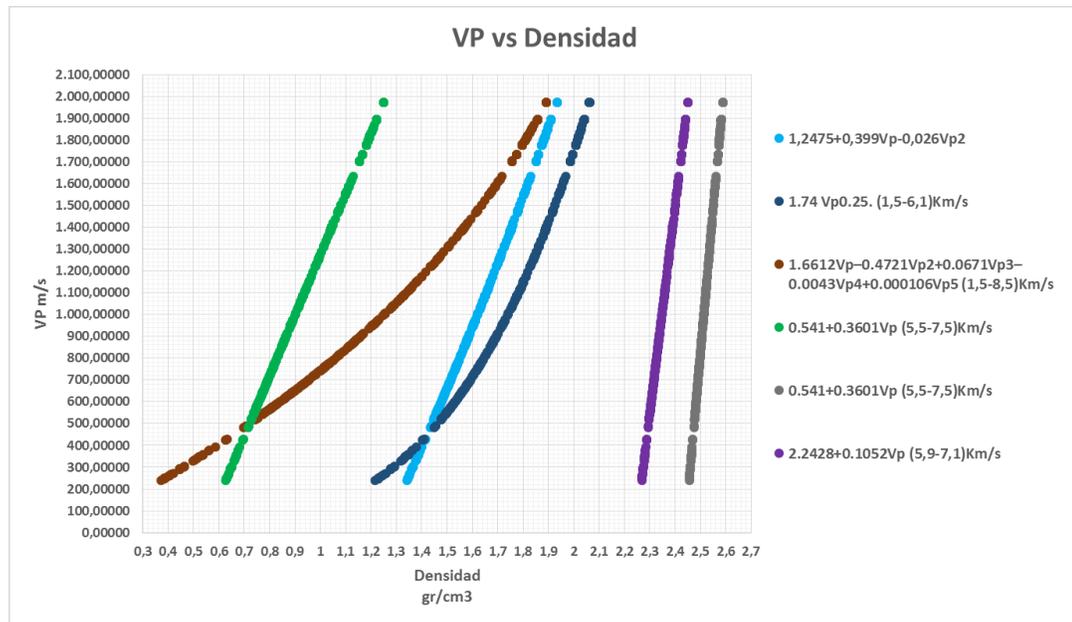


Figura 60. Grafica de las diferentes ecuaciones de correlación entre la velocidad de onda P y la densidad.

Fuente: Autores, 2017.

Sin embargo, debido a que estas ecuaciones se determinan en forma empírica a partir de mediciones sobre diferentes materiales, incluyendo estratos rocosos, es necesario validar los datos para la formación algodonal, entendiendo que esta formación puede variar en características y propiedades de los materiales que se estudiaron al norte de California. Con base en lo anterior, se optó por realizarse una serie de ensayos para establecer el valor de la densidad en los terrenos seleccionados para los estudios geofísicos, sin embargo, el principal inconveniente consistía en la obtención de muestras inalteradas, ya que el realizar apiques a profundidades mayores a los dos metros no es práctico y además representa un costo elevado por la cantidad de apiques que serían necesarios, de igual forma realizar ensayos mediante la extracción de muestras con equipo de rotación también incurre en un costo elevado y no garantiza la obtención de muestras de buena calidad.

En consideración de las dificultades mencionadas anteriormente se optó por tomar muestra en las zonas de talud donde se habían hecho previamente los ensayos de refracción y MASW y en algunos casos se optó por realizar el ensayo del cono de arena, dado el tipo de material en superficie. Solo en los sectores de la Circunvalar a la altura del barrio Belén y Libardo Alonso se contaba con taludes con los que fuera posible correlacionar directamente la densidad con los resultados arrojados en los ensayos de Refracción sísmica y MASW, como se muestra a continuación en la tabla 4.

Tabla 4. Resultados de los ensayos de densidad en los sectores de Libardo Alonso y Circunvalar

	Prof. (m)	Densidad			Densidad promedio (gr/cm³)	VP (m/s)	VS (m/s)
Circunvalar	0	1,824	1,817		1,821	567,62	197,74
	0,5	1,798	1,783		1,791	578,13	186,51
	2,6	1,813	1,802	1,807	1,807	638,70	191,02
	4,6	1,881	1,867	1,884	1,883	746,95	287,64
	6,6	1,948	1,938	1,935	1,940	967,94	320,67
Libardo Alonso	0	1,832	1,844	1,836	1,837	615,36	262,93
	1,1	1,827	1,832		1,830	802,53	262,93
	2,2	1,848	1,871	1,806	1,859	871,21	267,38
	4,2	1,880	1,877	1,877	1,878	994,44	283,98
	6,2	1,983	1,975	1,933	1,979	1.084,39	334,98

Nota: Fuente: Autores, 2017.

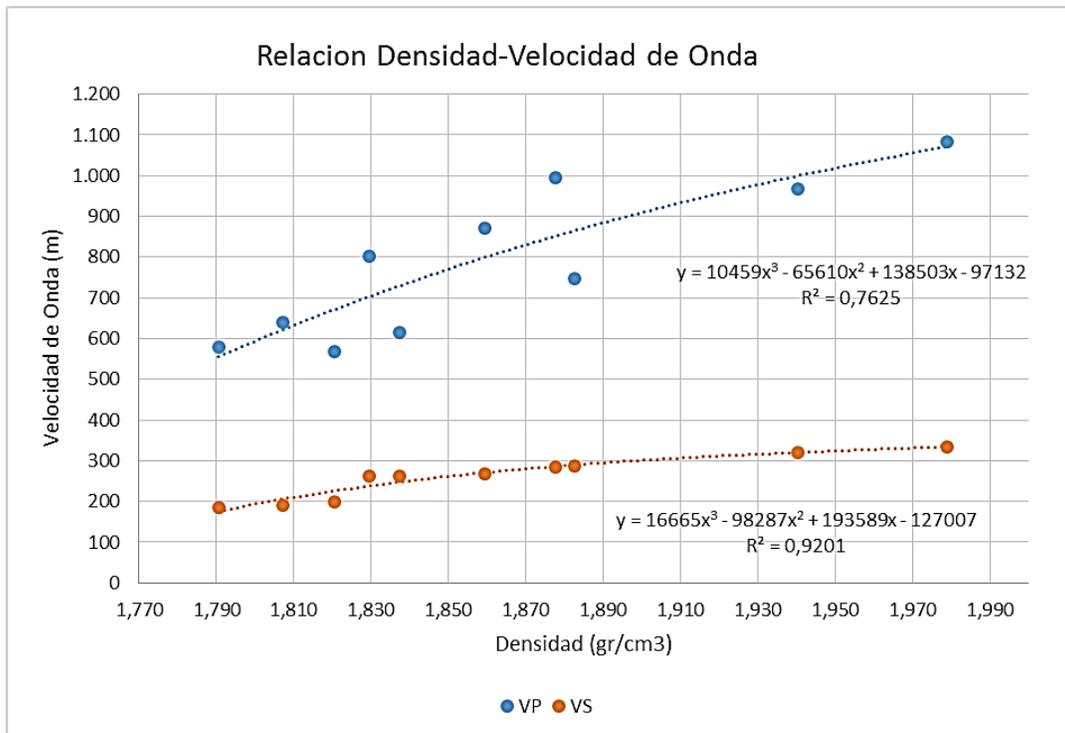


Figura 61. Relación densidad con velocidades de onda P y onda S

Fuente: Autores, 2017.

Como puede apreciarse en la figura 61, la correlación entre la velocidad de la onda S con respecto a la densidad, es la que mejor se ajusta, con un coeficiente de correlación de 0,9201, es decir tiene un porcentaje de error de más o menos el 8%, por lo cual se opta por trabajar con esta ecuación para el cálculo de las densidades a partir de la velocidad de onda S, adicionalmente se realiza el gráfico de esta ecuación junto con las formulas ya mencionadas, y en este caso para poder visualizar mejor la variación de la onda P y la Onda S simultáneamente con la densidad se grafica V_P/V_S con relación a la densidad en la figura 62.

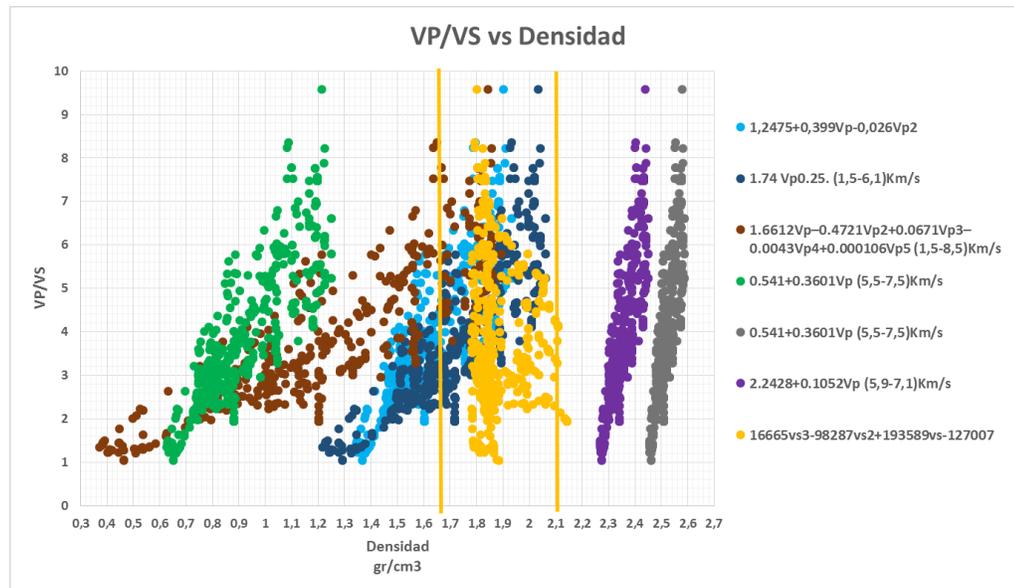


Figura 62. Grafica de la relación de V_P/V_S con respecto a la densidad

Fuente: Autores, 2017.

Los puntos en color amarillo corresponden a los datos obtenidos con el uso de la ecuación obtenida a partir de los ensayos realizados en la Circunvalar y Libardo Alonso, y la línea continua en el mismo color corresponde al dato más bajo y más alto respectivamente de ensayos adicionales que se realizaron en diferentes zonas de la formación algodonol, con el fin de establecer un rango de valores entre los cuales oscila la densidad para dicha formación. Un análisis estadístico de los datos obtenidos en los ensayos, se aprecia en las figuras 63 y 64, y en la tabla 5.

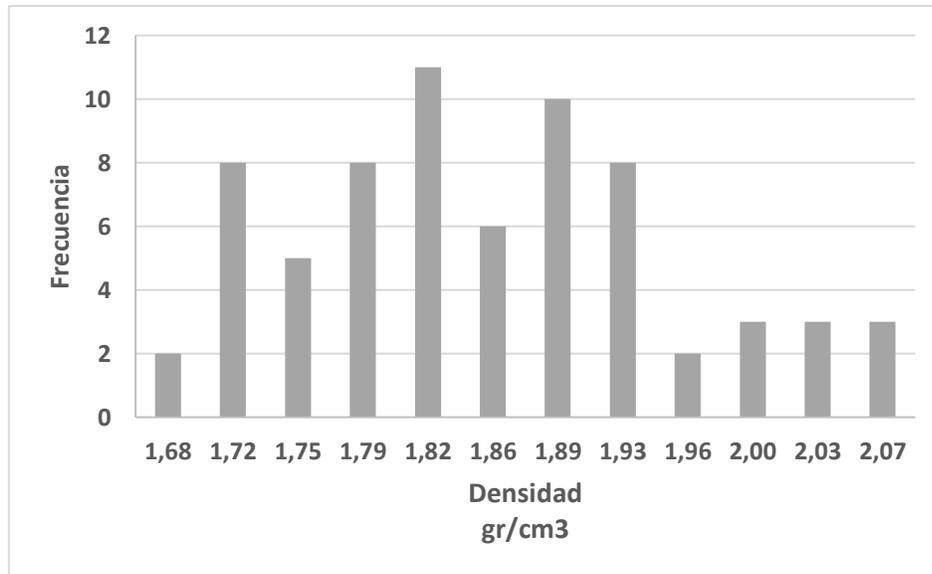


Figura 63. Histograma de los valores de densidad.

Fuente: Autores, 2017.

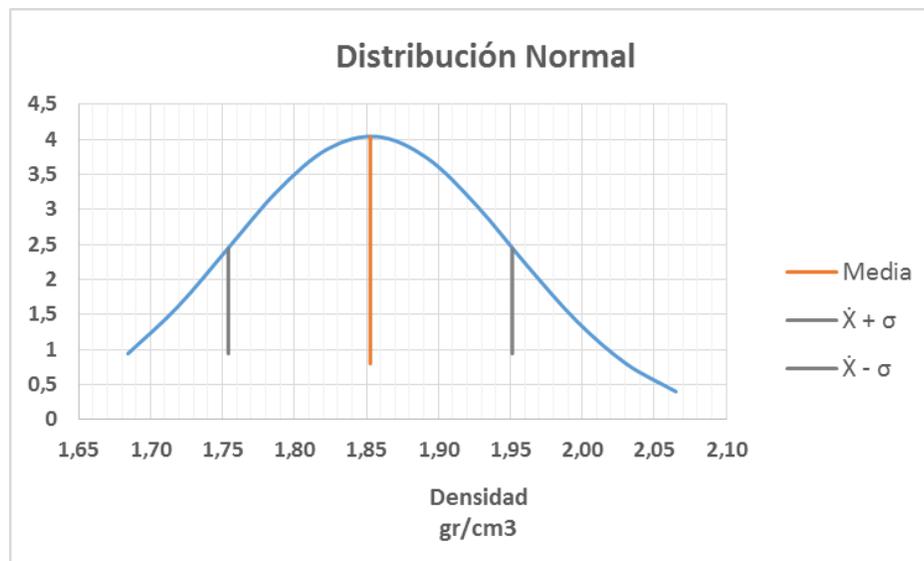


Figura 64. Distribución normal de los valores de densidad.

Fuente: Autores, 2017.

Tabla 5. Medidas estadísticas de los valores de densidad

<i>Resumen</i>	
Media	1,85275074
Error típico	0,01187273
Mediana	1,844
Moda	1,8227876
Desviación estándar	0,09862229
Varianza de la muestra	0,00972636
Curtosis	-0,49158942
Coefficiente de asimetría	0,34934076
Rango	0,41415033
Mínimo	1,66708123
Máximo	2,08123155
Suma	127,839801
Cuenta	69
Nivel de confianza (95,0%)	0,02369166

Fuente: Autores, 2017.

Con base al análisis de los datos es posible afirmar que el valor promedio de los datos es alrededor de $1,853 \text{ g/cm}^3$ con un margen de error de $0,023469 \text{ g/cm}^3$ con un nivel de confianza del 95%, adicionalmente la curva tiene un coeficiente de asimetría positivo de 0,35, que indica que hay una mayor cantidad de datos superiores a la media aritmética, sin embargo el coeficiente es relativamente bajo, (inferior a $\pm 0,5$) es decir que se puede considerar simétrica. Y coeficiente de curtosis es -0,492, que indica una distribución platicúrtica, aunque nuevamente el coeficiente es inferior a $\pm 0,5$, y puede considerarse como una distribución mesocúrtica. Ahora bien, con base en lo anterior, es posible afirmar que la distribución es de tipo normal, y por ende se puede asumir que cerca del 68,27% de los datos se encuentra entre $\bar{X} \pm \sigma$ es decir, entre $1,75$ y $1,95 \text{ gr/cm}^3$, asimismo, es posible afirmar que un 95,45% de los datos varía entre $\bar{X} \pm 2\sigma$ es decir entre $1,66$ y $2,05 \text{ gr/cm}^3$.

Este análisis nos lleva a plantear que la ecuación que arroja una mayor densidad de datos entre los rangos planteados anteriormente es la ecuación:

$$\rho = 16665 V_s^3 - 98287 V_s^2 + 193589 V_s - 127007$$

Que se determinó precisamente a partir de las muestras obtenidas en los sectores de la Circunvalar y Libardo Alonso.

Una vez establecido el valor de la densidad en términos de una variable ya conocida, es posible proceder al cálculo de las propiedades para cada lugar de estudio, como ya se mencionó cada línea tiene una extensión de 46 metros, y se tienen datos de la velocidad de onda P y de onda S a lo largo de estas líneas, y debido a que la visualización de estas tablas de datos sería muy extensa, se decidió seleccionar cuatro puntos representativos de cada línea en 0, 15, 30 y 44 metros y se realizó el cálculo de las propiedades dinámicas en cada uno de estos puntos como se muestra a en la tabla 6.

Tabla 6. Sector Anexos UFPS Ocaña.

Dist	Profundidad	VP (m/s)	VS (m/s)	Coefficiente de Poisson σ	Densidad del terreno ρ (Kg/m ³)	Módulo de Rigidez (G) kPa	Módulo de Young (E) kPa	Vp/vs
0,00	0,00	301,03	219,62	0,07	1,81610	109,71	204,28	1,37
0,00	1,00	358,14	219,62	0,20	1,81610	110,00	263,70	1,63
0,00	2,00	827,02	230,10	0,46	1,82340	123,36	359,72	3,59
0,00	3,00	1363,09	229,04	0,49	1,82270	125,18	371,90	5,95
0,00	4,00	1391,62	230,59	0,49	1,82380	127,04	377,52	6,04
0,00	5,00	1391,62	241,05	0,48	1,83170	138,83	412,18	5,77
0,00	6,00	1436,43	241,05	0,49	1,83170	139,10	413,27	5,96
0,00	7,00	1554,01	258,96	0,49	1,84710	161,36	479,47	6,00
0,00	8,00	1554,01	258,96	0,49	1,84710	161,36	479,47	6,00
0,00	9,00	1565,39	336,08	0,48	1,98250	271,92	802,63	4,66
0,00	10,00	1565,45	336,08	0,48	1,98250	271,93	802,64	4,66

Fuente: Autores, 2017.

En forma similar se realizó el cálculo para las diferentes zonas de estudio, en las distancias ya mencionadas, para un total de 44 puntos. Paso seguido, se comenzó a realizar el análisis estadístico de los datos para cada zona de estudio correspondiente a la muestra seleccionada, es decir, los sectores sur, sur-orientado y centro-occidente de la ciudad.

Inicialmente se realizó el análisis sobre el total de datos de cada zona, para los valores de Onda P y Onda S, obteniendo la distribución de frecuencia, medidas de posición y medidas de dispersión, mostrados en las figuras 65 a 76, y en las tablas 7 a 12.

Zona Sur:

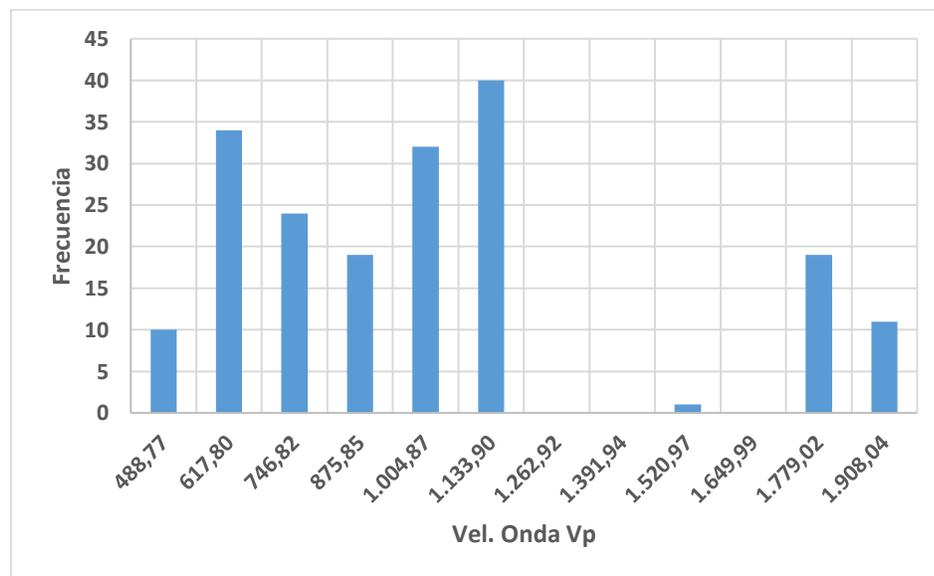


Figura 65. Histograma de los valores de velocidad de Onda P.

Fuente: Autores, 2017.

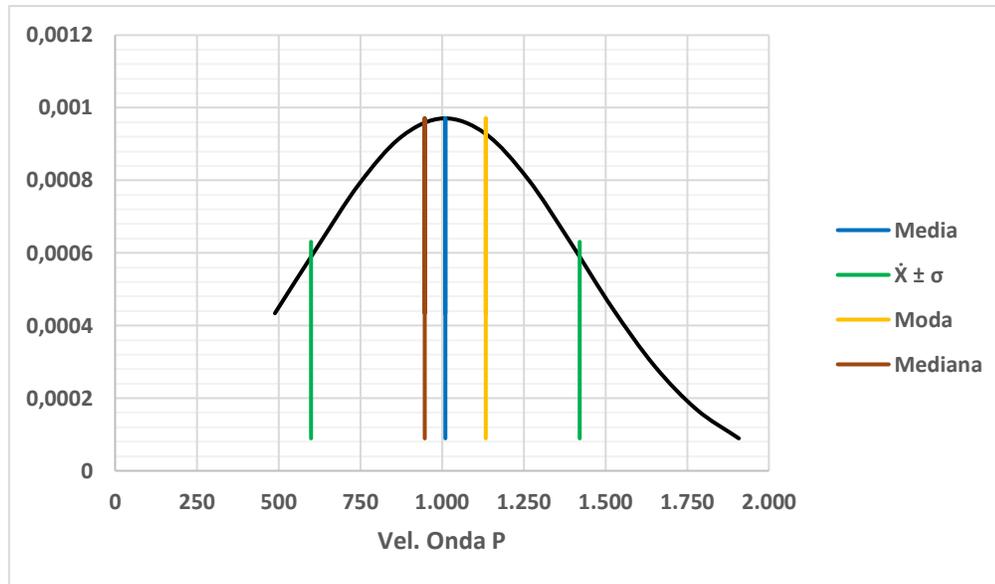


Figura 66. Distribución de los valores de velocidad de onda P.

Fuente: Autores, 2017.

Tabla 7. Medidas estadísticas de los valores de velocidad de onda P.

<i>Resumen Vp</i>	
Media	1010,30
Error típico	29,81
Mediana	947,23
Moda	1133,90
Desviación estándar	410,93
Varianza de la muestra	168865,60
Curtosis	0,22
Coefficiente de asimetría	1,07
Rango	1548,17
Mínimo	424,27
Máximo	1972,44
Suma	191957,04
Cuenta	190,00
Nivel de confianza (95,0%)	58,81

Fuente: Autores, 2017.

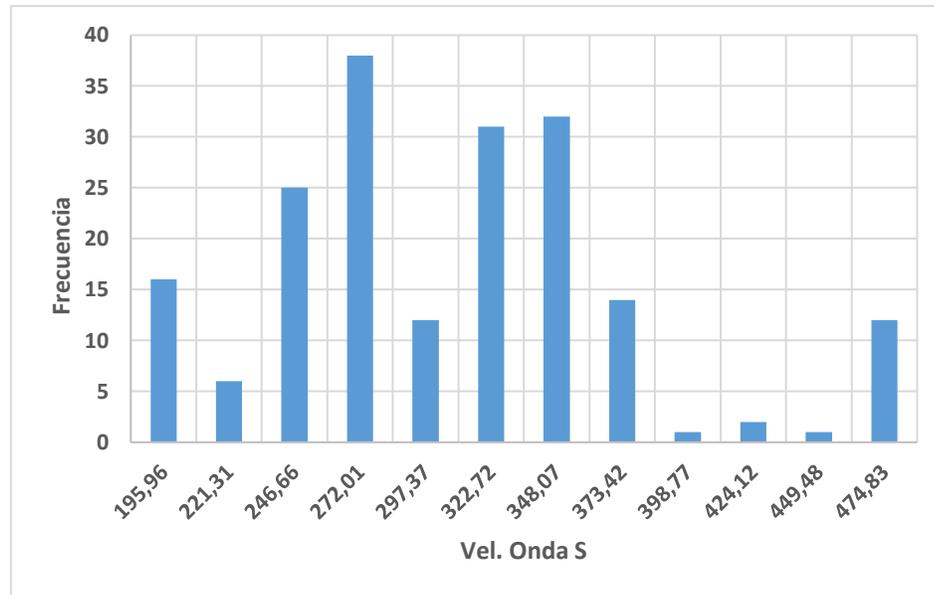


Figura 67. Histograma de los valores de velocidad de Onda S.

Fuente: Autores, 2017.

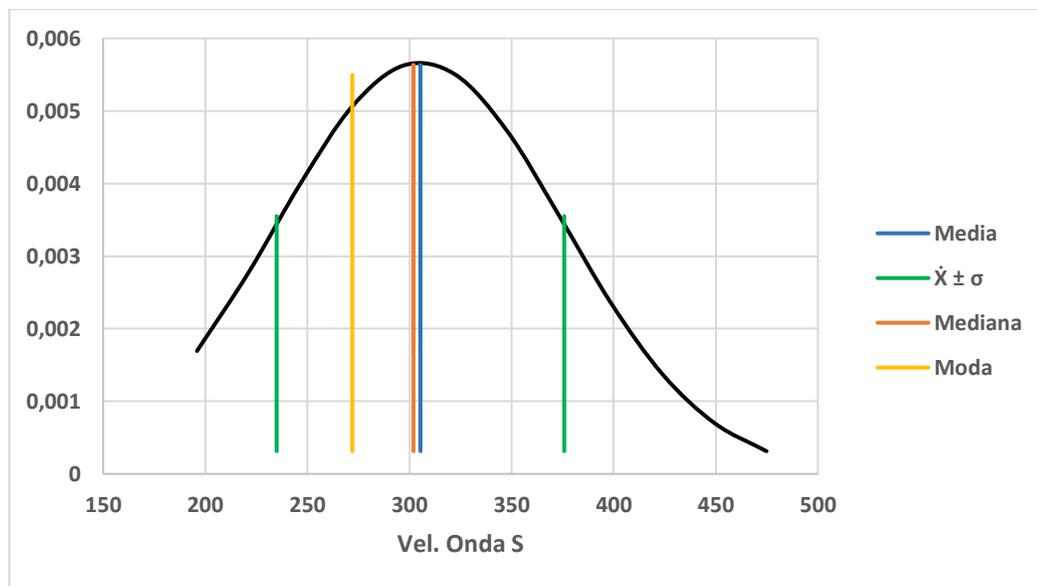


Figura 68. Distribución de los valores de velocidad de onda S.

Fuente: Autores, 2017.

Tabla 8. Medidas estadísticas de los valores velocidad de onda S.

<i>Resumen Vs</i>	
Media	305,38
Error típico	5,11
Mediana	301,99
Moda	272,01
Desviación estándar	70,41
Varianza de la muestra	4958,03
Curtosis	0,56
Coefficiente de asimetría	0,64
Rango	304,10
Mínimo	183,29
Máximo	487,39
Suma	58021,70
Cuenta	190,00
Nivel de confianza (95,0%)	10,077

Fuente: Autores, 2017.

Zona Sur-Oriente

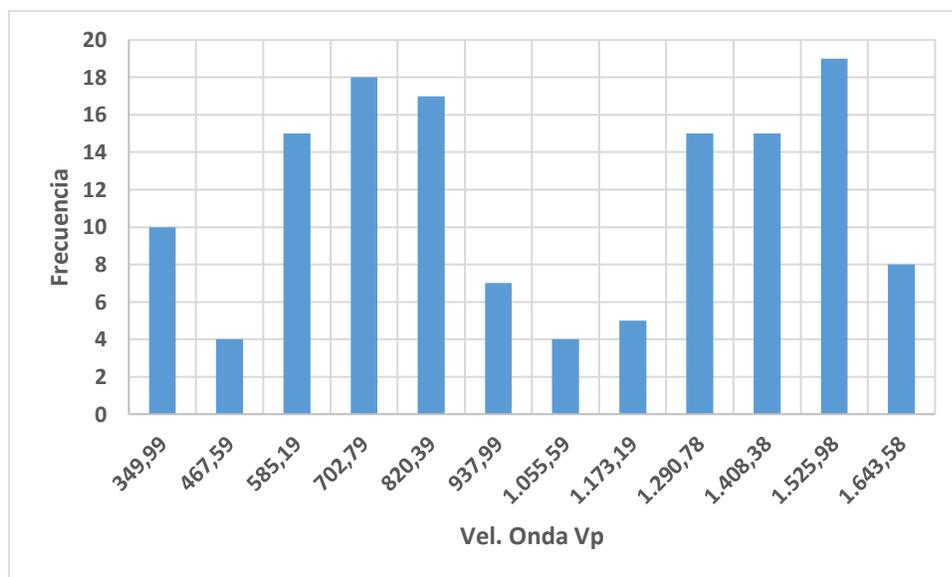


Figura 69. Histograma de los valores de velocidad de Onda P.

Fuente: Autores, 2017.

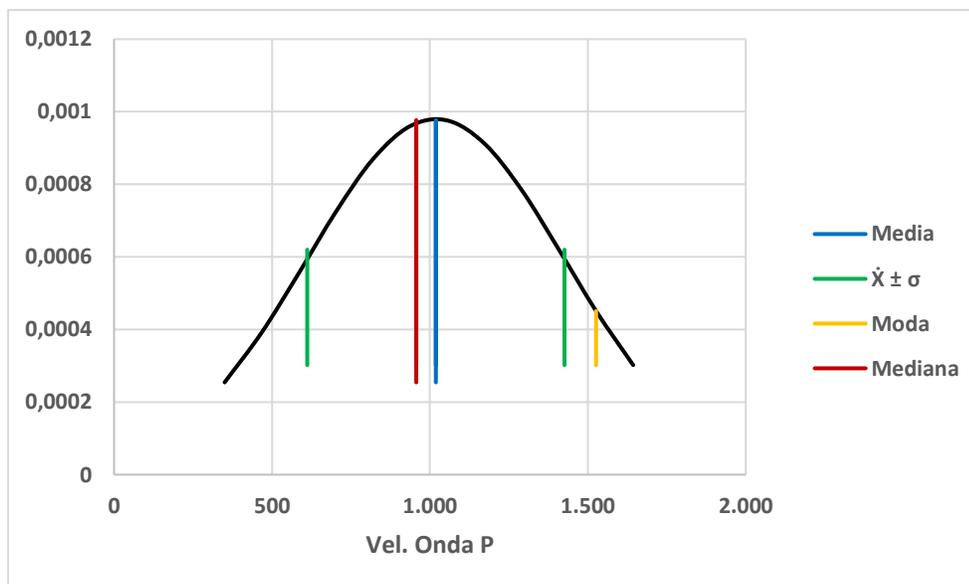


Figura 70. Distribución de los valores de velocidad de onda P.

Fuente: Autores, 2017.

Tabla 9. Distribución de los valores de velocidad de onda P.

<i>Resumen Vp</i>	
Media	1018,78
Error típico	34,79
Mediana	956,69
Moda	1525,98
Desviación estándar	407,18
Varianza de la muestra	165791,93
Curtosis	-1,31
Coficiente de asimetría	-0,03
Rango	1411,07
Mínimo	291,20
Máximo	1702,27
Suma	139572,94
Cuenta	137,00
Nivel de confianza (95,0%)	68,79

Fuente: Autores, 2017.

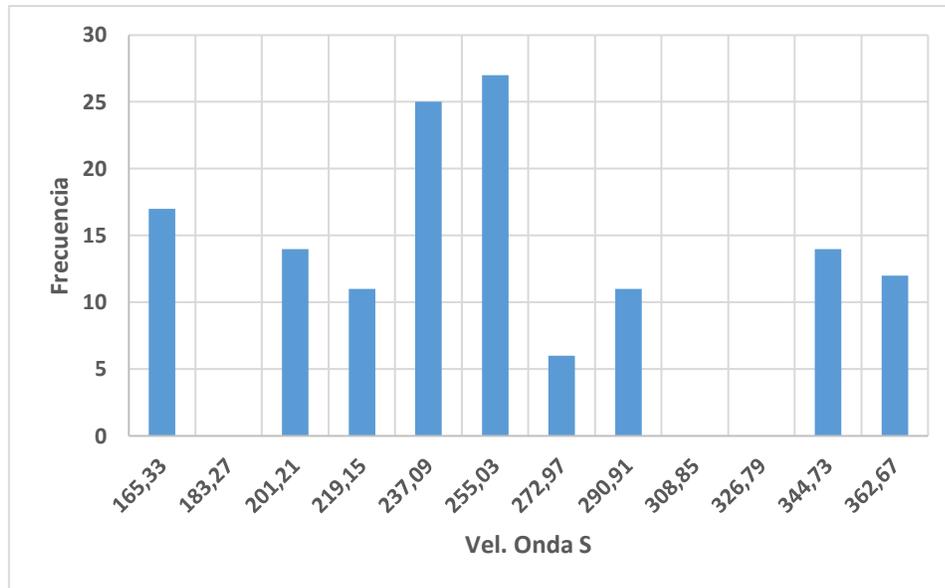


Figura 71. Histograma de los valores de velocidad de Onda S.

Fuente: Autores, 2017.

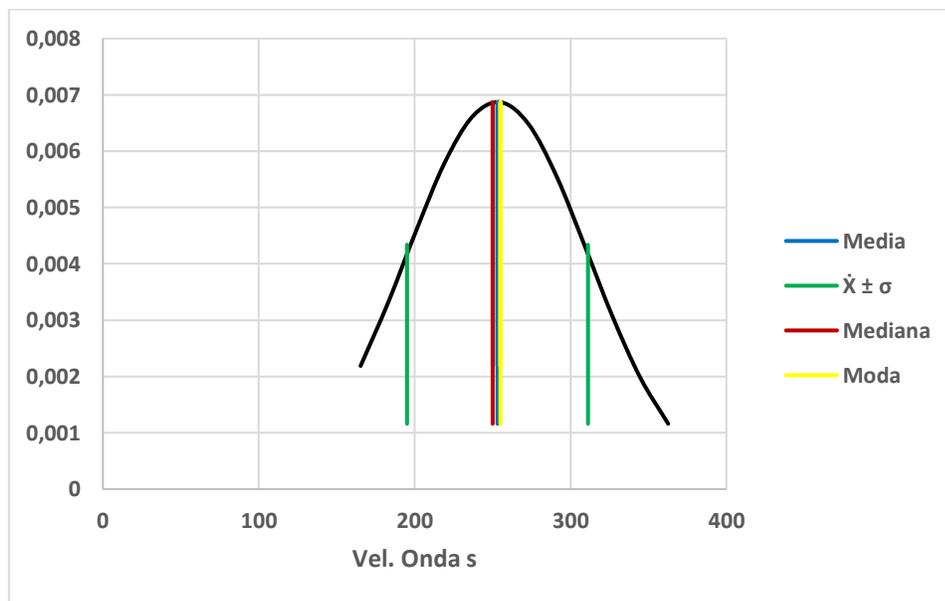


Figura 72. Distribución de los valores de velocidad de onda S.

Fuente: Autores, 2017.

Tabla 10. Medidas estadísticas de los valores velocidad de onda S.

<i>Resumen Vs</i>	
Media	253,17
Error típico	4,96
Mediana	250,07
Moda	255,03
Desviación estándar	58,05
Varianza de la muestra	3370,20
Curtosis	-0,53
Coefficiente de asimetría	0,39
Rango	215,16
Mínimo	156,36
Máximo	371,53
Suma	34684,53
Cuenta	137,00
Nivel de confianza (95,0%)	9,81

Fuente: Autores, 2017.

Zona Centro Occidente:

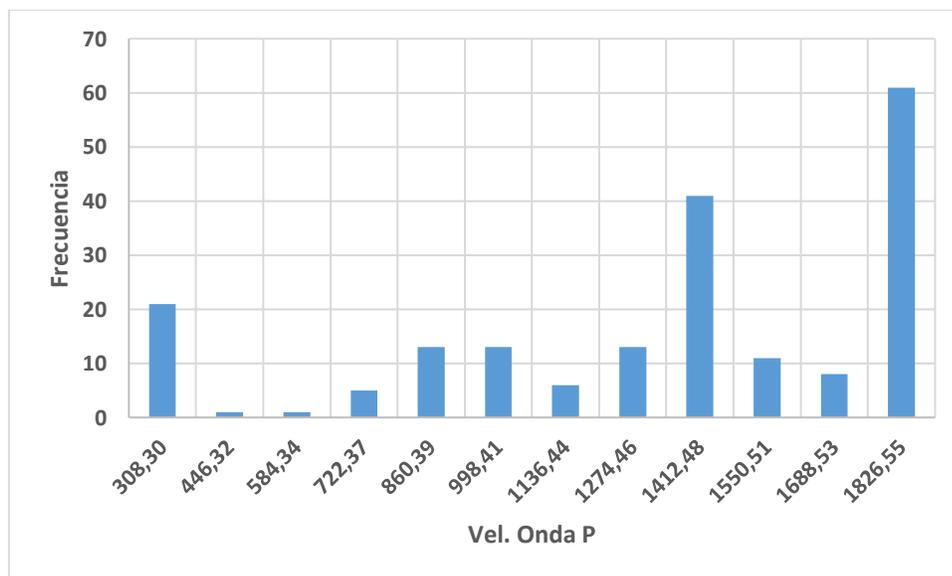


Figura 73. Histograma de los valores de velocidad de Onda P.

Fuente: Autores, 2017.

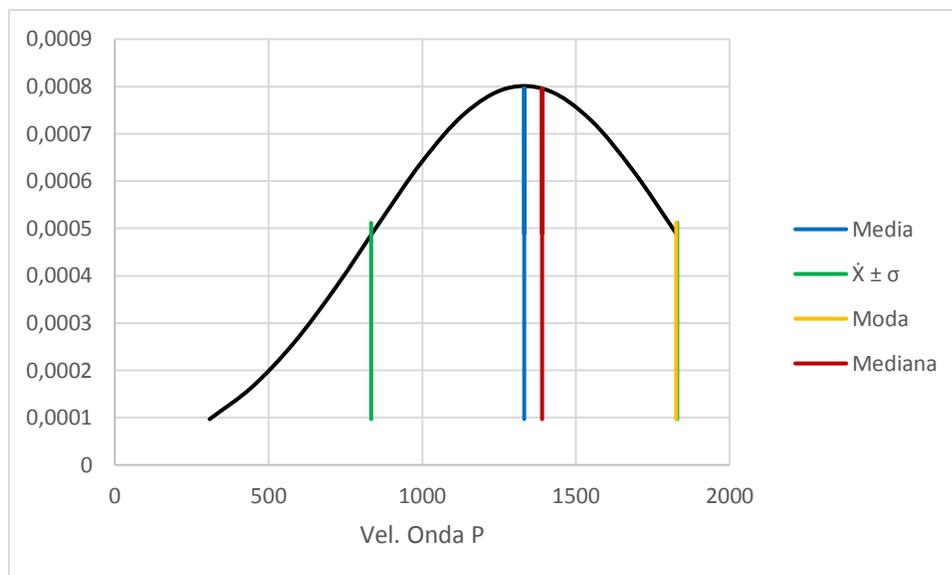


Figura 74. Distribución de los valores de velocidad de onda P.

Fuente: Autores, 2017.

Tabla 11. Medidas estadísticas de los valores velocidad de onda P.

<i>Resumen Vp</i>	
Media	1331,96
Error típico	35,75
Mediana	1390,10
Moda	1826,55
Desviación estándar	497,88
Varianza de la muestra	247888,19
Curtosis	-0,31
Coficiente de asimetría	-0,80
Rango	1656,16
Mínimo	239,29
Máximo	1895,45
Suma	258399,73
Cuenta	194,00
Nivel de confianza (95,0%)	70,50

Fuente: Autores, 2017.

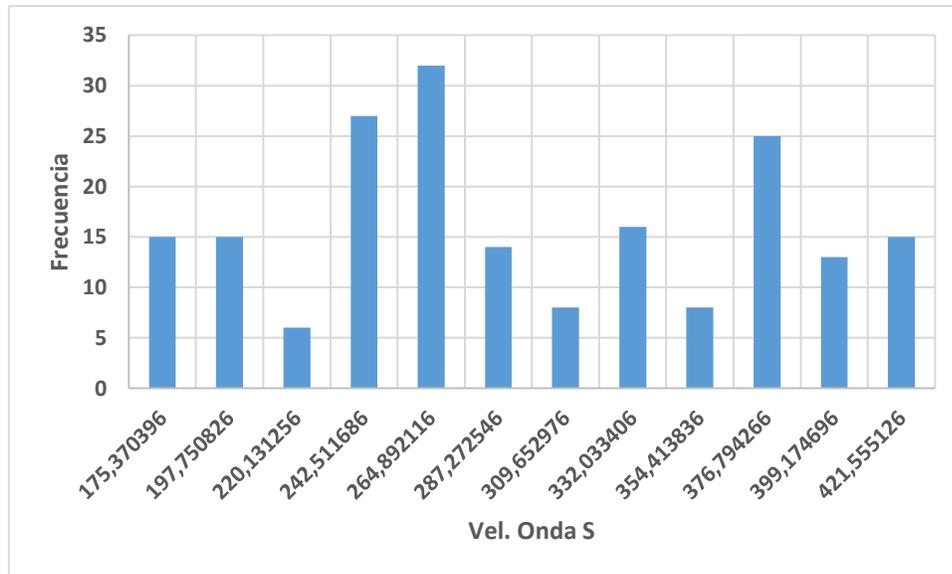


Figura 75. Histograma de los valores de velocidad de Onda S.

Fuente: Autores, 2017.

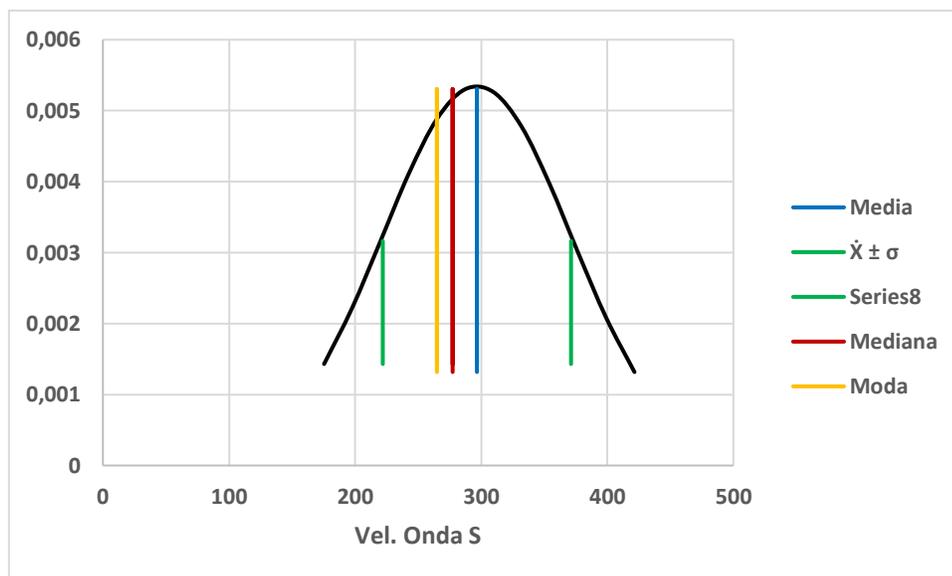


Figura 76. Distribución de los valores de velocidad de onda S.

Fuente: Autores, 2017.

Tabla 12. Medidas estadísticas de los valores velocidad de onda S.

<i>Resumen Vs</i>	
Media	296,60
Error típico	5,36
Mediana	277,34
Moda	264,89
Desviación estándar	74,66
Varianza de la muestra	5574,68
Curtosis	-1,17
Coefficiente de asimetría	0,12
Rango	268,45
Mínimo	164,19
Máximo	432,63
Suma	57540,04
Cuenta	194,00
Nivel de confianza (95,0%)	10,57

Fuente: Autores, 2017.

Tras un análisis de las medidas de dispersión, se concluyó que los datos poseen una gran desviación, razón por la cual, se optó por separar los datos con base al tipo de material, es decir, para cada zona subdividir los datos según algún parámetro, y cuando se hace mención al tipo de material, se habla acerca de las dos capas que suelen identificarse en la formación algodonada, una primera capa de un conglomerado, compuesto por arenas finas y gravas principalmente, y una segunda capa con una densidad mayor, identificada como una arcillolita consolidada, con alto contenido de limos y arcillas. Establecida esta diferencia, y sabiendo que la segunda capa posee una gran capacidad portante, y además que el conglomerado según sea el caso, puede encontrarse en los primeros metros de profundidad, se estableció un valor de 950 m/s con base en los valores típicos de valores de velocidad para distintos materiales establecidos por Greenhouse, PHEME, Coulter, & Yarie en 1998, para diferenciar estas capas, es decir, una velocidad de onda P por debajo de este valor,

representa a la primera capa de la formación, y valores superiores a este corresponden a la arcillolita comúnmente llamada Pan de Jabón.

Con base en lo anterior, se realizó nuevamente el análisis estadístico de las variables V_p y V_s , adicionalmente se incluye el análisis para los parámetros dinámicos, G , E , σ , para cada zona de estudio.

Zona Sur:

MATERIAL CONGLOMERATICO

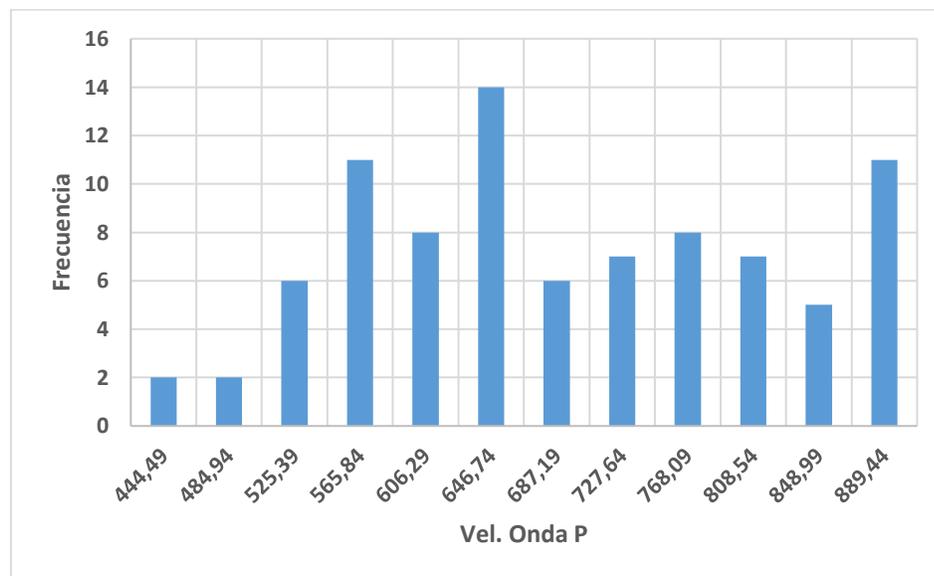


Figura 77. Histograma de los valores de velocidad de Onda P.

Fuente: Autores, 2017.

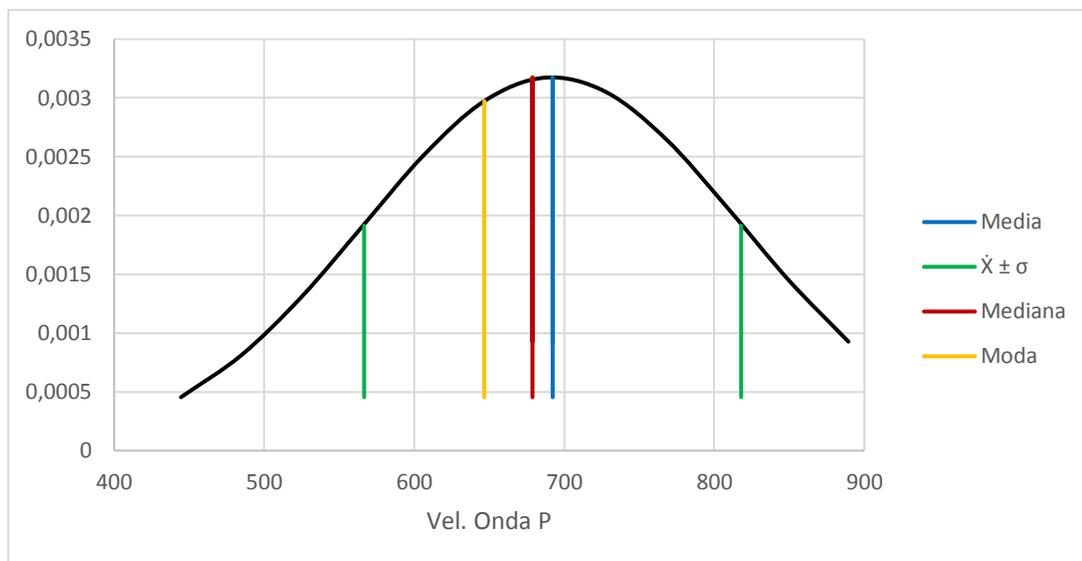


Figura 78. Distribución de los valores de velocidad de onda S.

Fuente: Autores, 2017.

Tabla 13. Medidas estadísticas de los valores de velocidad de onda P.

<i>Resumen Vp</i>	
Media	692,28
Error típico	13,47
Mediana	678,81
Moda	646,74
Desviación estándar	125,65
Varianza de la muestra	15787,91
Curtosis	-0,91
Coefficiente de asimetría	0,07
Rango	485,28
Mínimo	424,27
Máximo	909,55
Suma	60228,17
Cuenta	87,00
Nivel de confianza (95,0%)	26,78

Fuente: Autores, 2017.

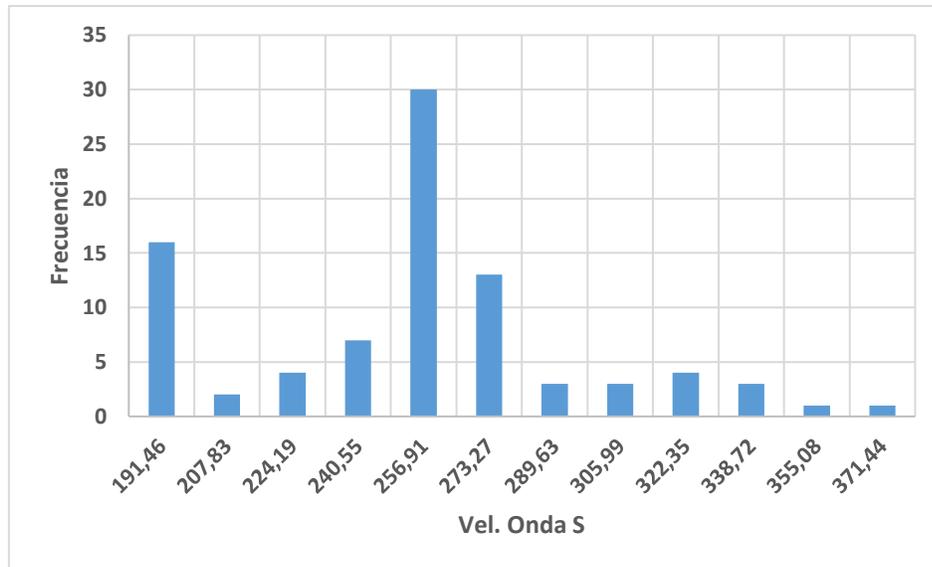


Figura 79. Histograma de los valores de velocidad de Onda S.

Fuente: Autores, 2017.

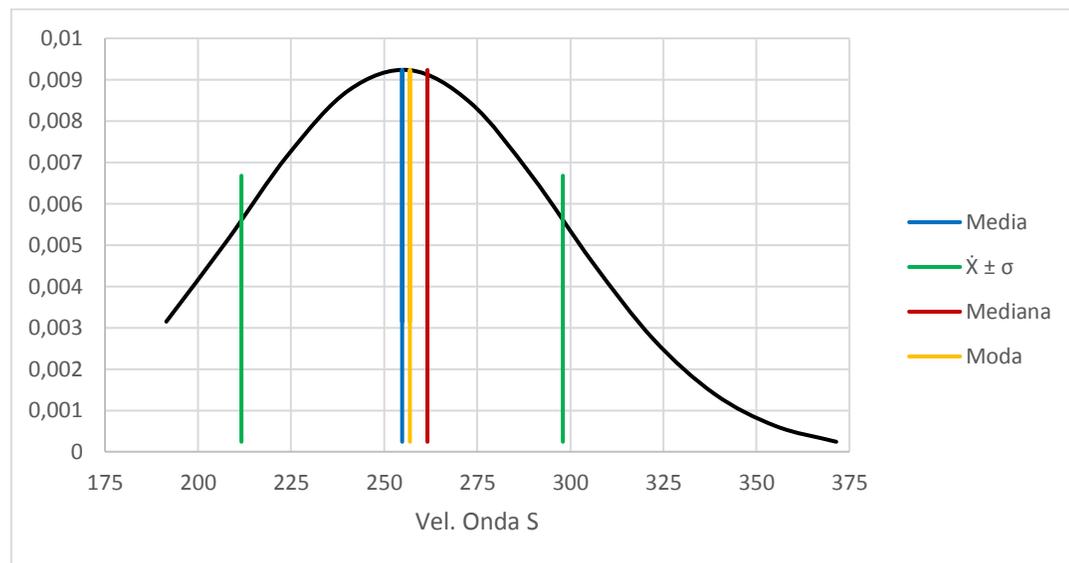


Figura 80. Distribución de los valores de velocidad de onda S.

Fuente: Autores, 2017.

Tabla 14. Medidas estadísticas de los valores de velocidad de onda S.

<i>resumen Vs</i>	
Media	254,83
Error típico	4,63
Mediana	261,61
Moda	256,91
Desviación estándar	43,17
Varianza de la muestra	1864,04
Curtosis	0,10
Coefficiente de asimetría	0,21
Rango	196,22
Mínimo	183,29
Máximo	379,50
Suma	22169,93
Cuenta	87,00
Nivel de confianza (95,0%)	9,20

Fuente: Autores, 2017.

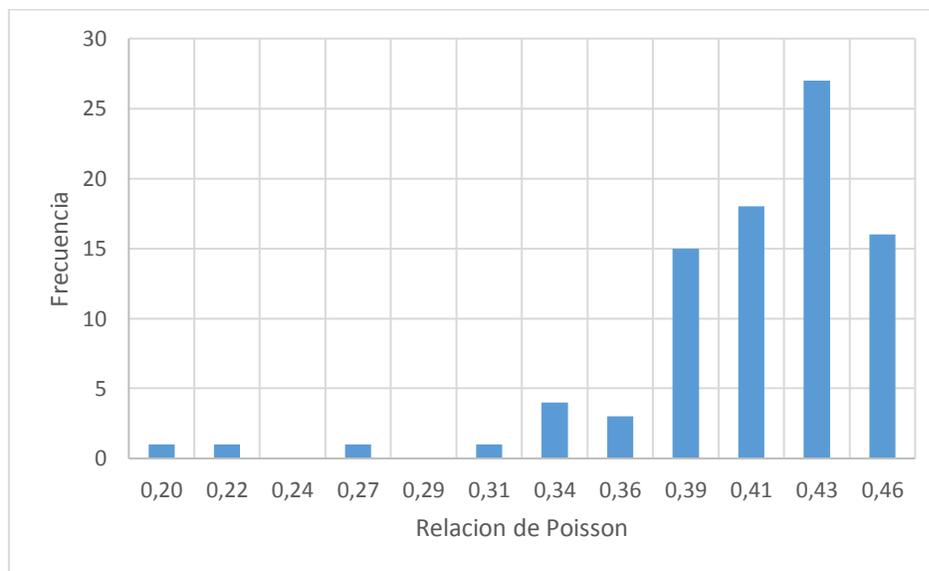


Figura 81. Histograma de los valores de coeficiente de Poisson.

Fuente: Autores, 2017.

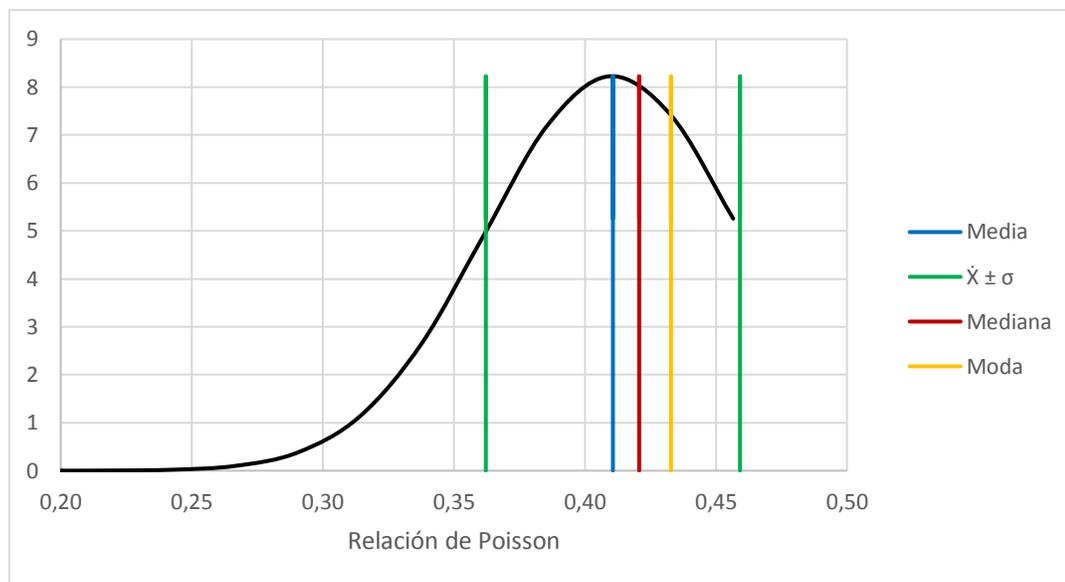


Figura 82. Distribución de los valores de coeficiente de Poisson.

Fuente: Autores, 2017.

Tabla 15. Medidas estadísticas de los valores de coeficiente de Poisson.

<i>Resumen σ</i>	
Media	0,41
Error típico	0,01
Mediana	0,42
Moda	0,43
Desviación estándar	0,05
Varianza de la muestra	0,00
Curtosis	7,28
Coefficiente de asimetría	-2,28
Rango	0,28
Mínimo	0,18
Máximo	0,47
Suma	35,73
Cuenta	87,00
Nivel de confianza (95,0%)	0,01

Fuente: Autores, 2017.

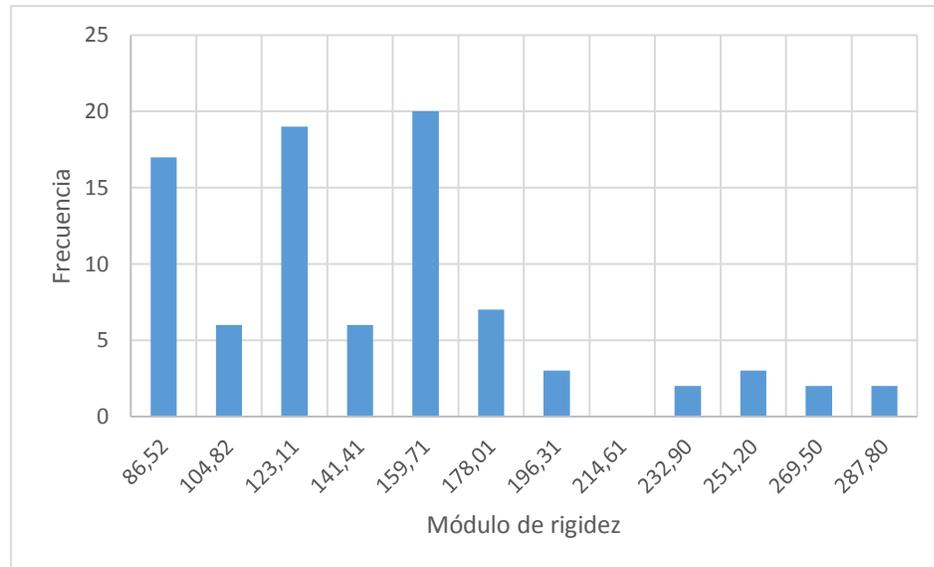


Figura 83. Histograma de los valores de módulo de rigidez.

Fuente: Autores, 2017.

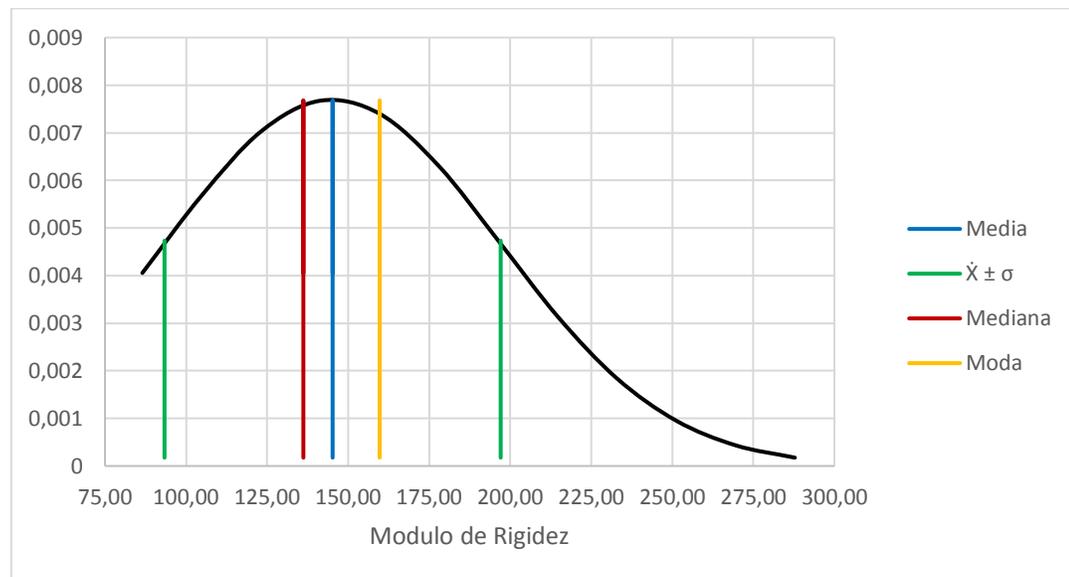


Figura 84. Distribución de los valores de módulo de rigidez.

Fuente: Autores, 2017.

Tabla 16. Medidas estadísticas de los valores de módulo de rigidez.

<i>Resumen G</i>	
Media	145,20
Error típico	5,56
Mediana	136,18
Moda	159,71
Desviación estándar	51,85
Varianza de la muestra	2688,79
Curtosis	0,62
Coefficiente de asimetría	0,93
Rango	219,58
Mínimo	77,37
Máximo	296,95
Suma	12632,79
Cuenta	87,00
Nivel de confianza (95,0%)	11,05

Fuente: Autores, 2017.

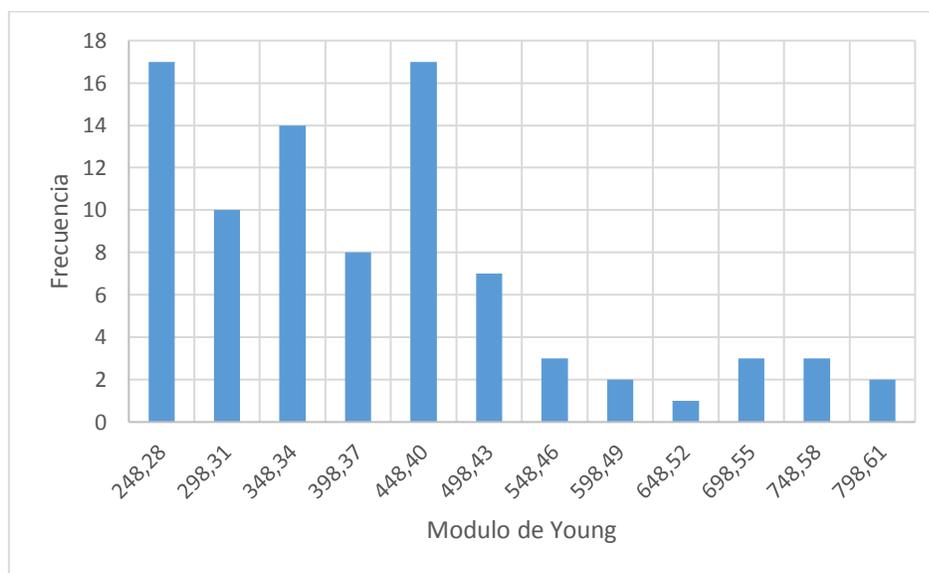


Figura 85. Histograma de los valores de módulo de Young.

Fuente: Autores, 2017.

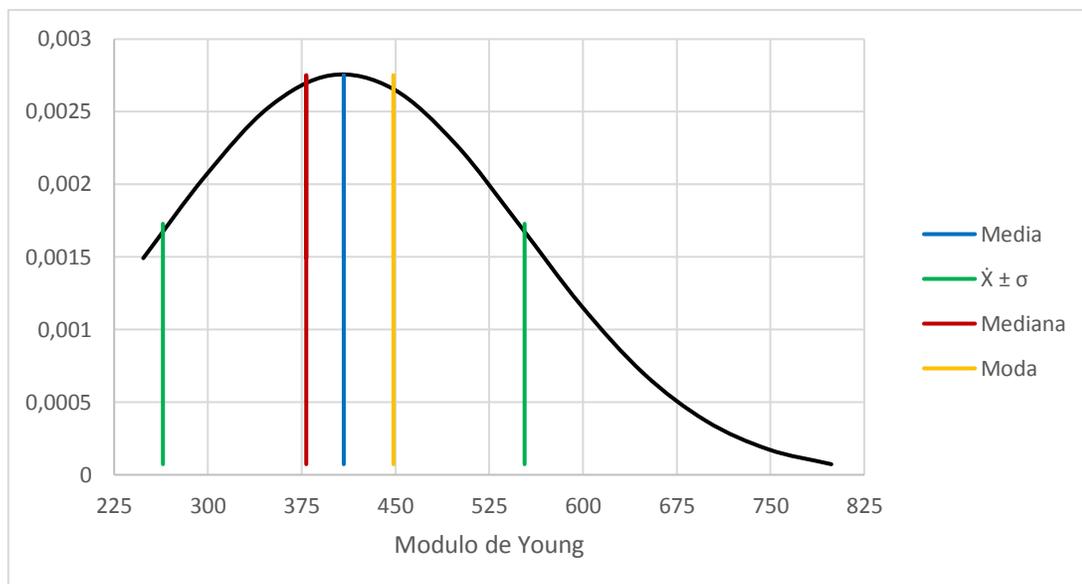


Figura 86. Distribución de los valores de módulo Young.

Fuente: Autores, 2017.

Tabla 17. Medidas estadísticas de los valores de módulo de Young.

<i>Resumen E</i>	
Media	408,65
Error típico	15,51
Mediana	378,67
Moda	448,70
Desviación estándar	144,65
Varianza de la muestra	20922,22
Curtosis	0,57
Coefficiente de asimetría	0,97
Rango	600,35
Mínimo	223,27
Máximo	823,62
Suma	35552,83
Cuenta	87,00
Nivel de confianza (95,0%)	30,83

Fuente: Autores, 2017.

ARCILLOLITAS

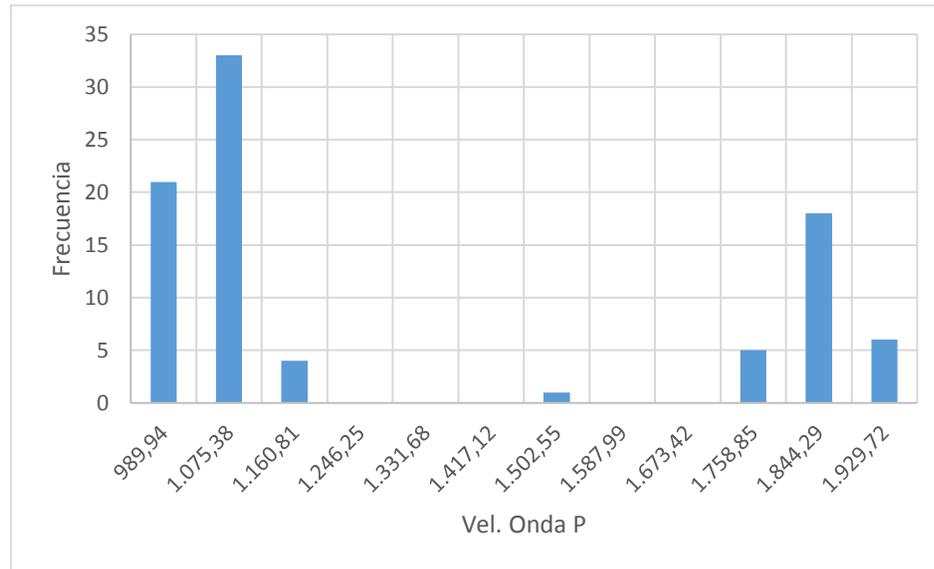


Figura 87. Histograma de los valores de velocidad de Onda P.

Fuente: Autores, 2017.

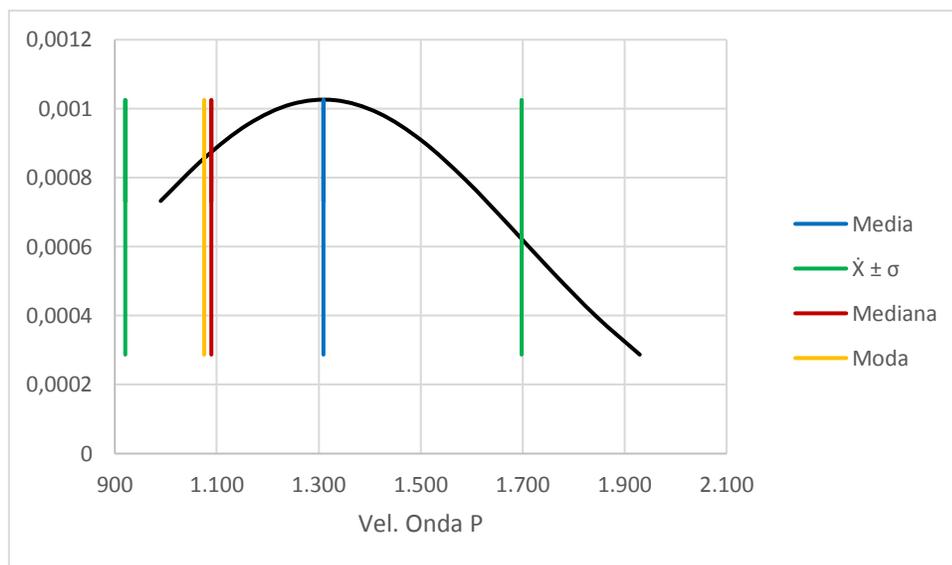


Figura 88. Distribución de los valores de velocidad de onda P.

Fuente: Autores, 2017.

Tabla 18. Medidas estadísticas de los valores de velocidad de onda P.

<i>Resumen Vp</i>	
Media	1309,22
Error típico	41,44
Mediana	1089,39
Moda	1075,39
Desviación estándar	388,71
Varianza de la muestra	151093,38
Curtosis	-1,41
Coefficiente de asimetría	0,67
Rango	1025,21
Mínimo	947,23
Máximo	1972,44
Suma	115211,14
Cuenta	88,00
Nivel de confianza (95,0%)	82,36

Fuente: Autores, 2017.

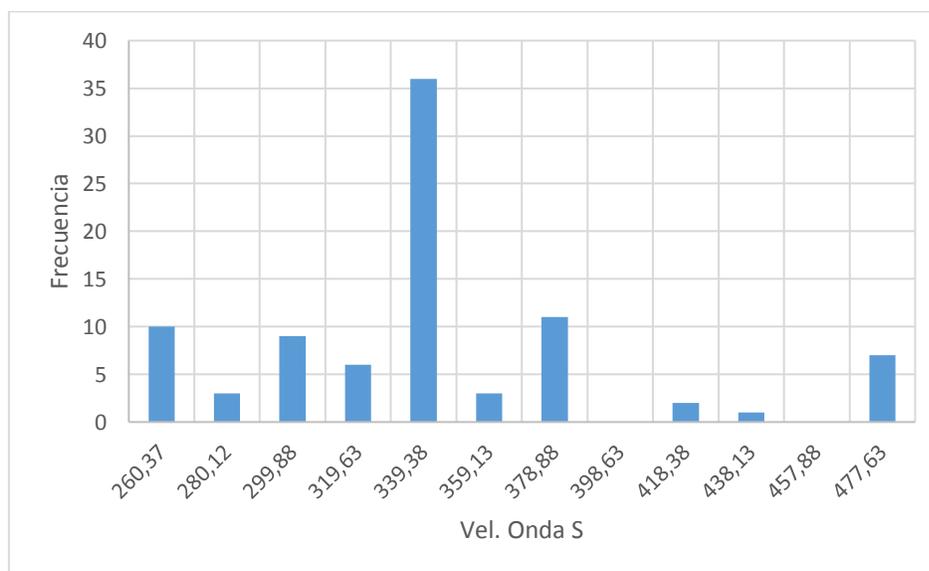


Figura 89. Histograma de los valores de velocidad de Onda S.

Fuente: Autores, 2017.

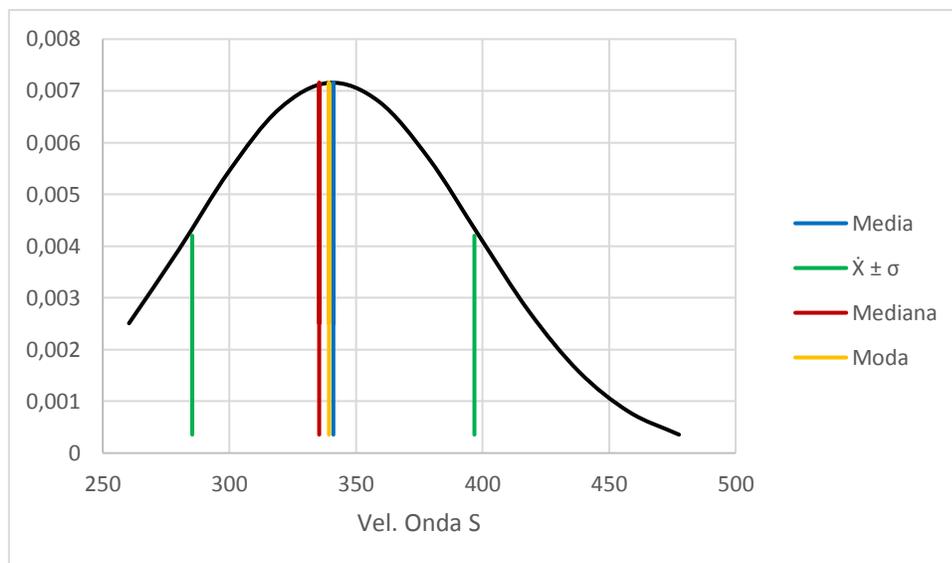


Figura 90. Distribución de los valores de velocidad de onda S.

Fuente: Autores, 2017.

Tabla 19. Medidas estadísticas de los valores de velocidad de onda S.

<i>Resumen Vs</i>	
Media	341,10
Error típico	5,94
Mediana	335,50
Moda	339,38
Desviación estándar	55,73
Varianza de la muestra	3105,64
Curtosis	1,24
Coefficiente de asimetría	0,98
Rango	236,89
Mínimo	250,50
Máximo	487,39
Suma	30016,36
Cuenta	88,00
Nivel de confianza (95,0%)	11,81

Fuente: Autores, 2017.

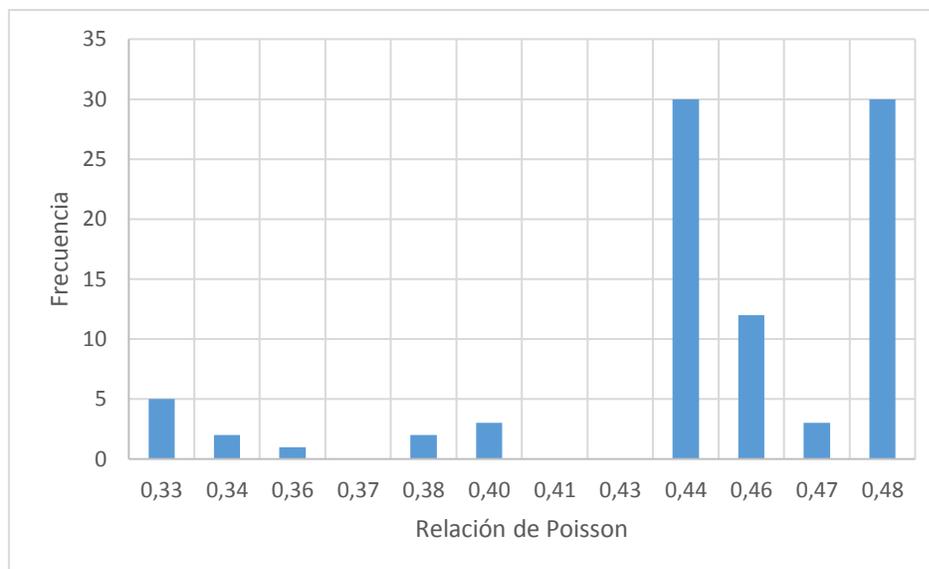


Figura 91. Histograma de los valores de coeficiente de Poisson.

Fuente: Autores, 2017.

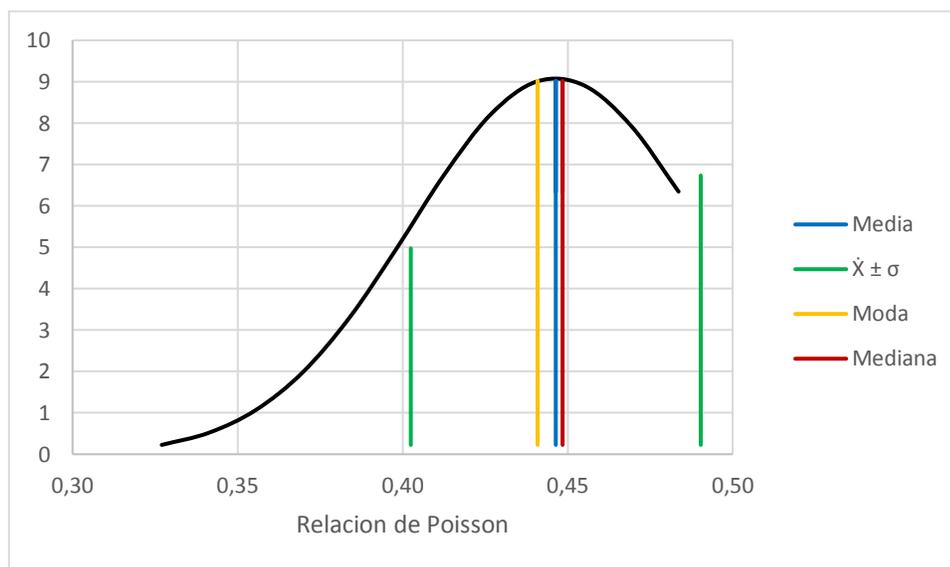


Figura 92. Distribución de los valores de coeficiente de Poisson.

Fuente: Autores, 2017.

Tabla 20. Medidas estadísticas de los valores de coeficiente de Poisson.

<i>Resumen σ</i>	
Media	0,45
Error típico	0,00
Mediana	0,45
Moda	0,44
Desviación estándar	0,04
Varianza de la muestra	0,00
Curtosis	2,33
Coefficiente de asimetría	-1,65
Rango	0,17
Mínimo	0,32
Máximo	0,49
Suma	39,28
Cuenta	88,00
Nivel de confianza (95,0%)	0,01

Fuente: Autores, 2017.

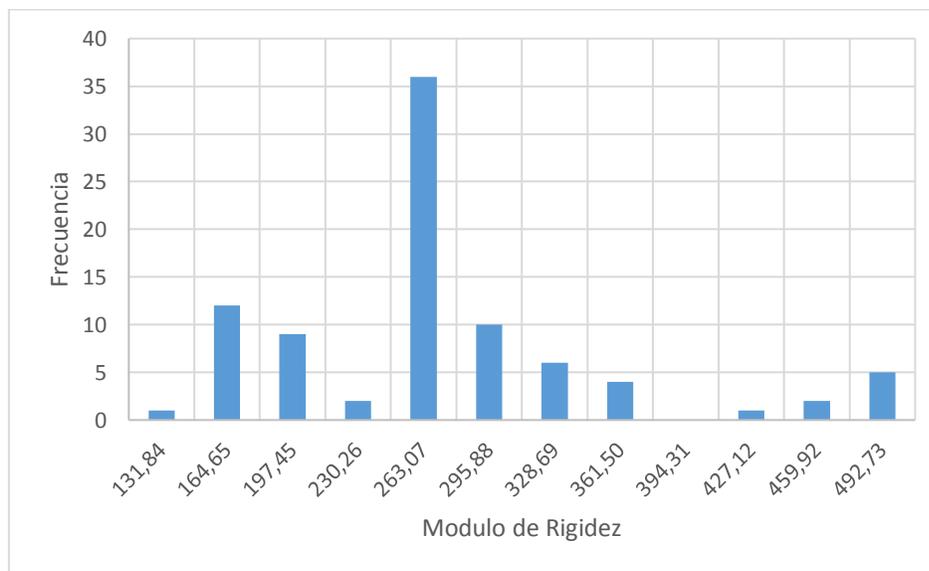


Figura 93. Histograma de los valores de módulo de rigidez.

Fuente: Autores, 2017.

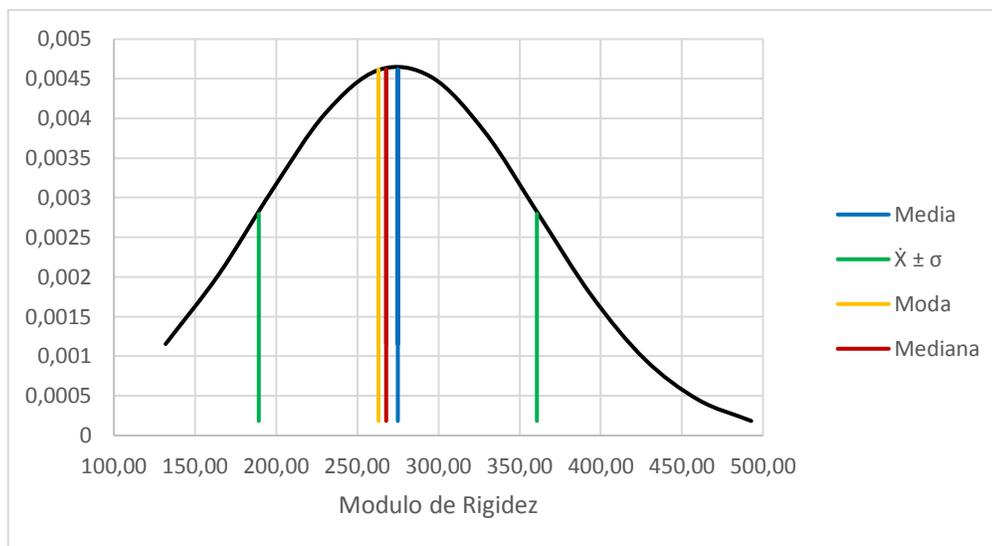


Figura 94. Distribución de los valores de módulo de rigidez.

Fuente: Autores, 2017.

Tabla 21. Medidas estadísticas de los valores de módulo de rigidez.

<i>Resumen G</i>	
Media	274,96
Error típico	9,13
Mediana	267,78
Moda	263,07
Desviación estándar	85,69
Varianza de la muestra	7342,97
Curtosis	1,48
Coefficiente de asimetría	1,09
Rango	393,70
Mínimo	115,43
Máximo	509,14
Suma	24196,57
Cuenta	88,00
Nivel de confianza (95,0%)	18,16

Fuente: Autores, 2017.

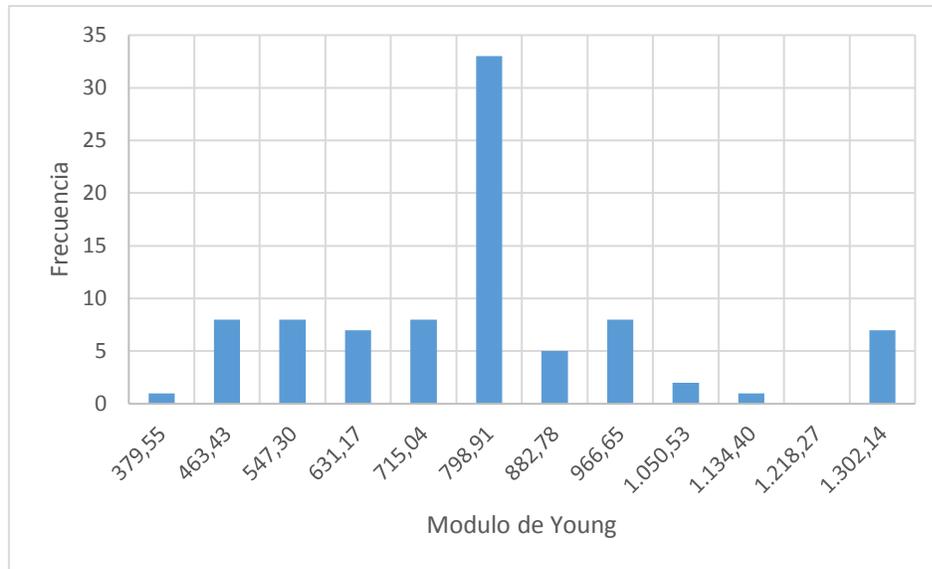


Figura 95. Histograma de los valores de módulo de Young.

Fuente: Autores, 2017.

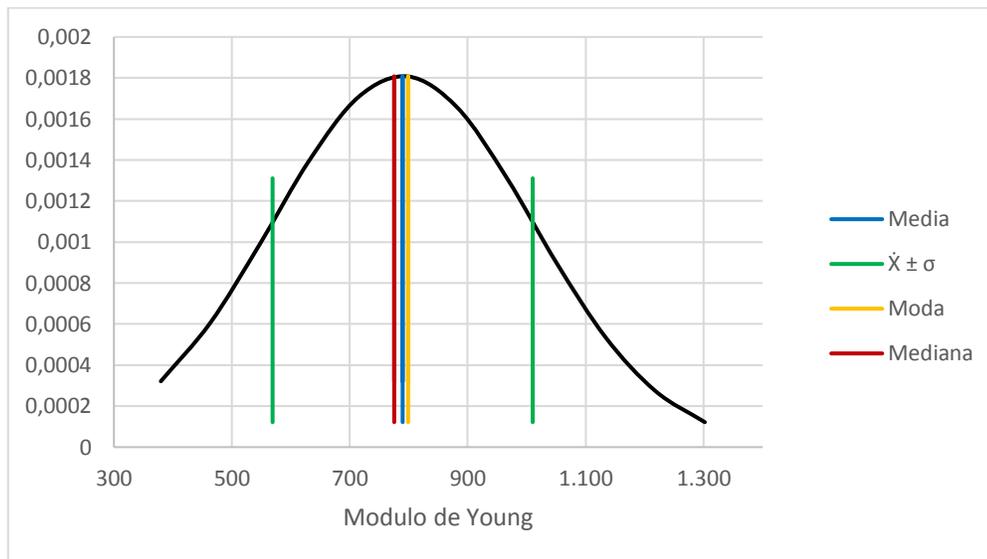


Figura 96. Distribución de los valores de módulo de Young.

Fuente: Autores, 2017.

Tabla 22. Medidas estadísticas de los valores de módulo de Young.

<i>Resumen E</i>	
Media	789,64
Error típico	23,51
Mediana	775,36
Moda	798,91
Desviación estándar	220,57
Varianza de la muestra	48650,14
Curtosis	0,66
Coefficiente de asimetría	0,72
Rango	1006,46
Mínimo	337,62
Máximo	1344,07
Suma	69488,41
Cuenta	88,00
Nivel de confianza (95,0%)	46,73

Fuente: Autores, 2017.

El análisis estadístico correspondiente a las zonas sur-oriente y centro-occidente se encuentra detallado en el apéndice F.

Una vez calculados los parámetros para cada zona, y realizado el análisis estadístico de cada parámetro, se procedió a establecer si existía algún tipo de relación entre estos, a fin de estimar algún tipo de correlación para determinar el valor de cada variable a partir de algún dato conocido, como por ejemplo la densidad o la velocidad de onda S, con la consideración de que son correlaciones obtenidas de un análisis estadístico que no abarca toda la formación algodonol, pero puede considerarse como un indicativo de la tendencia, o el comportamiento de estos parámetros en la Formación Algodonal. En las figuras 97 a 152 se muestran las diferentes correlaciones analizadas.

Zona Sur:

Material conglomeratico

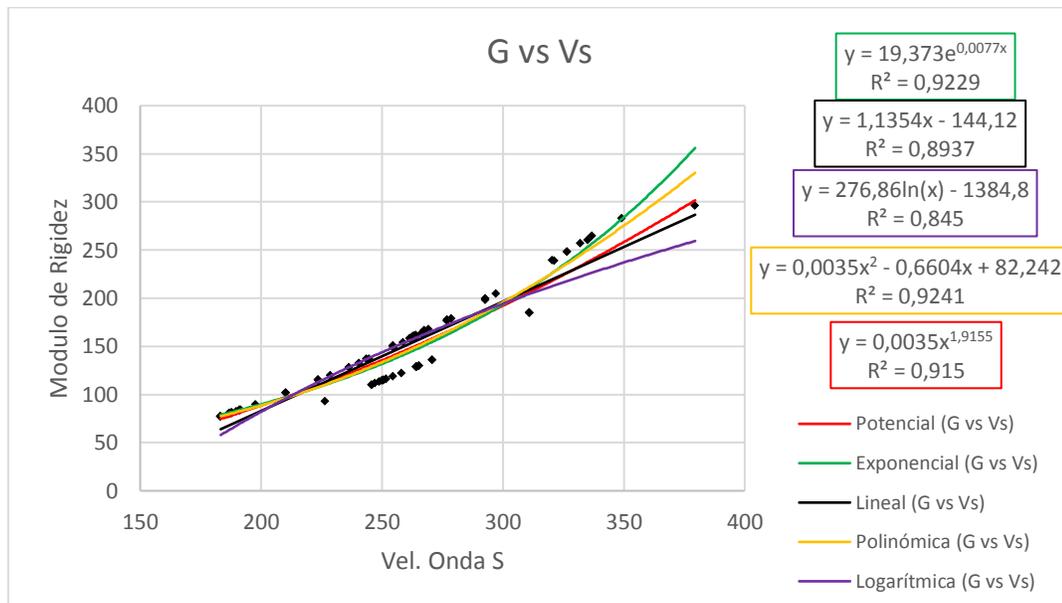


Figura 97. Curvas de correlación entre el módulo de rigidez y la velocidad de onda S.

Fuente: Autores, 2017.

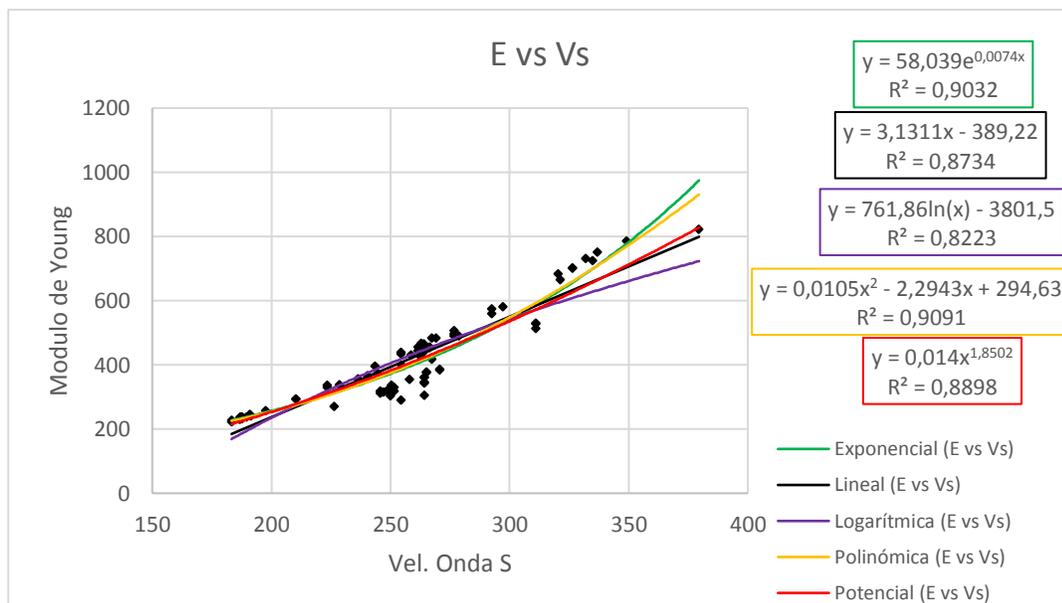


Figura 98. Curvas de correlación entre el módulo de Young y la velocidad de onda S.

Fuente: Autores, 2017.

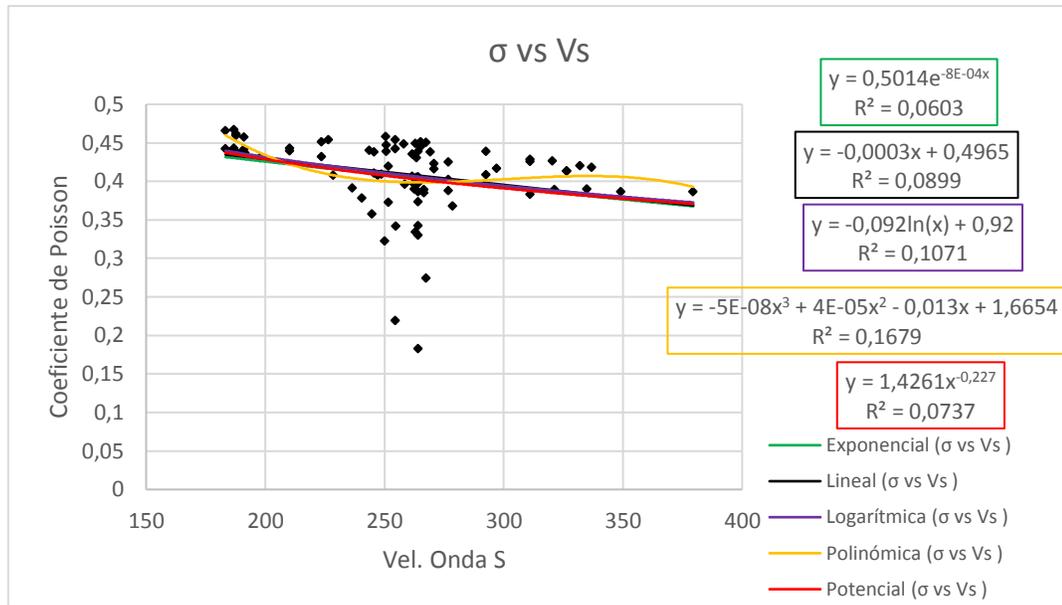


Figura 99. Curvas de correlación entre el coeficiente de Poisson y la velocidad de onda S.

Fuente: Autores, 2017.

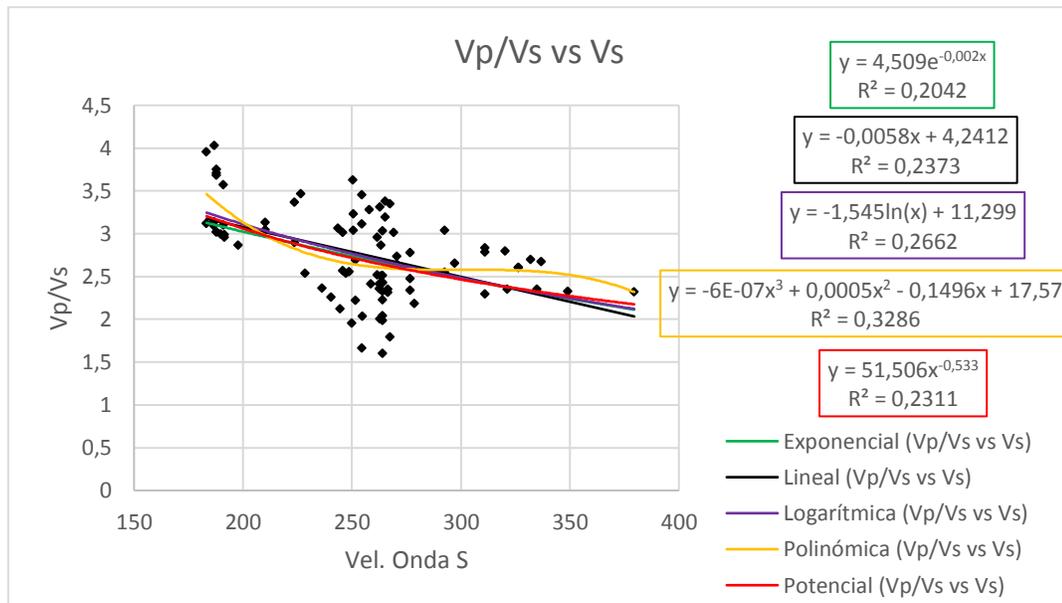


Figura 100. Curvas de correlación entre Vp/Vs y la velocidad de onda S.

Fuente: Autores, 2017.

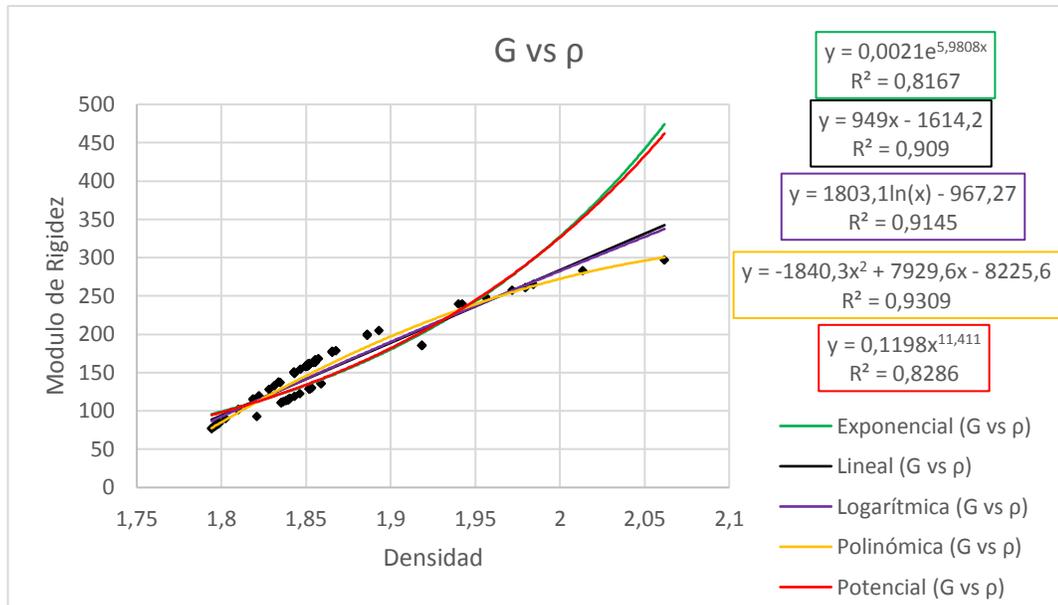


Figura 101. Curvas de correlación entre el módulo de rigidez y la densidad.

Fuente: Autores, 2017.

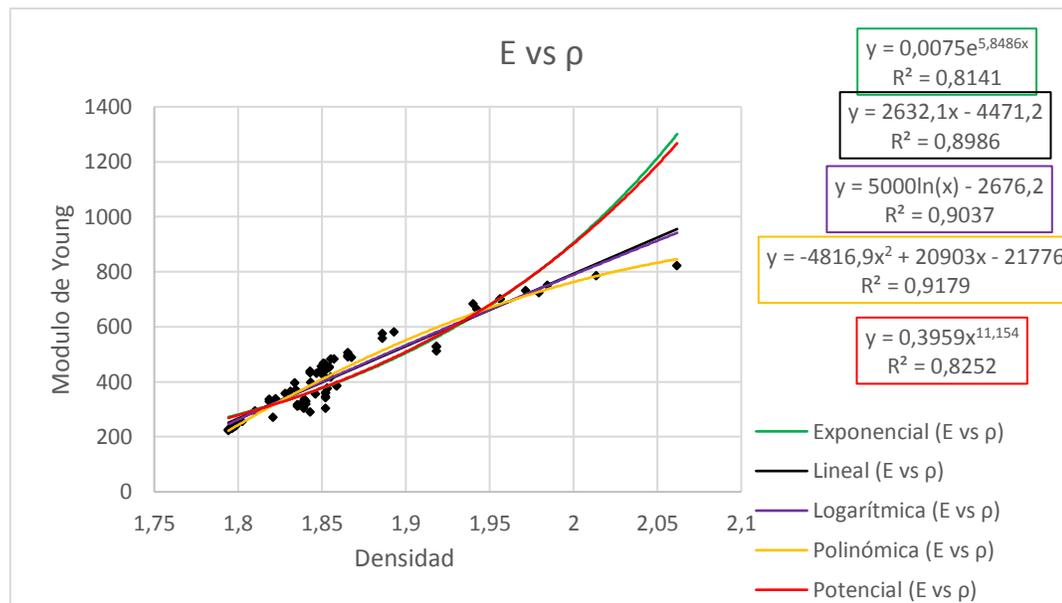


Figura 102. Curvas de correlación entre el módulo de Young y la densidad.

Fuente: Autores, 2017.

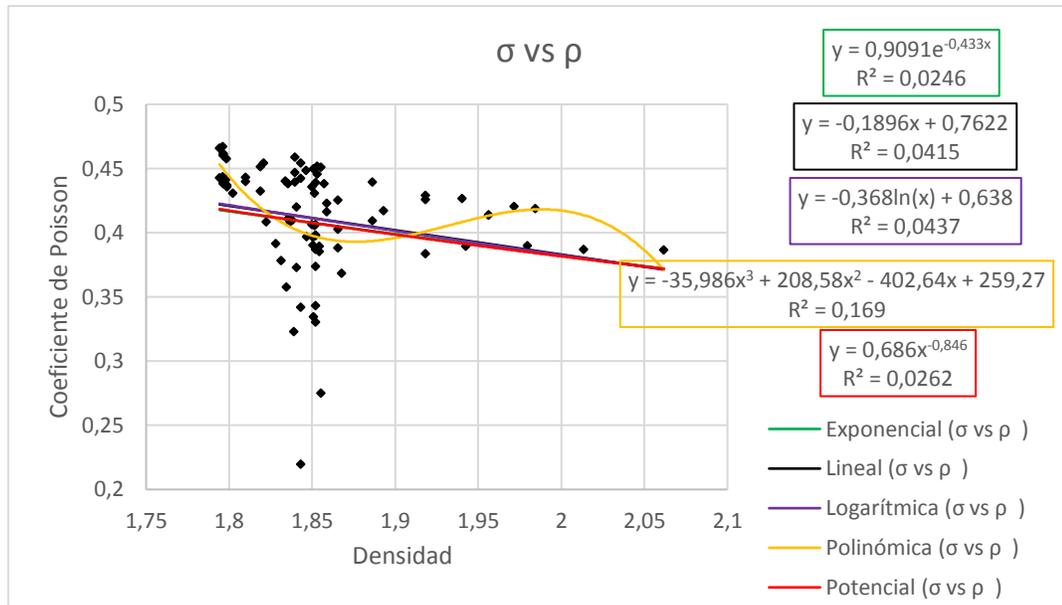


Figura 103. Curvas de correlación entre el coeficiente de Poisson y la densidad.

Fuente: Autores, 2017.

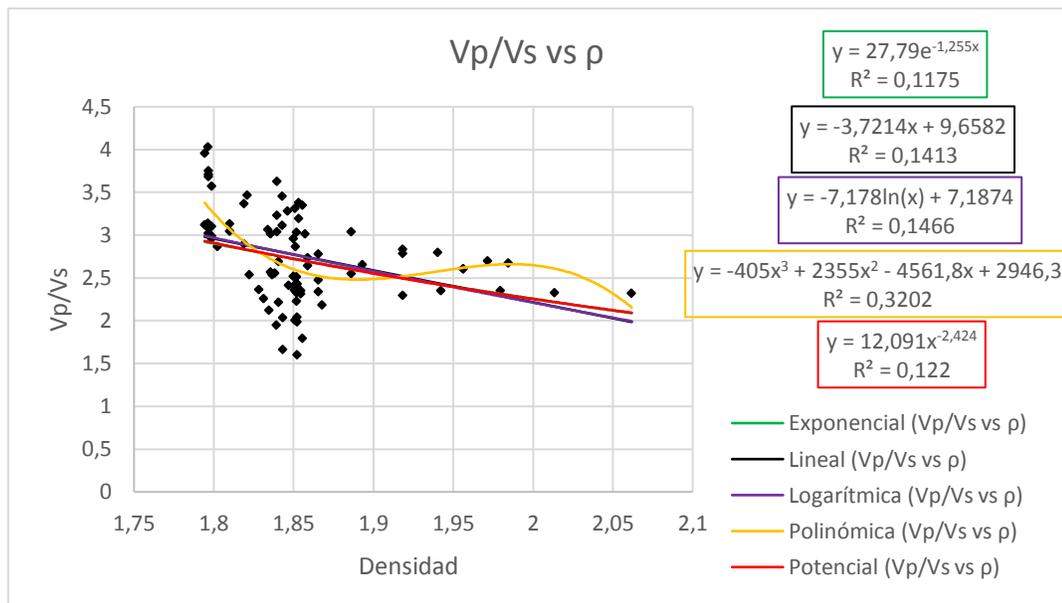


Figura 104. Curvas de correlación entre el Vp/Vs y la densidad.

Fuente: Autores, 2017.

Arcillolitas

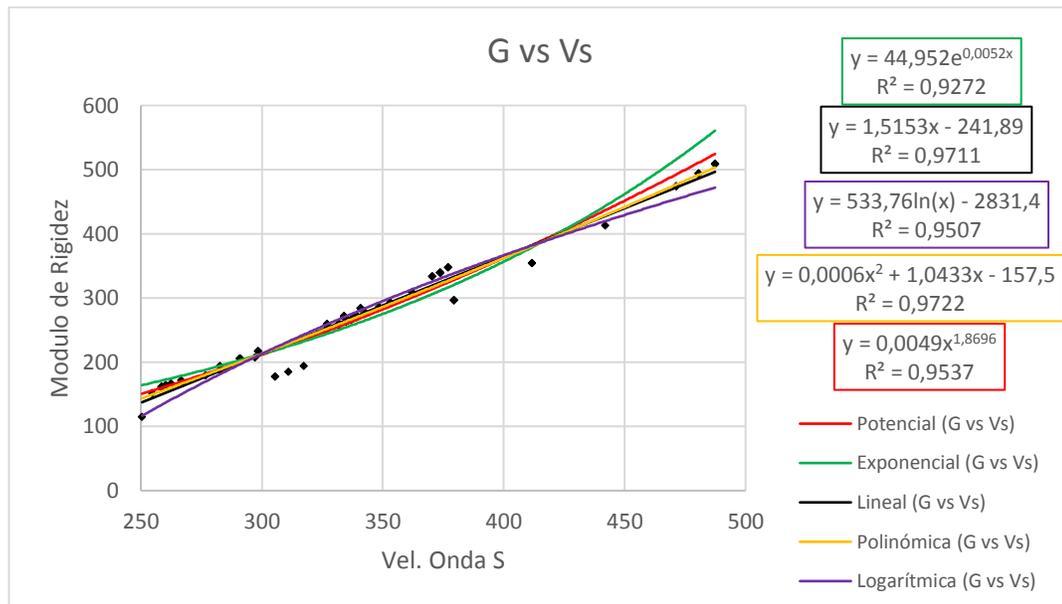


Figura 105. Curvas de correlación entre el módulo de rigidez y la velocidad de onda S.

Fuente: Autores, 2017.

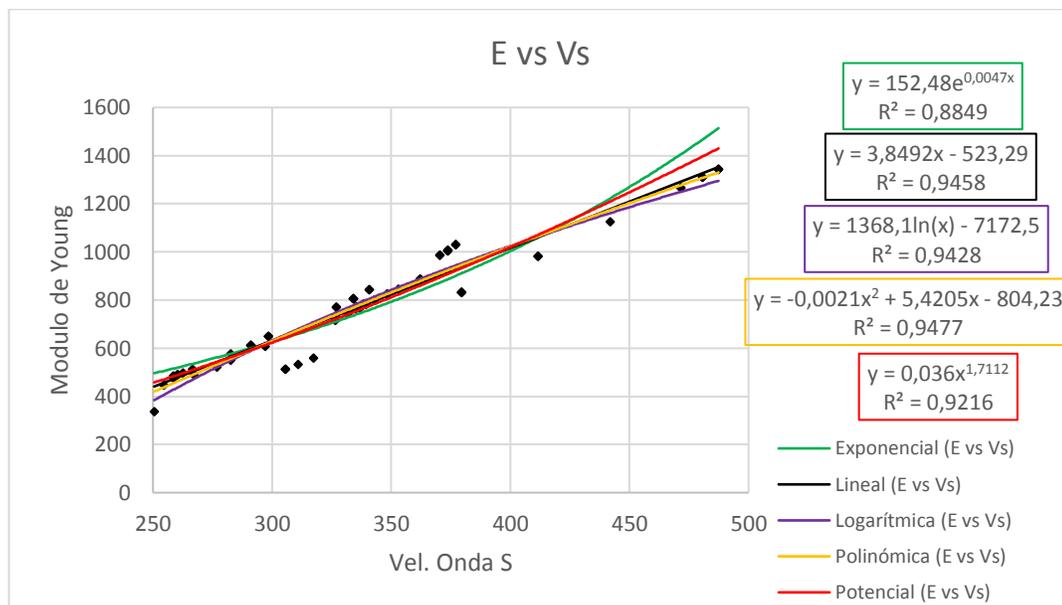


Figura 106. Curvas de correlación entre el módulo de Young y la velocidad de onda S.

Fuente: Autores, 2017.

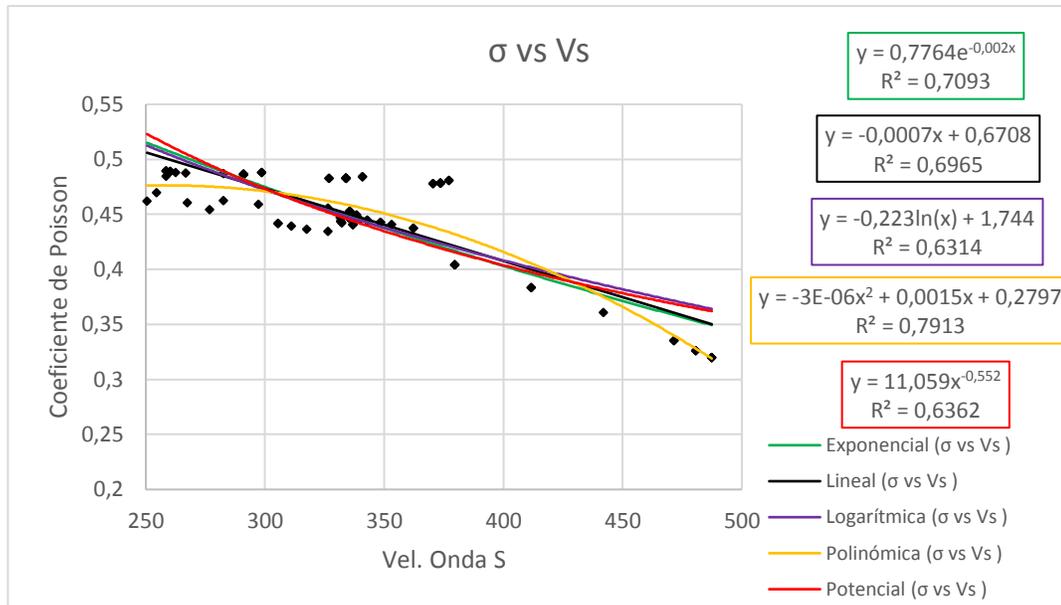


Figura 107. Curvas de correlación entre el coeficiente de Poisson y la velocidad de onda S.

Fuente: Autores, 2017.

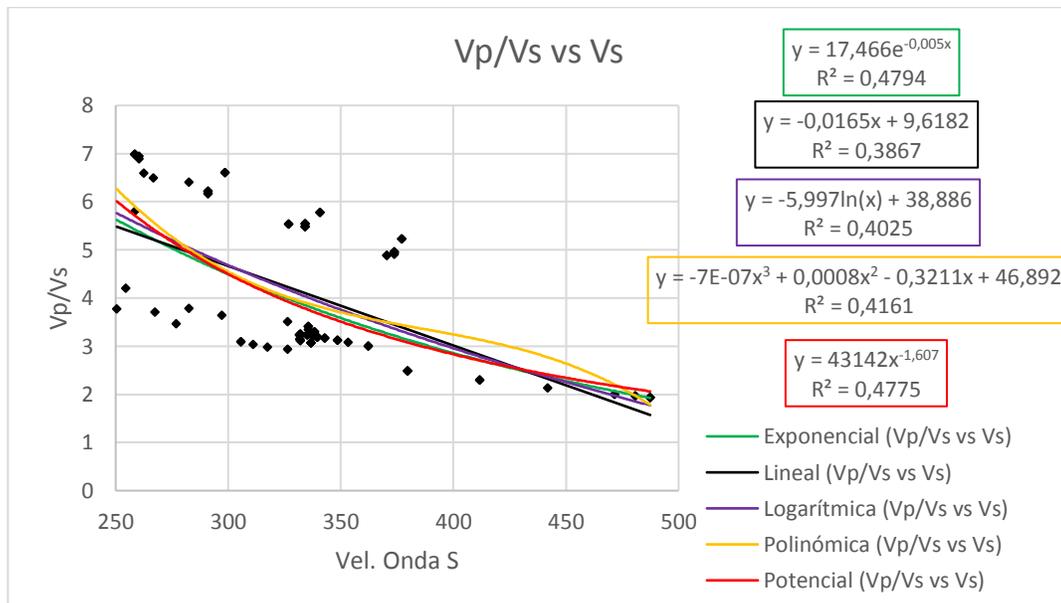


Figura 108. Curvas de correlación entre el Vp/Vs y la velocidad de onda S.

Fuente: Autores, 2017.

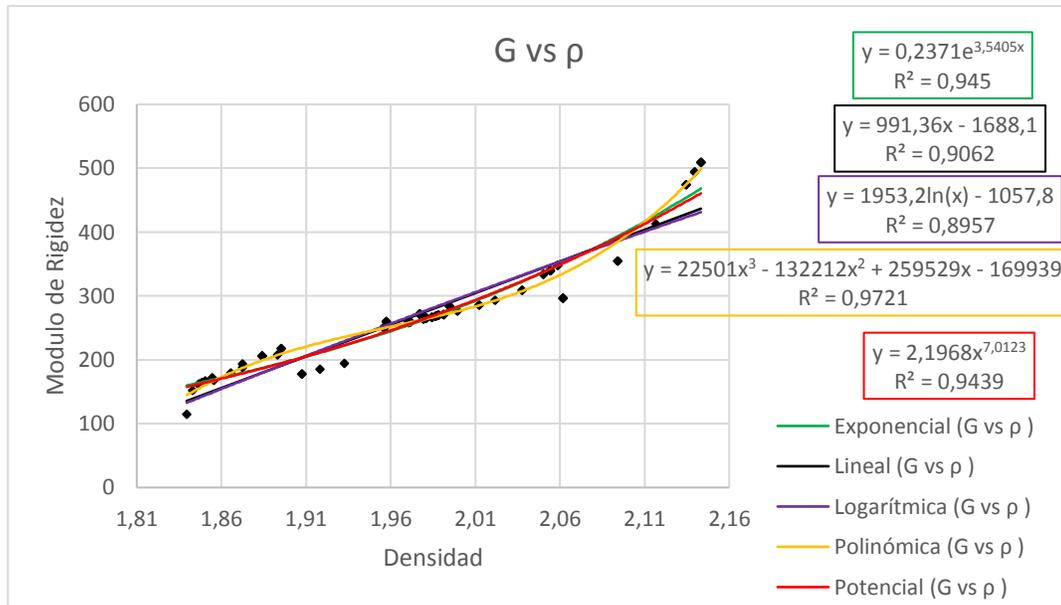


Figura 109. Curvas de correlación entre el módulo de rigidez y la densidad.

Fuente: Autores, 2017.

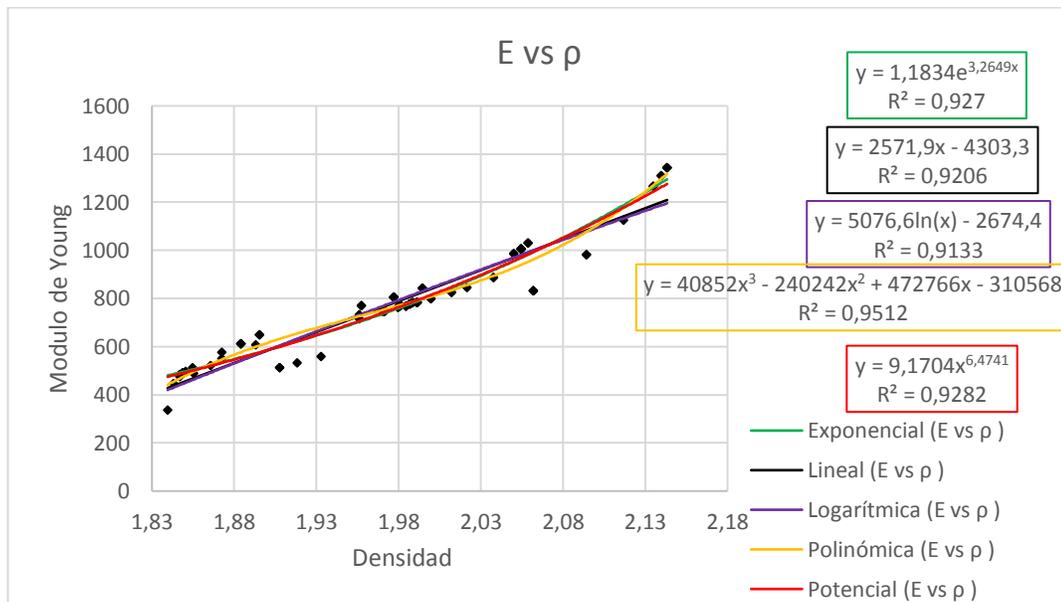


Figura 110. Curvas de correlación entre el módulo de Young y la densidad.

Fuente: Autores, 2017.

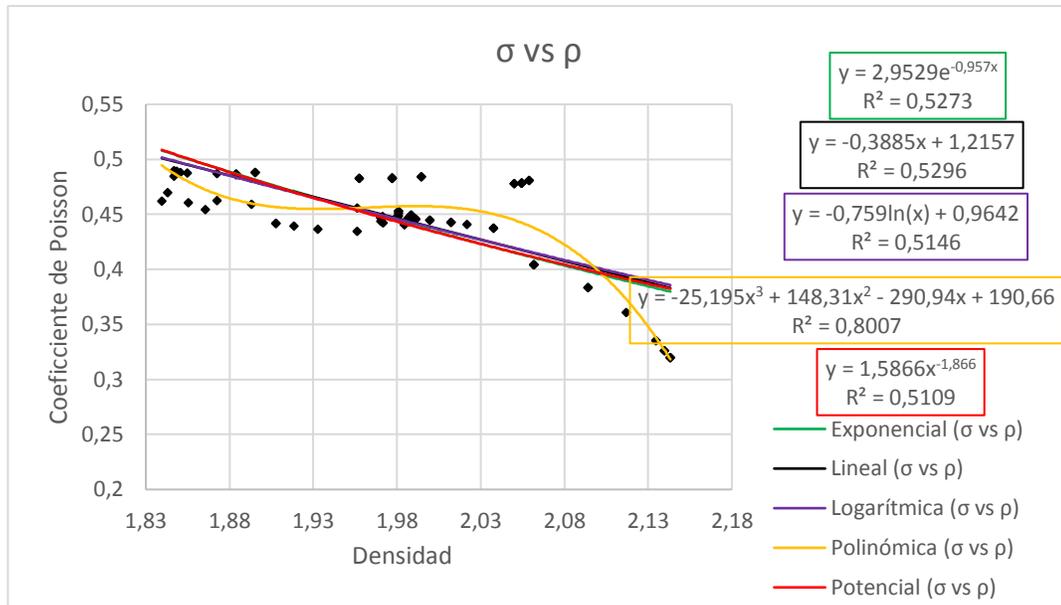


Figura 111. Curvas de correlación entre el coeficiente de Poisson y la densidad.

Fuente: Autores, 2017.

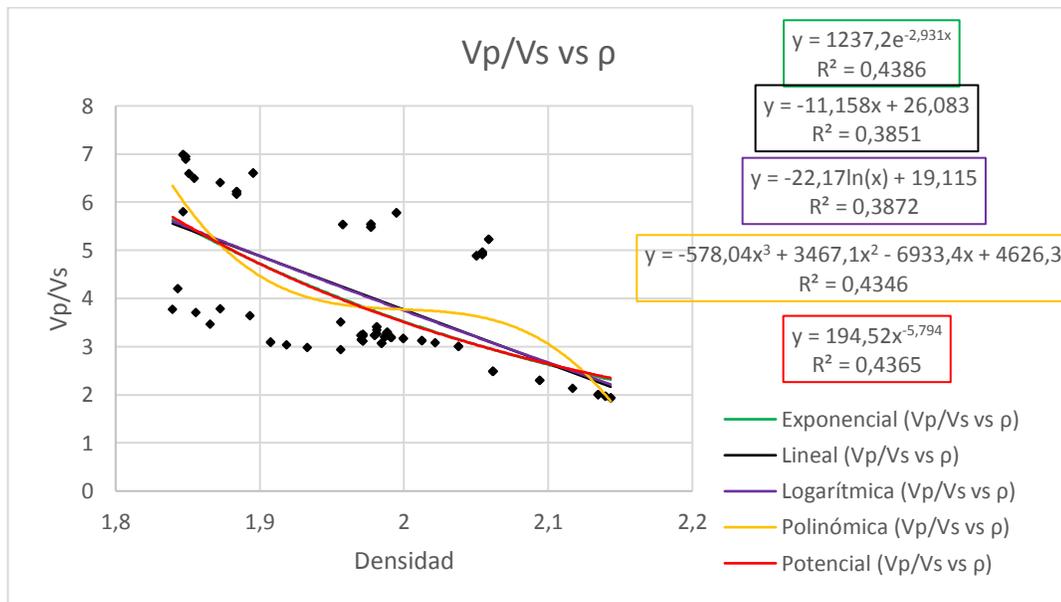


Figura 112. Curvas de correlación entre Vp/Vs y la densidad.

Fuente: Autores, 2017.

En los cuadros 3 y 4 se muestra un resumen de los análisis de correlación realizados.

Cuadro 3. Resumen de las ecuaciones de correlación para el material conglomerado.

Parámetro	Conglomerado			
	Vs		ρ	
	Ecuación	R ²	Ecuación	R ²
VP	$4,509 e^{-0,002Vs} Vs$	0,2042	$Vs 27,79e^{-1,255\rho}$	0,1175
	$Vs (- 0,0058 Vs + 4,2412)$	0,2373	$Vs(-3,7214\rho + 9,6582)$	0,1413
	$Vs(-1,545\ln(Vs) + 11,299)$	0,2662	$Vs(-7,178\ln(\rho) + 7,1874)$	0,1466
	$Vs (-6E-07Vs^3 + 0,0005Vs^2 - 0,1496Vs + 17,57)$	0,3286	$Vs(-405\rho^3 + 2355\rho^2 - 4561,8\rho + 2946,3)$	0,3202
	$Vs (51,506Vs^{-0,533})$	0,2311	$Vs 12,091\rho^{-2,424}$	0,122
Vs	Vs	1	$0,9752e^{2,9942\rho}$	0,8209
			$784,68\rho - 1200$	0,8965
			$1495,8\ln(\rho) - 668,06$	0,9079
			$16671\rho^3 - 98319\rho^2 + 193649\rho - 127044$	1
			$7,3604\rho^{5,7216}$	0,8354
ρ	$1,5877e^{0,0006Vs}$	0,9079	ρ	1
	$0,0011Vs + 1,5629$	0,8965		
	$0,2742\ln(Vs) + 0,3389$	0,8209		
	$1E-09Vs^3 + 5E-06Vs^2 - 0,0018Vs + 1,9463$	0,9951		
	$0,8271Vs^{0,146}$	0,8354		
σ	$0,5014e^{-8E-04Vs}$	0,0603	$0,9091e^{-0,433\rho}$	0,0246
	$\hat{\sim}0,0003Vs + 0,4965$	0,0899	$\hat{\sim}0,1896\rho + 0,7622$	0,0415
	$\hat{\sim}0,092\ln(Vs) + 0,92$	0,1071	$\hat{\sim}0,368\ln(\rho) + 0,638$	0,0437
	$\hat{\sim}5E-08Vs^3 + 4E-05Vs^2 - 0,013Vs + 1,6654$	0,1679	$\hat{\sim}35,986\rho^3 + 208,58\rho^2 - 402,64\rho + 259,27$	0,169
	$1,4261Vs^{-0,227}$	0,0737	$0,686\rho^{-0,846}$	0,0262
G	$19,373e^{0,0077Vs}$	0,9229	$0,0021e^{5,9808\rho}$	0,8167
	$1,1354Vs - 144,12$	0,8937	$949\rho - 1614,2$	0,909
	$276,86\ln(Vs) - 1384,8$	0,845	$1803,1\ln(\rho) - 967,27$	0,9145
	$0,0035Vs^2 - 0,6604Vs + 82,242$	0,9241	$\hat{\sim}1840,3\rho^2 + 7929,6\rho - 8225,6$	0,9309
	$0,0035Vs^{1,9155}$	0,915	$0,1198\rho^{11,411}$	0,8286
E	$58,039e^{0,0074Vs}$	0,9032	$0,0075e^{5,8486\rho}$	0,8141
	$3,1311Vs - 389,22$	0,8734	$2632,1\rho - 4471,2$	0,8986
	$761,86\ln(Vs) - 3801,5$	0,8223	$5000\ln(\rho) - 2676,2$	0,9037
	$0,0105Vs^2 - 2,2943Vs + 294,63$	0,9091	$\hat{\sim}4816,9\rho^2 + 20903\rho - 21776$	0,9179
	$0,014Vs^{1,8502}$	0,8898	$0,3959\rho^{11,154}$	0,8252

Fuente: Autores, 2017.

Cuadro 4. Resumen de las ecuaciones de correlación para las arcillolitas.

Parámetro	Pan de Jabón			
	Vs		ρ	
	Ecuación	R ²	Ecuación	R ²
VP	$V_s 17,466e^{-0,005V_s}$	0,4794	$V_s 1237,2e^{-2,931\rho}$	0,4386
	$V_s(-0,0165V_s + 9,6182)$	0,3867	$V_s(-11,158\rho + 26,083)$	0,3851
	$V_s(-5,997\ln(V_s) + 38,886)$	0,4025	$V_s(-22,17\ln(\rho) + 19,115)$	0,3872
	$V_s(-7E-07V_s^3 + 0,0008V_s^2 - 0,3211V_s + 46,892)$	0,4161	$V_s(-578,04\rho^3 + 3467,1\rho^2 - 6933,4\rho + 4626,3)$	0,4346
	$V_s 43142V_s^{-1,607}$	0,4775	$V_s(194,52\rho^{-5,794})$	0,4365
Vs	Vs	1	$8,2413e^{1,8738\rho}$	0,9702
			$655,77\rho - 957,46$	0,9375
			$1292,9\ln(\rho) - 541,12$	0,928
			$16658\rho^3 - 98244\rho^2 + 193500\rho - 126945$	1
			$26,885\rho^{3,7051}$	0,9659
ρ	$1,5489e^{0,0007V_s}$	0,928	ρ	1
	$0,0014V_s + 1,4926$	0,9375		
	$0,5178\ln(V_s) - 1,033$	0,9702		
	$-4E-08V_s^3 + 4E-05V_s^2 - 0,0112V_s + 2,7743$	0,9935		
	$0,434V_s^{0,2607}$	0,9659		
σ	$0,7764e^{-0,002V_s}$	0,7093	$2,9529e^{-0,957\rho}$	0,5273
	$-0,0007V_s + 0,6708$	0,6965	$-0,3885\rho + 1,2157$	0,5296
	$-0,223\ln(V_s) + 1,744$	0,6314	$-0,759\ln(\rho) + 0,9642$	0,5146
	$-3E-06V_s^2 + 0,0015V_s + 0,2797$	0,7913	$-25,195\rho^3 + 148,31\rho^2 - 290,94\rho + 190,66$	0,8007
	$11,059V_s^{-0,552}$	0,6362	$1,5866\rho^{-1,866}$	0,5109
G	$44,952e^{0,0052V_s}$	0,9272	$0,2371e^{3,5405\rho}$	0,945
	$1,5153V_s - 241,89$	0,9711	$991,36\rho - 1688,1$	0,9062
	$533,76\ln(V_s) - 2831,4$	0,9507	$1953,2\ln(\rho) - 1057,8$	0,8957
	$0,0006V_s^2 + 1,0433V_s - 157,5$	0,9722	$22501\rho^3 - 132212\rho^2 + 259529\rho - 169939$	0,9721
	$0,0049V_s^{1,8696}$	0,9537	$2,1968\rho^{7,0123}$	0,9439
E	$152,48e^{0,0047V_s}$	0,8849	$1,1834e^{3,2649\rho}$	0,927
	$3,8492V_s - 523,29$	0,9458	$2571,9\rho - 4303,3$	0,9206
	$1368,1\ln(V_s) - 7172,5$	0,9428	$5076,6\ln(\rho) - 2674,4$	0,9133
	$-0,0021V_s^2 + 5,4205V_s - 804,23$	0,9477	$40852\rho^3 - 240242\rho^2 + 472766\rho - 310568$	0,9512
	$0,036V_s^{1,7112}$	0,9216	$9,1704\rho^{6,4741}$	0,9282

Fuente: Autores, 2017.

Zonas Sur-Oriente

Material conglomeratico

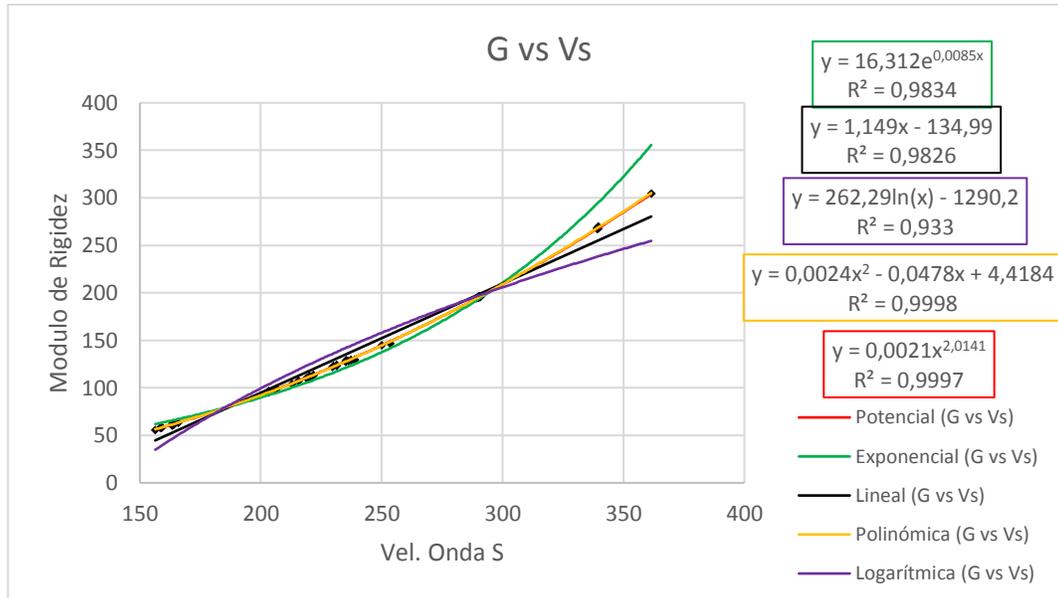


Figura 113. Curvas de correlación entre módulo de rigidez y la velocidad de onda S.

Fuente: Autores, 2017.

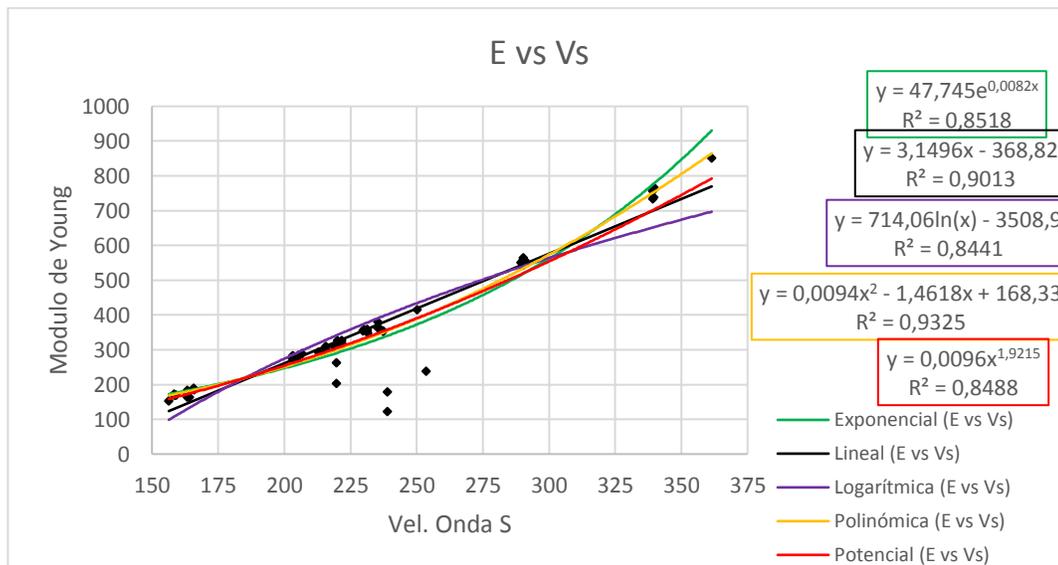


Figura 114. Curvas de correlación entre el módulo de Young y la velocidad de onda S.

Fuente: Autores, 2017.

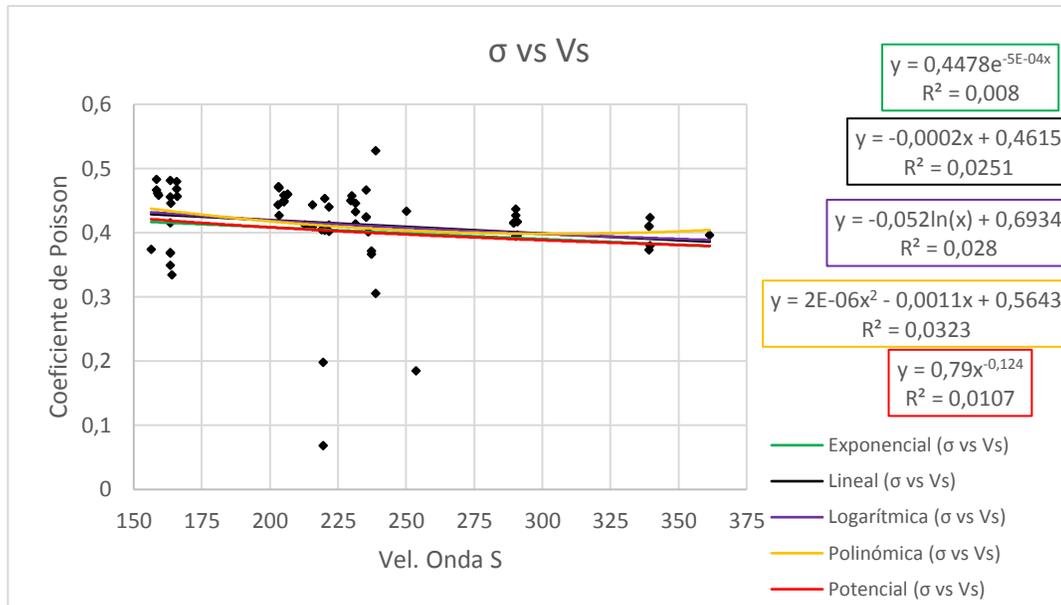


Figura 115. Curvas de correlación entre el coeficiente de Poisson y la velocidad de onda S.

Fuente: Autores, 2017.

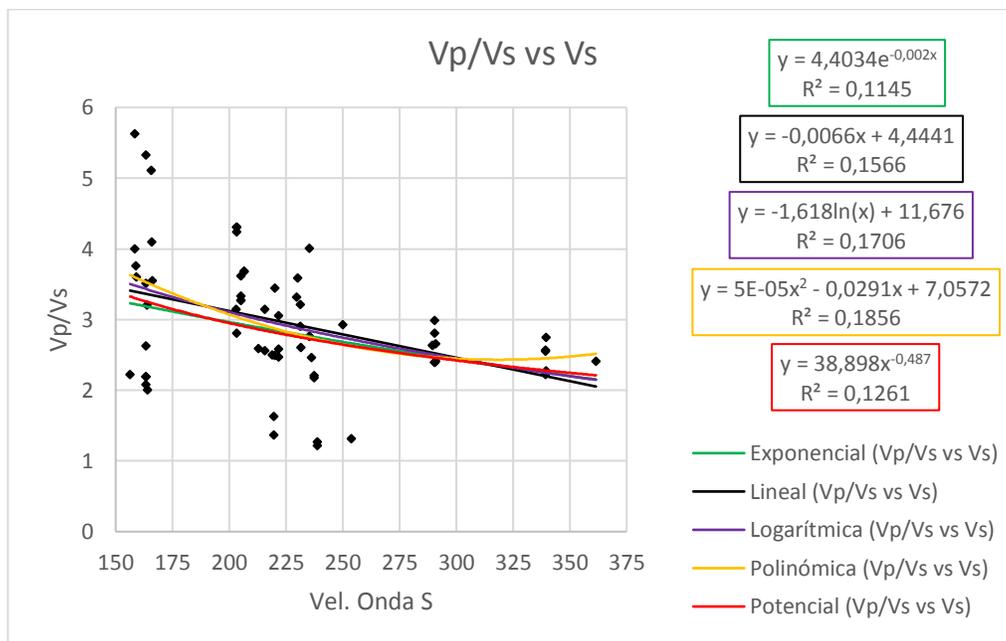


Figura 116. Curvas de correlación entre Vp/Vs y la velocidad de onda S.

Fuente: Autores, 2017.

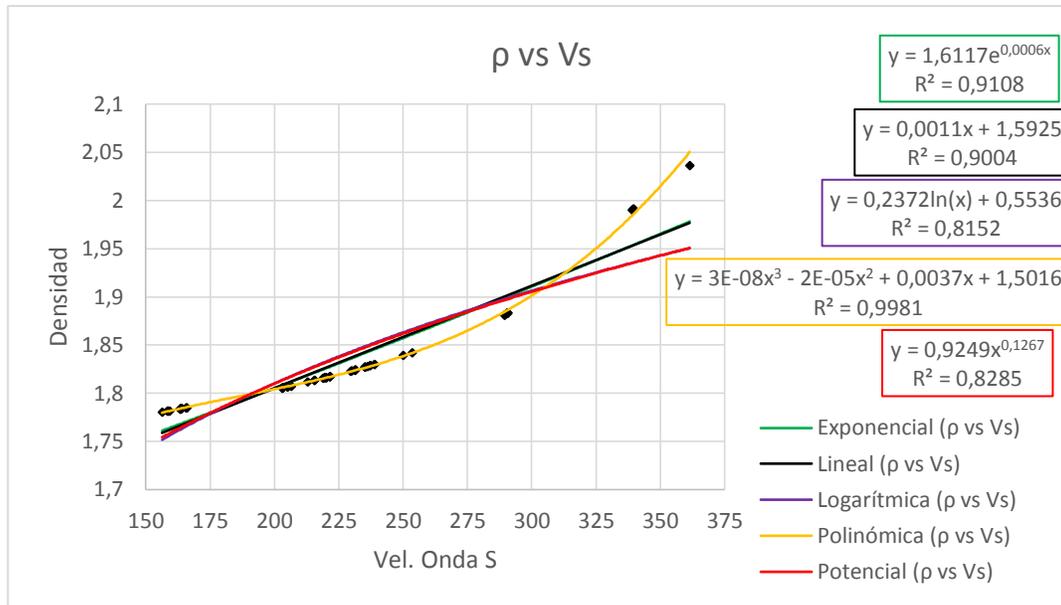


Figura 117. Curvas de correlación entre la densidad y la velocidad de onda S.

Fuente: Autores, 2017.

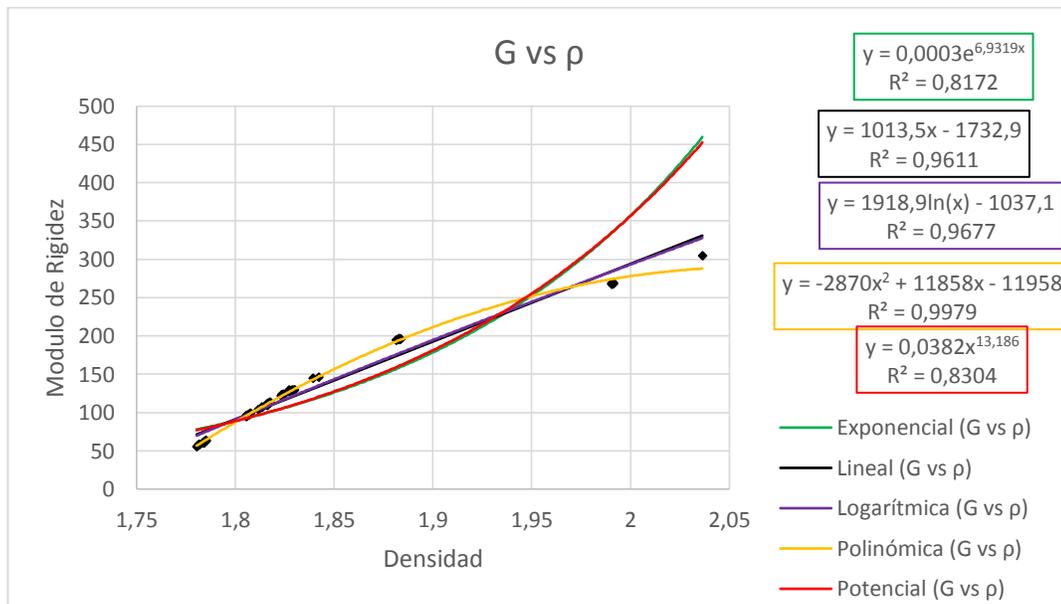


Figura 118. Curvas de correlación entre el módulo de rigidez y la densidad.

Fuente: Autores, 2017.

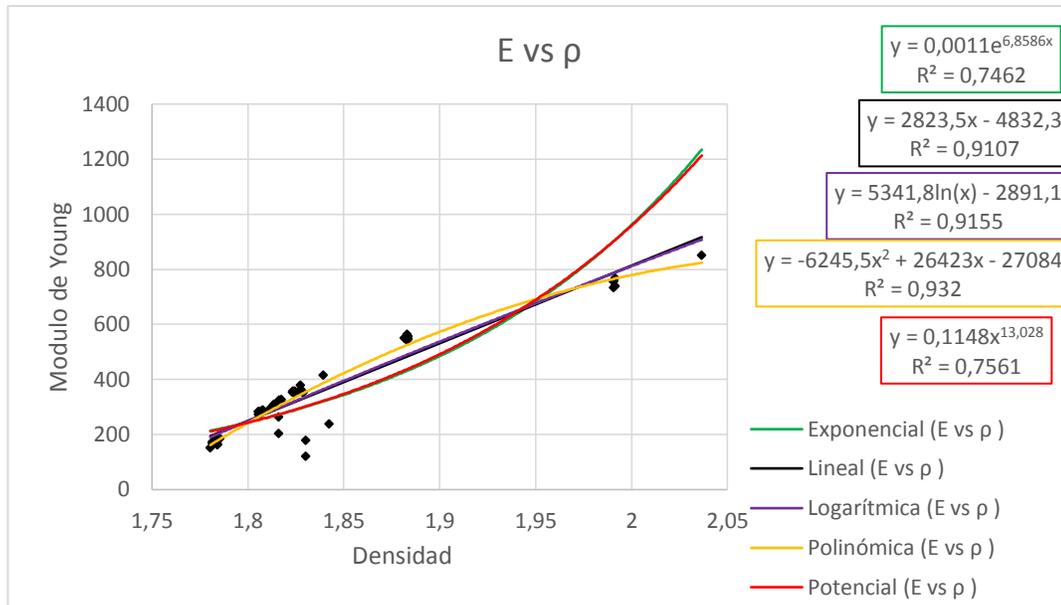


Figura 119. Curvas de correlación entre el módulo de Young y la densidad.

Fuente: Autores, 2017.

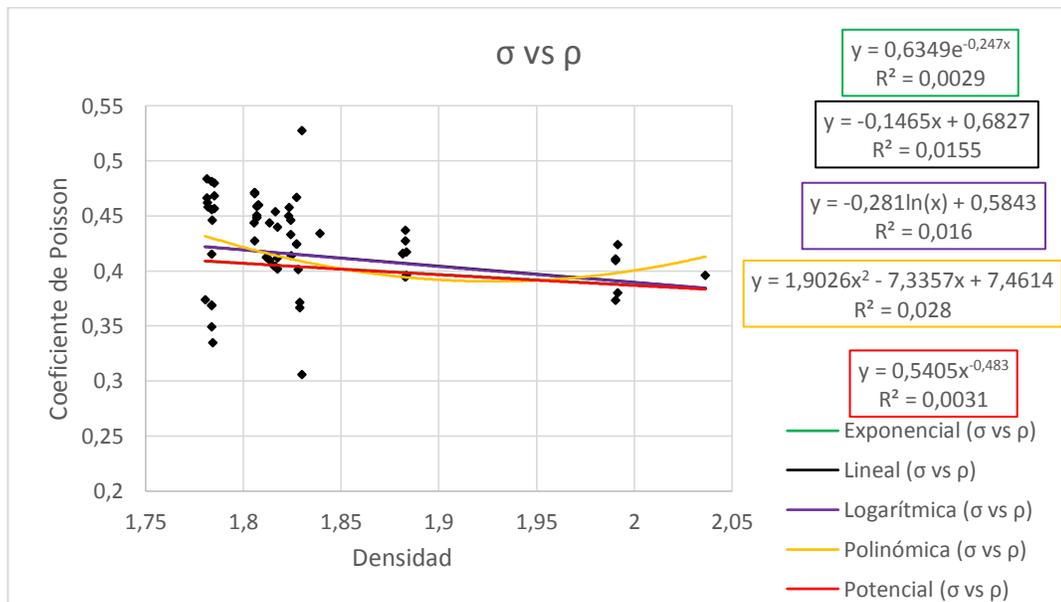


Figura 120. Curvas de correlación entre el coeficiente de Poisson y la densidad.

Fuente: Autores, 2017.

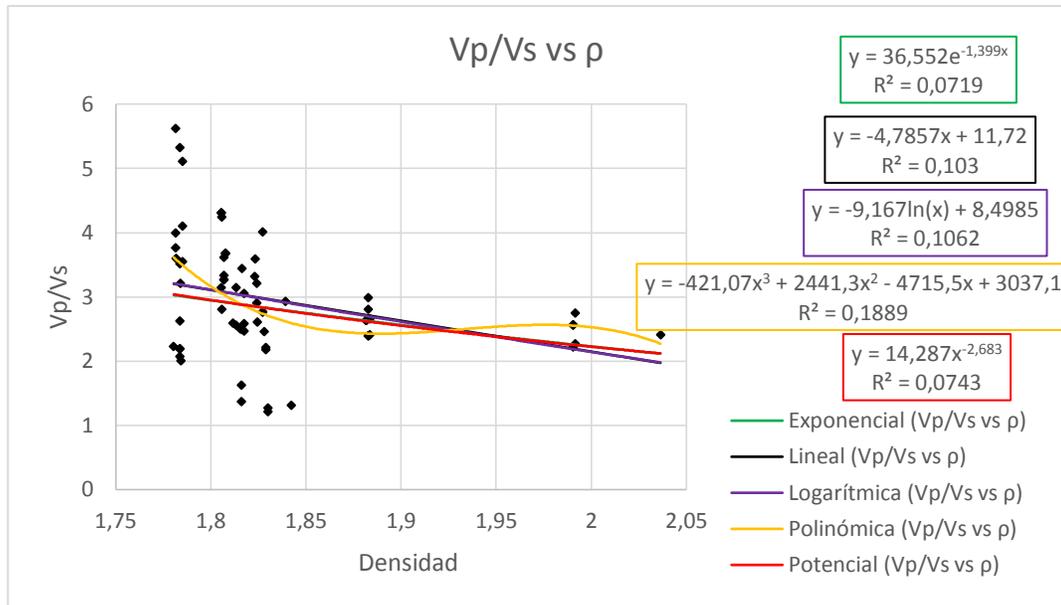


Figura 121. Curvas de correlación entre Vp/Vs y la densidad.

Fuente: Autores, 2017.

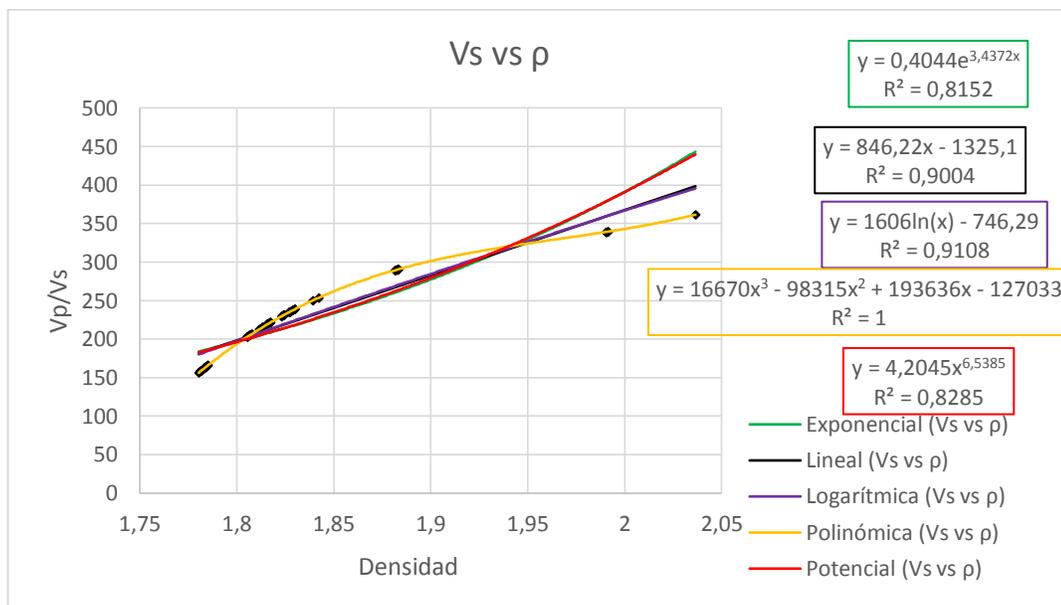


Figura 122. Curvas de correlación entre la velocidad de onda S y la densidad.

Fuente: Autores, 2017.

Arcillolitas

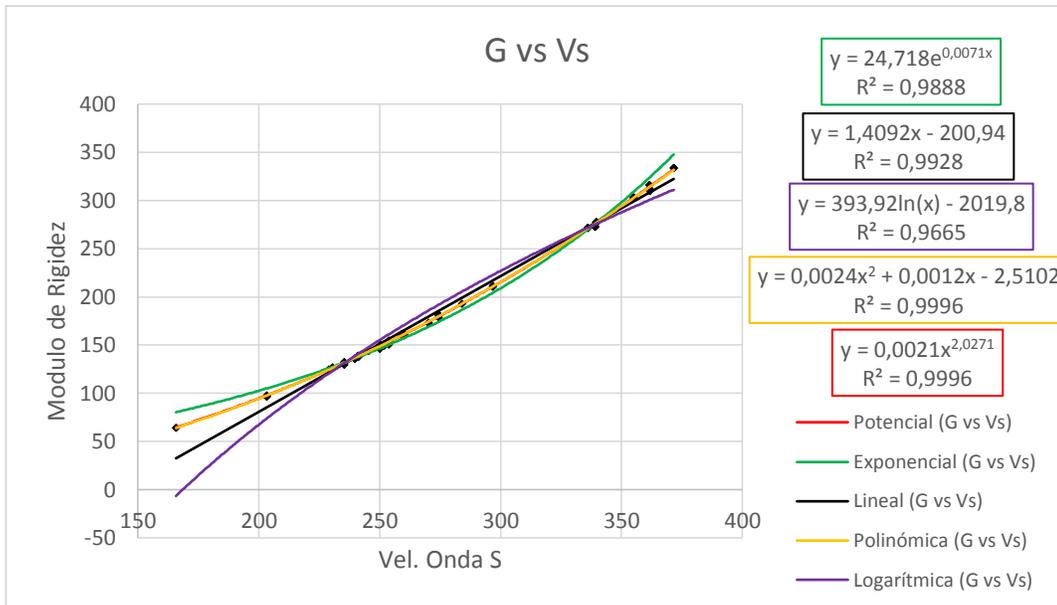


Figura 123. Curvas de correlación entre el módulo de rigidez y la velocidad de onda S.

Fuente: Autores, 2017.

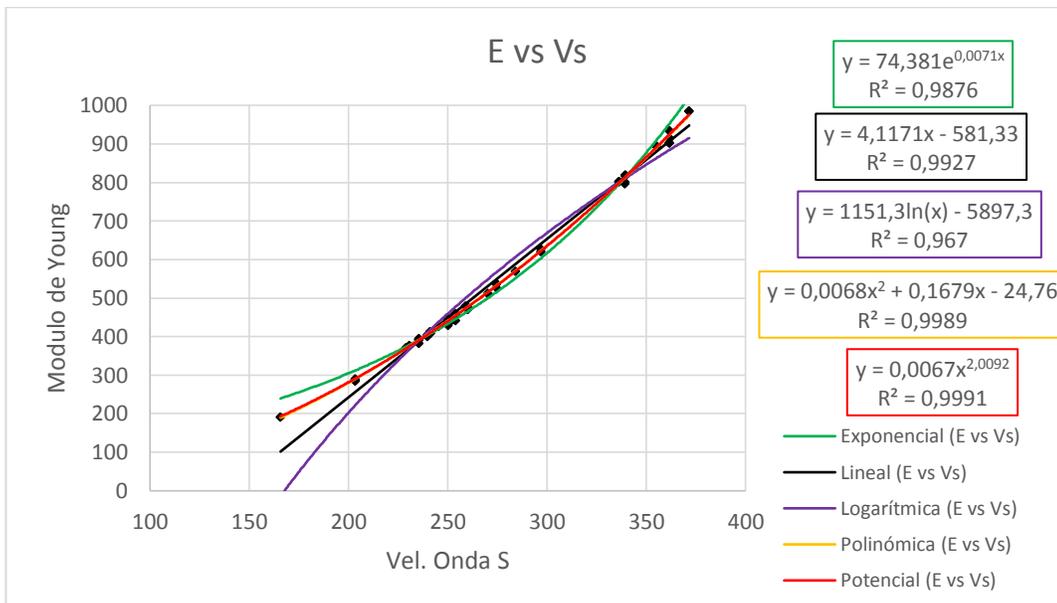


Figura 124. Curvas de correlación entre el módulo de Young y la velocidad de onda S.

Fuente: Autores, 2017.

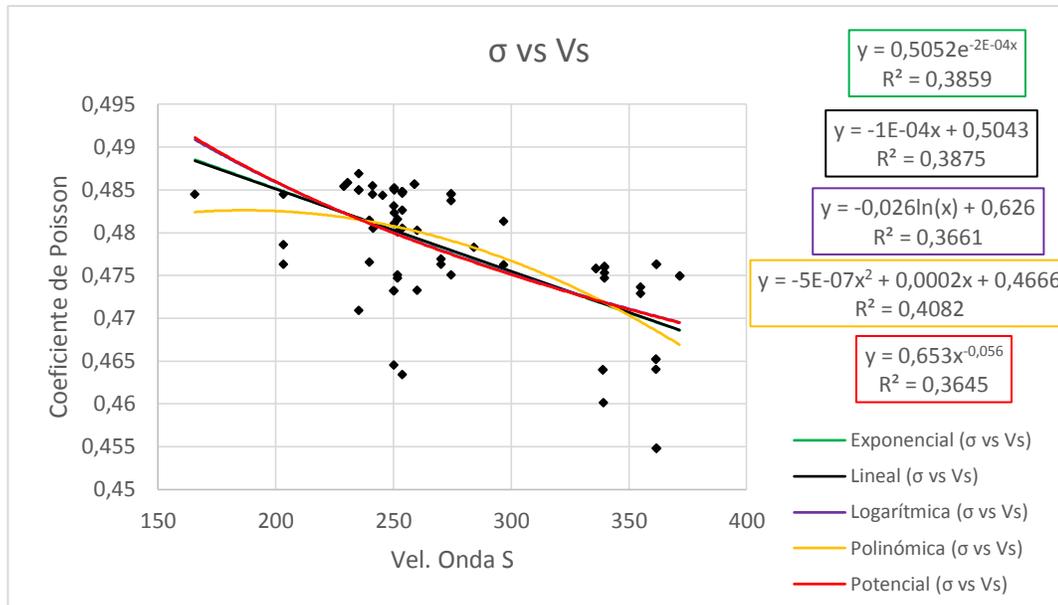


Figura 125. Curvas de correlación entre el coeficiente de Poisson y la velocidad de onda S.

Fuente: Autores, 2017.

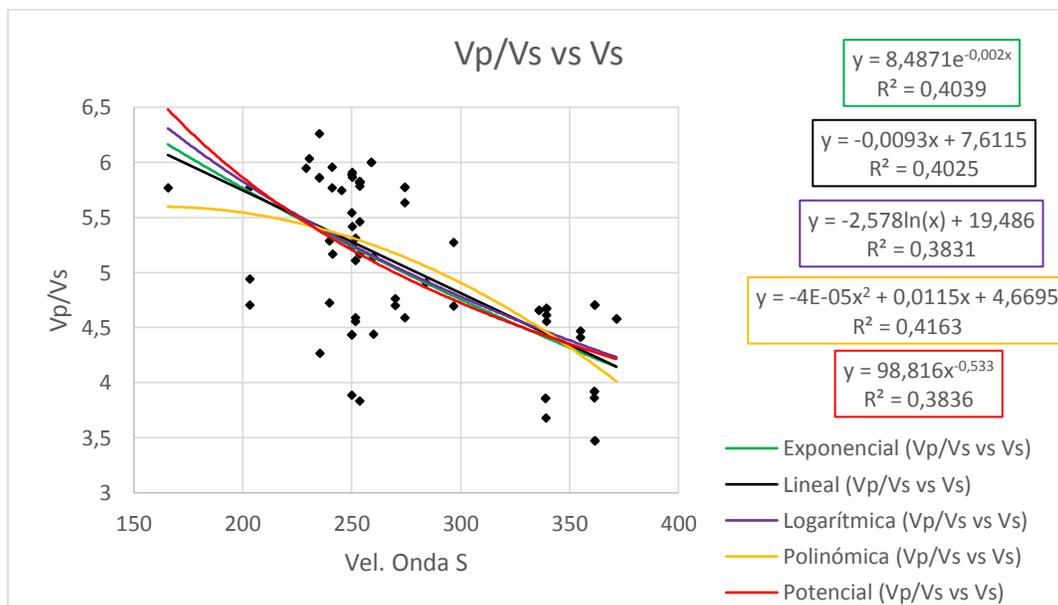


Figura 126. Curvas de correlación entre Vp/Vs y la velocidad de onda S.

Fuente: Autores, 2017.

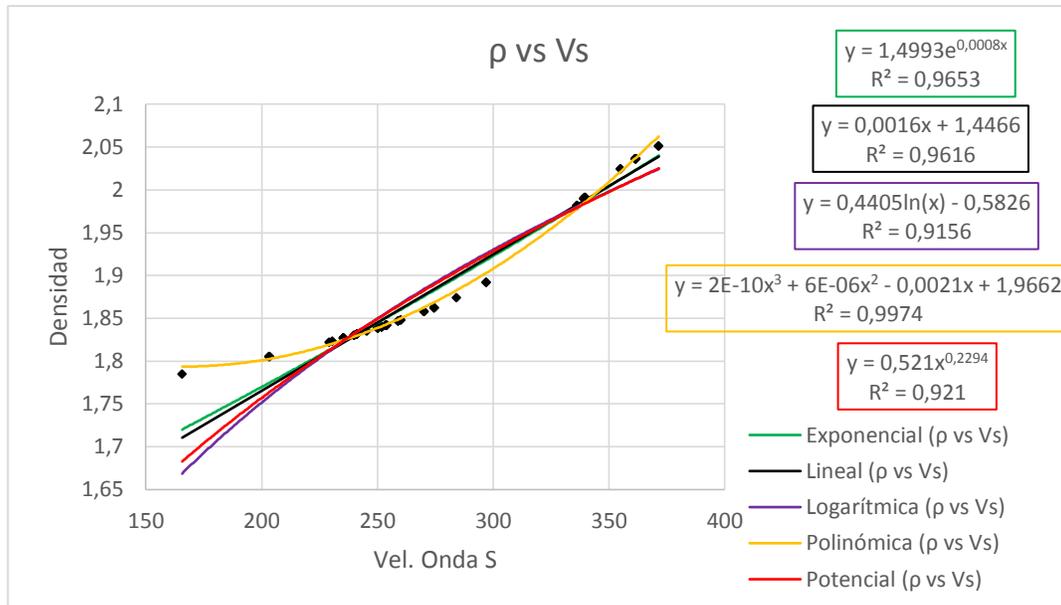


Figura 127. Curvas de correlación entre la densidad y la velocidad de onda S.

Fuente: Autores, 2017.

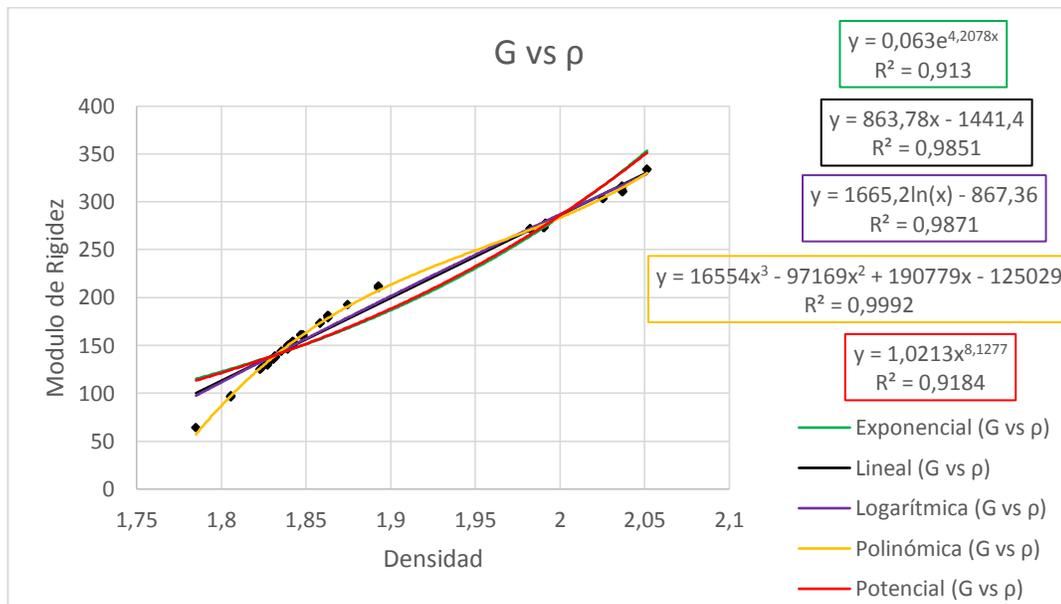


Figura 128. Curvas de correlación entre el módulo de rigidez y la densidad.

Fuente: Autores, 2017.

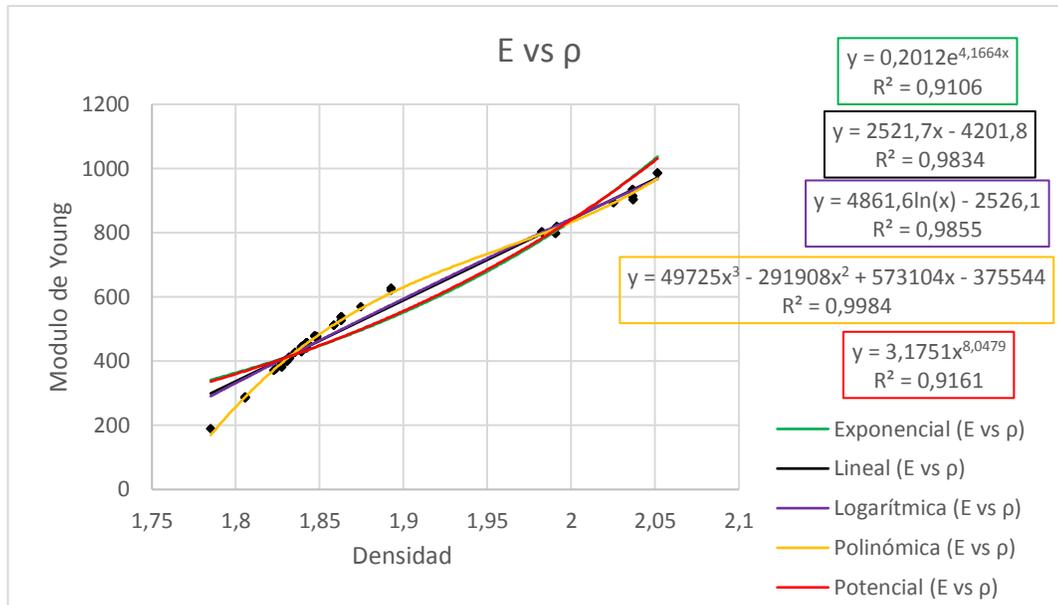


Figura 129. Curvas de correlación entre el módulo de Young y la densidad.

Fuente: Autores, 2017.

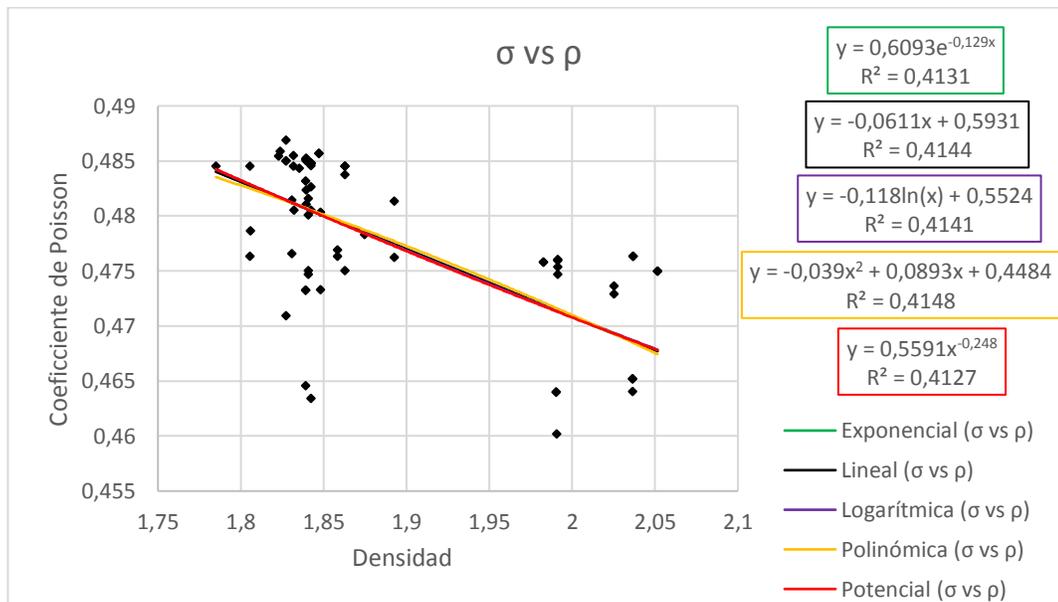


Figura 130. Curvas de correlación entre el coeficiente de Poisson y la densidad.

Fuente: Autores, 2017.

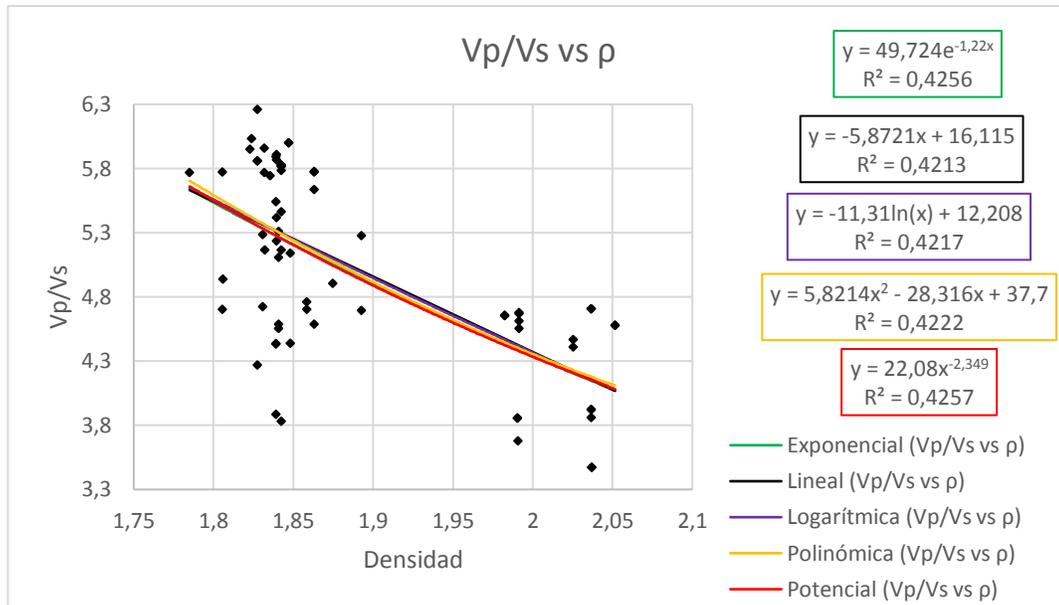


Figura 131. Curvas de correlación entre Vp/Vs y la densidad.

Fuente: Autores, 2017.

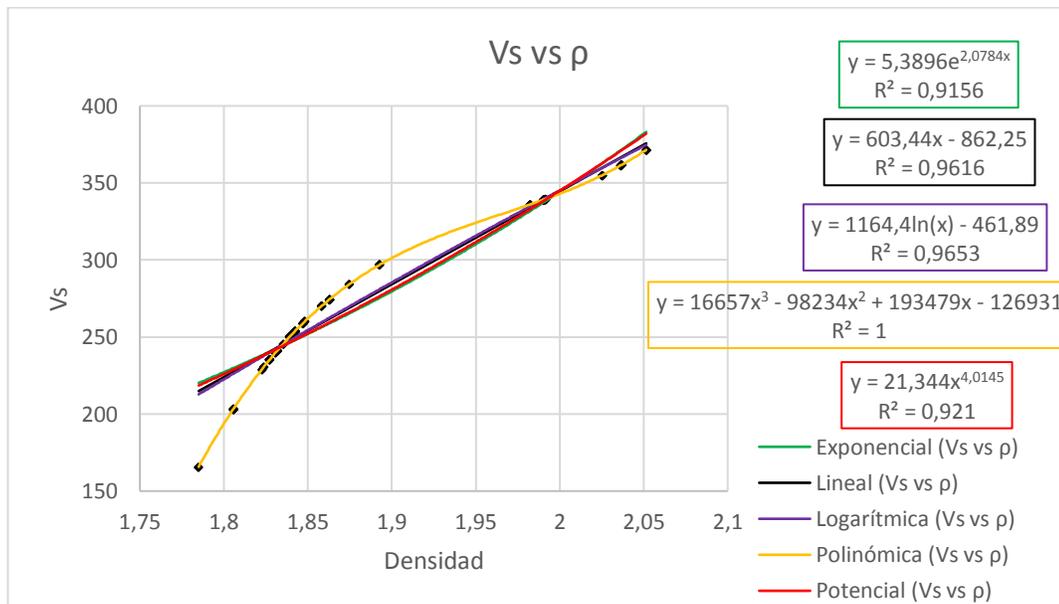


Figura 132. Curvas de correlación entre la velocidad de onda S y la densidad.

Fuente: Autores, 2017.

En los cuadros 5 y 6 se muestra un resumen de los análisis de correlación realizados.

Cuadro 5. Resumen de las ecuaciones de correlación para el material conglomerado.

Parámetro	Conglomerado			
	Vs		ρ	
	Ecuación	R ²	Ecuación	R ²
VP	$V_s(4,4034e^{-0,002V_s})$	0,1145	$V_s 36,552e^{-1,399\rho}$	0,0719
	$V_s(-0,0066V_s + 4,4441)$	0,1566	$V_s(-4,7857\rho + 11,72)$	0,103
	$V_s(-1,618\ln(V_s) + 11,676)$	0,1706	$V_s(-9,167\ln(\rho) + 8,4985)$	0,1062
	$V_s(5E-05V_s^2 - 0,0291V_s + 7,0572)$	0,1856	$V_s(-421,07\rho^3 + 2441,3\rho^2 - 4715,5\rho + 3037,1)$	0,1889
	$V_s(38,898V_s^{-0,487})$	0,1261	$V_s 14,287\rho^{-2,683}$	0,0743
Vs	Vs	1	$0,4044e^{3,4372\rho}$	0,8152
			$846,22\rho - 1325,1$	0,9004
			$1606\ln(\rho) - 746,29$	0,9108
			$16670\rho^3 - 98315\rho^2 + 193636\rho - 127033$	1
			$4,2045\rho^{6,5385}$	0,8285
ρ	$1,6117e^{0,0006V_s}$	0,9108	ρ	1
	$0,0011V_s + 1,5925$	0,9004		
	$0,2372\ln(V_s) + 0,5536$	0,8152		
	$3E-08V_s^3 - 2E-05V_s^2 + 0,0037V_s + 1,5016$	0,9981		
	$0,9249V_s^{0,1267}$	0,8285		
σ	$0,4478e^{-5E-04V_s}$	0,008	$0,6349e^{-0,247\rho}$	0,0029
	$\hat{-}0,0002V_s + 0,4615$	0,0251	$\hat{-}0,1465\rho + 0,6827$	0,0155
	$\hat{-}0,052\ln(V_s) + 0,6934$	0,028	$\hat{-}0,281\ln(\rho) + 0,5843$	0,016
	$2E-06V_s^2 - 0,0011V_s + 0,5643$	0,0323	$1,9026\rho^2 - 7,3357\rho + 7,4614$	0,028
	$0,79V_s^{-0,124}$	0,0107	$0,5405\rho^{-0,483}$	0,0031
G	$16,312e^{0,0085V_s}$	0,9834	$0,0003e^{6,9319\rho}$	0,8172
	$1,149V_s - 134,99$	0,9826	$1013,5\rho - 1732,9$	0,9611
	$262,29\ln(V_s) - 1290,2$	0,933	$1918,9\ln(\rho) - 1037,1$	0,9677
	$0,0024V_s^2 - 0,0478V_s + 4,4184$	0,9998	$\hat{-}2870\rho^2 + 11858\rho - 11958$	0,9979
	$0,0021V_s^{2,0141}$	0,9997	$0,0382\rho^{13,186}$	0,8304
E	$47,745e^{0,0082V_s}$	0,8518	$0,0011e^{6,8586\rho}$	0,7462
	$3,1496V_s - 368,82$	0,9013	$2823,5\rho - 4832,3$	0,9107
	$714,06\ln(V_s) - 3508,9$	0,8441	$5341,8\ln(\rho) - 2891,1$	0,9155
	$0,0094V_s^2 - 1,4618V_s + 168,33$	0,9325	$\hat{-}6245,5\rho^2 + 26423\rho - 27084$	0,932
	$0,0096V_s^{1,9215}$	0,8488	$0,1148\rho^{13,028}$	0,7561

Fuente: Autores, 2017

Cuadro 6. Resumen de las ecuaciones de correlación para las arcillolitas.

Parámetro	Pan de Jabón			
	Vs		ρ	
	Ecuación	R ²	Ecuación	R ²
VP	$Vs\ 8,4871e^{-0,002Vs}$	0,4039	$Vs\ 49,724e^{-1,22p}$	0,4256
	$Vs(-0,0093Vs + 7,6115)$	0,4025	$Vs(-5,8721p + 16,115)$	0,4213
	$Vs(-2,578\ln(Vs) + 19,486)$	0,3831	$Vs(-11,31\ln(p) + 12,208)$	0,4217
	$Vs(-4E-05Vs^2 + 0,0115Vs + 4,6695)$	0,4163	$Vs(5,8214p^2 - 28,316p + 37,7)$	0,4222
	$Vs\ 98,816Vs^{-0,533}$	0,3836	$Vs\ 22,08p^{-2,349}$	0,4257
Vs	Vs	1	$5,3896e^{-2,0784p}$	0,9156
			$603,44p - 862,25$	0,9616
			$1164,4\ln(p) - 461,89$	0,9653
			$16657p^3 - 98234p^2 + 193479p - 126931$	1
			$21,344p^{4,0145}$	0,921
ρ	$1,4993e^{0,0008Vs}$	0,9653	ρ	1
	$0,0016Vs + 1,4466$	0,9616		
	$0,4405\ln(Vs) - 0,5826$	0,9156		
	$2E-10Vs^3 + 6E-06Vs^2 - 0,0021Vs + 1,9662$	0,9974		
	$0,521Vs^{0,2294}$	0,921		
σ	$0,5052e^{-2E-04Vs}$	0,3859	$0,6093e^{-0,129p}$	0,4131
	$\hat{-}1E-04Vs + 0,5043$	0,3875	$\hat{-}0,0611p + 0,5931$	0,4144
	$\hat{-}0,026\ln(Vs) + 0,626$	0,3661	$\hat{-}0,118\ln(p) + 0,5524$	0,4141
	$\hat{-}5E-07Vs^2 + 0,0002Vs + 0,4666$	0,4082	$\hat{-}0,039p^2 + 0,0893p + 0,4484$	0,4148
	$0,653Vs^{-0,056}$	0,3645	$0,5591p^{-0,248}$	0,4127
G	$24,718e^{0,0071Vs}$	0,9888	$0,063e^{4,2078p}$	0,913
	$1,4092Vs - 200,94$	0,9928	$863,78p - 1441,4$	0,9851
	$393,92\ln(Vs) - 2019,8$	0,9665	$1665,2\ln(p) - 867,36$	0,9871
	$0,0024Vs^2 + 0,0012Vs - 2,5102$	0,9996	$16554p^3 - 97169p^2 + 190779p - 125029$	0,9992
	$0,0021Vs^{2,0271}$	0,9996	$1,0213p^{8,1277}$	0,9184
E	$74,381e^{0,0071Vs}$	0,9876	$0,2012e^{4,1664p}$	0,9106
	$4,1171Vs - 581,33$	0,9927	$2521,7p - 4201,8$	0,9834
	$1151,3\ln(Vs) - 5897,3$	0,967	$4861,6\ln(p) - 2526,1$	0,9855
	$0,0068Vs^2 + 0,1679Vs - 24,76$	0,9989	$49725p^3 - 291908p^2 + 573104p - 375544$	0,9984
	$0,0067Vs^{2,0092}$	0,9991	$3,1751p^{8,0479}$	0,9161

Fuente: Autores, 2017.

Zona Centro-occidente

Material conglomeratico

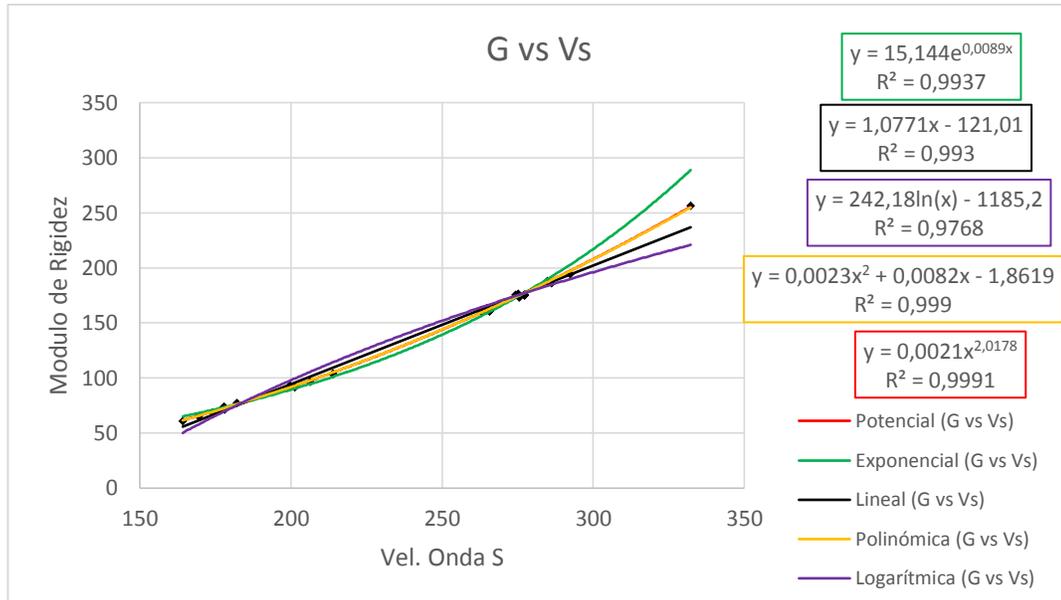


Figura 133. Curvas de correlación entre módulo de rigidez y la velocidad de onda S.

Fuente: Autores, 2017.

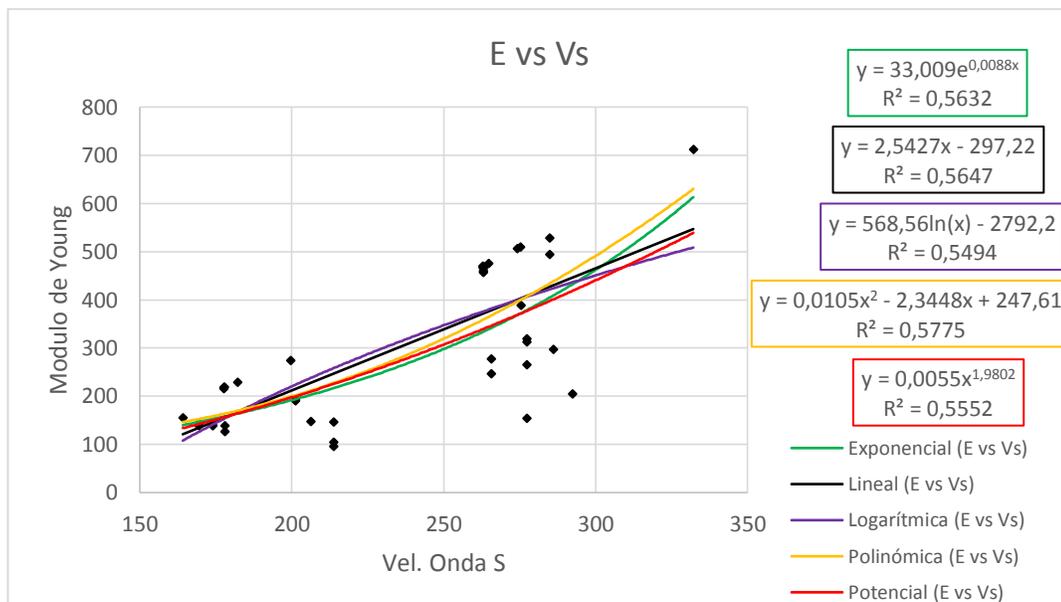


Figura 134. Curvas de correlación entre módulo de Young y la velocidad de onda S.

Fuente: Autores, 2017.

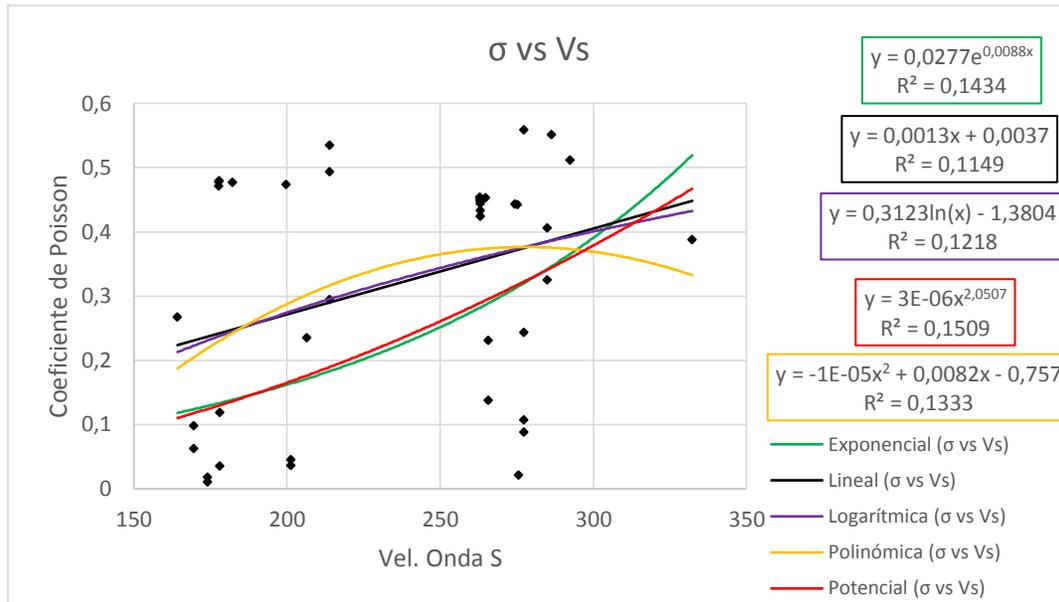


Figura 135. Curvas de correlación entre el coeficiente de Poisson y la velocidad de onda S.

Fuente: Autores, 2017.

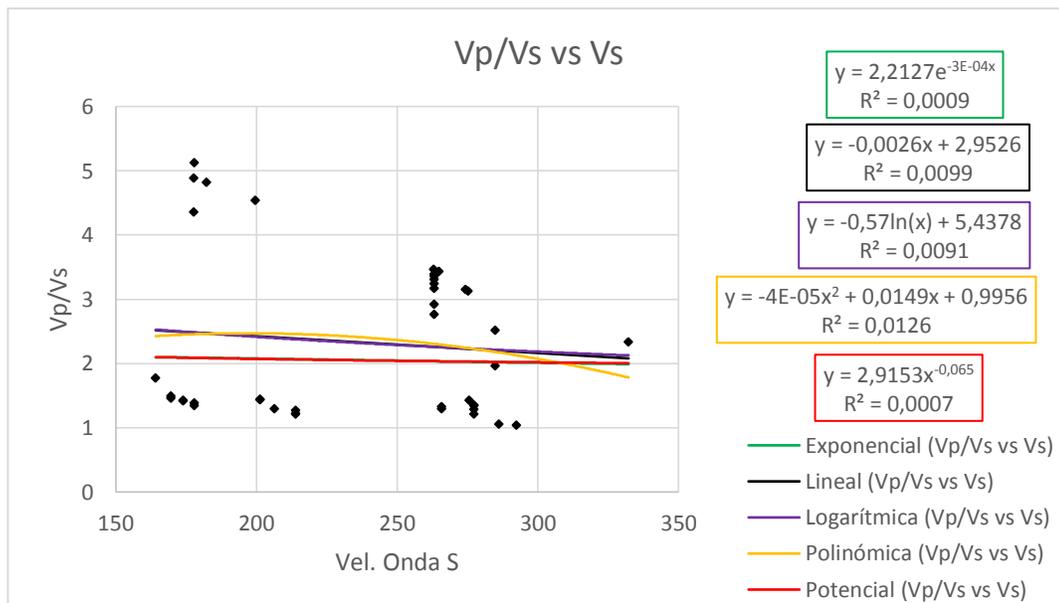


Figura 136. Curvas de correlación entre Vp/Vs y la velocidad de onda S.

Fuente: Autores, 2017.

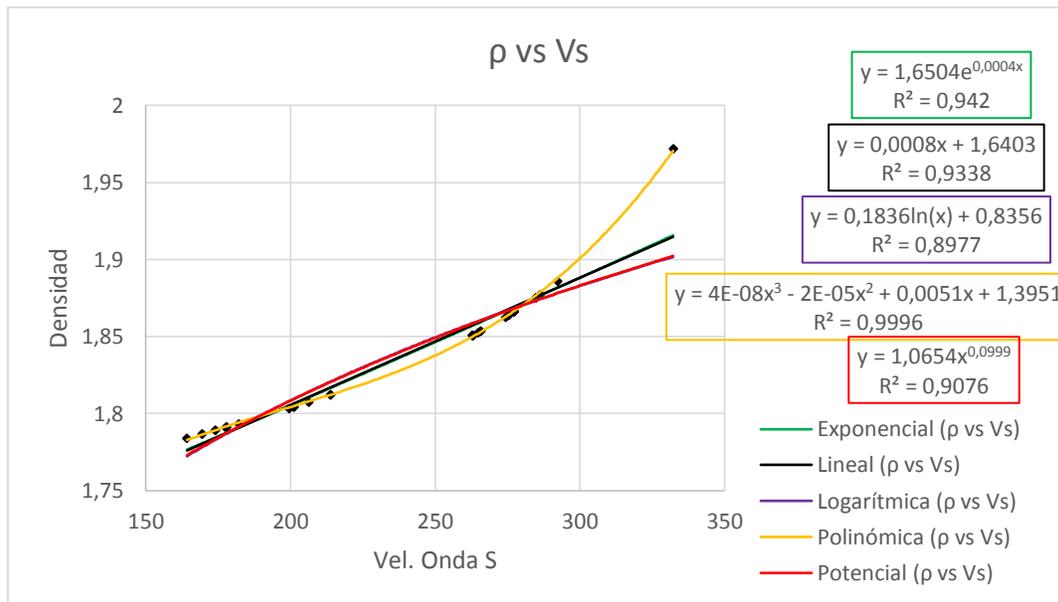


Figura 137. Curvas de correlación entre la densidad y la velocidad de onda S.

Fuente: Autores, 2017.

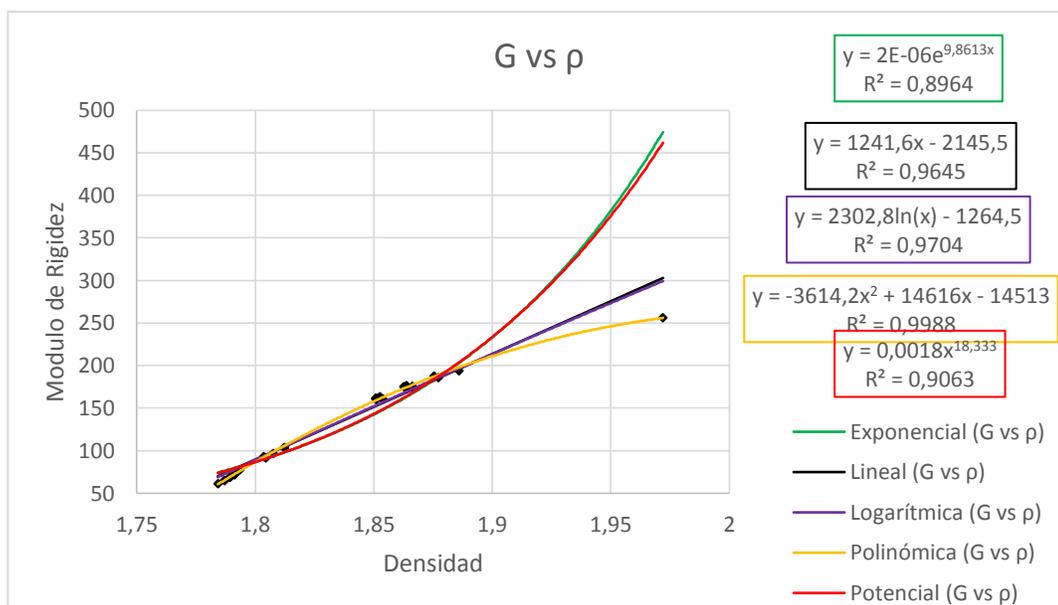


Figura 138. Curvas de correlación entre el módulo de rigidez y la densidad.

Fuente: Autores, 2017.

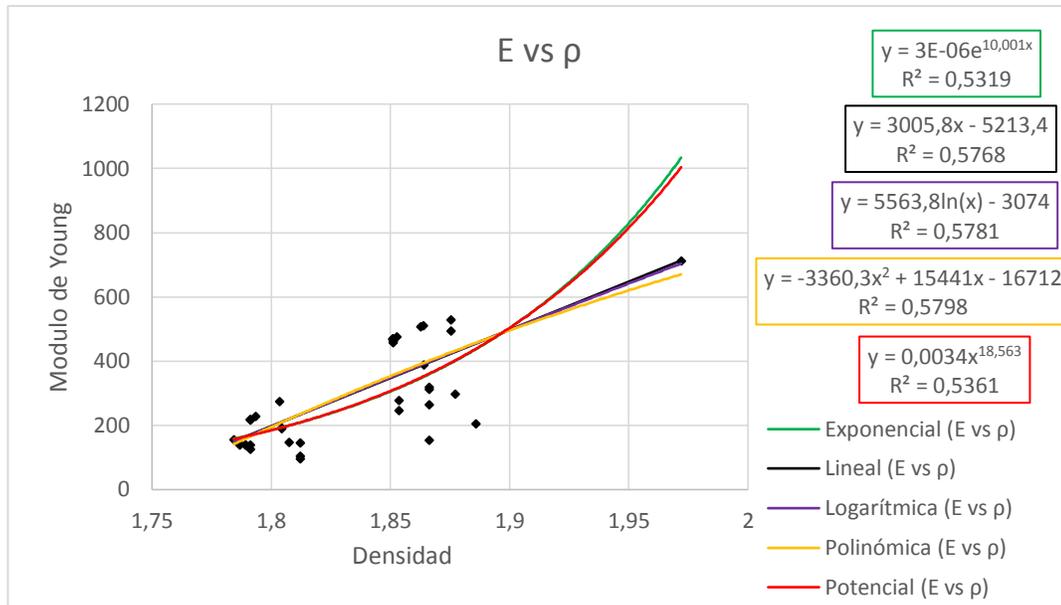


Figura 139. Curvas de correlación entre el módulo de Young y la densidad.

Fuente: Autores, 2017.

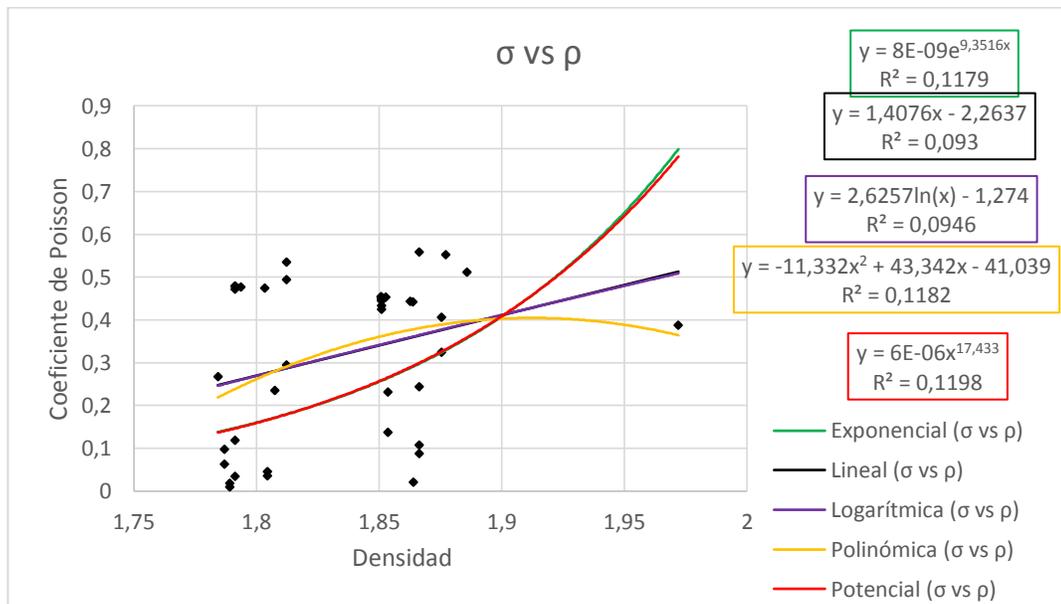


Figura 140. Curvas de correlación entre el coeficiente de Poisson y la densidad.

Fuente: Autores, 2017.

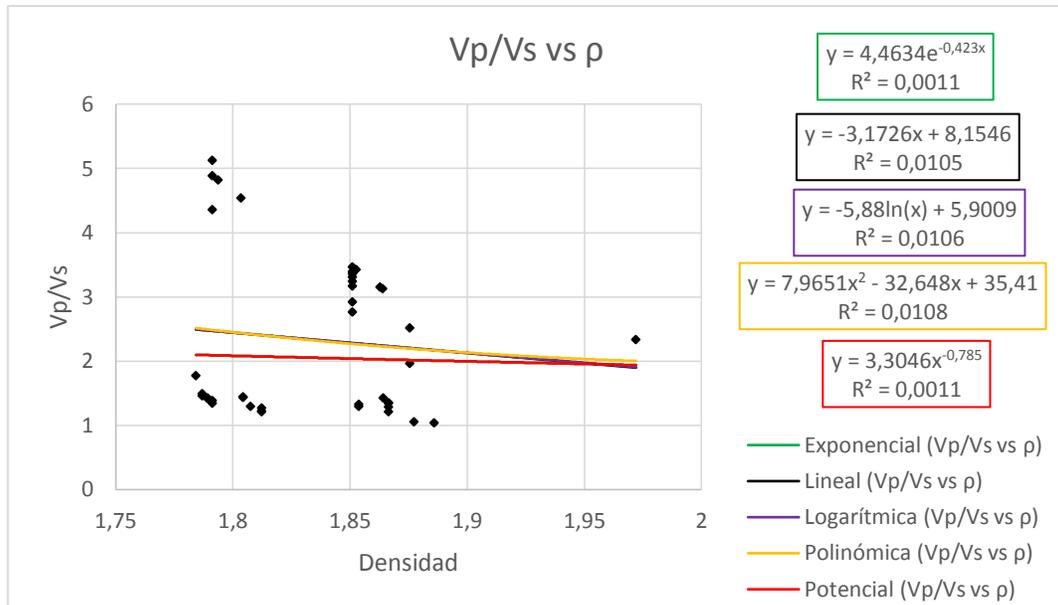


Figura 141. Curvas de correlación entre Vp/Vs y la densidad.

Fuente: Autores, 2017.

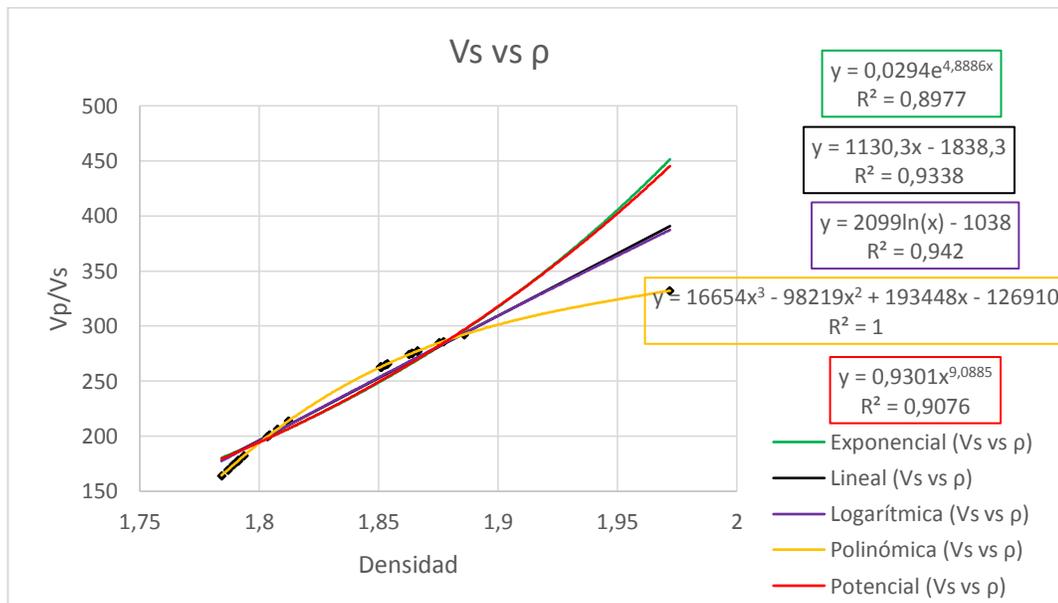


Figura 142. Curvas de correlación entre la velocidad de onda S y la densidad.

Fuente: Autores, 2017.

Arcillolitas

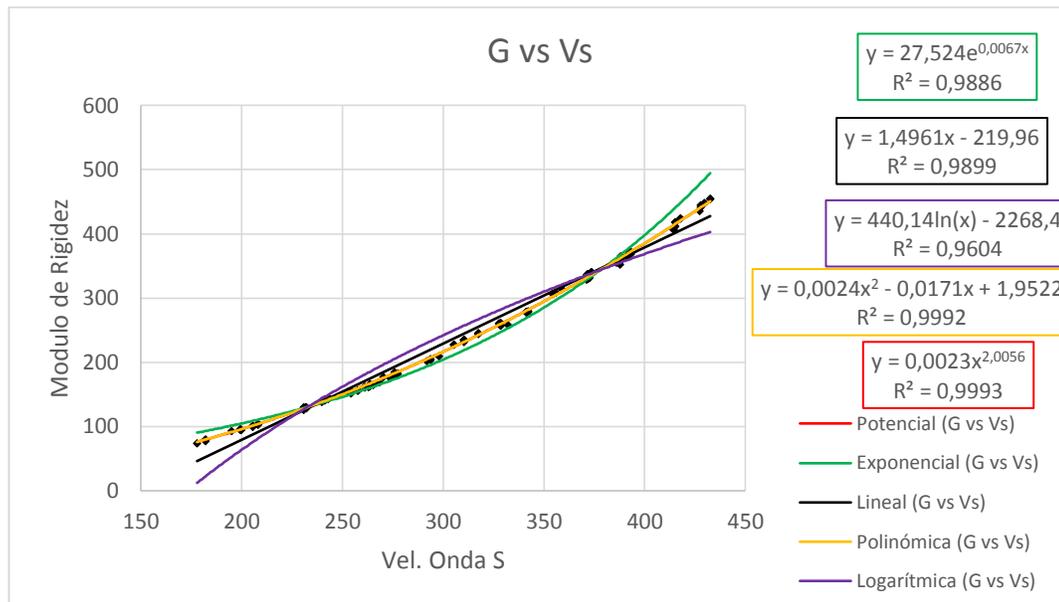


Figura 143. Curvas de correlación entre el módulo de rigidez y la velocidad de onda S.

Fuente: Autores, 2017.

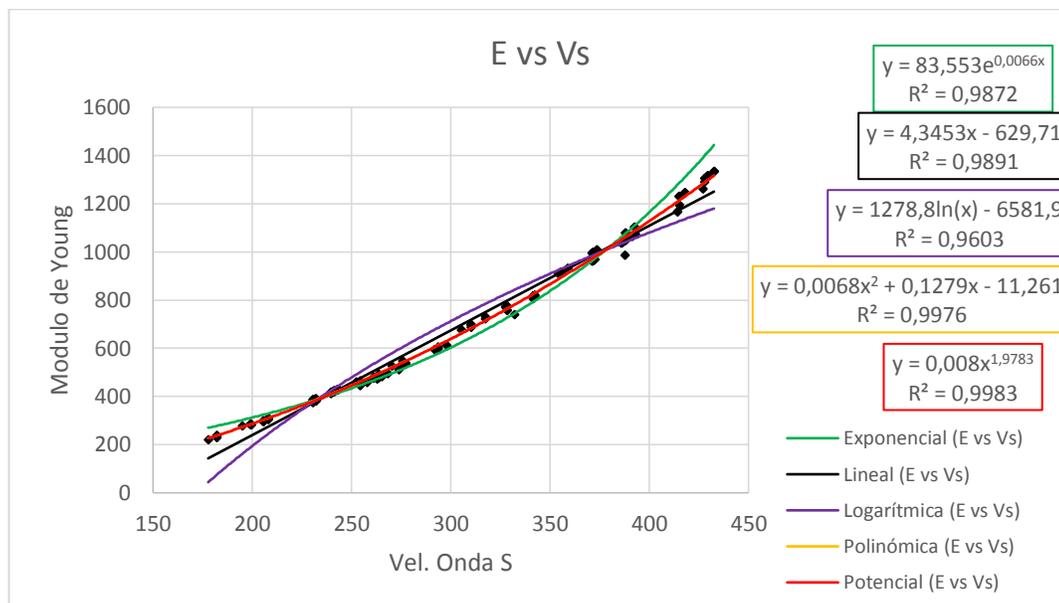


Figura 144. Curvas de correlación entre el módulo de Young y la velocidad de onda S.

Fuente: Autores, 2017.

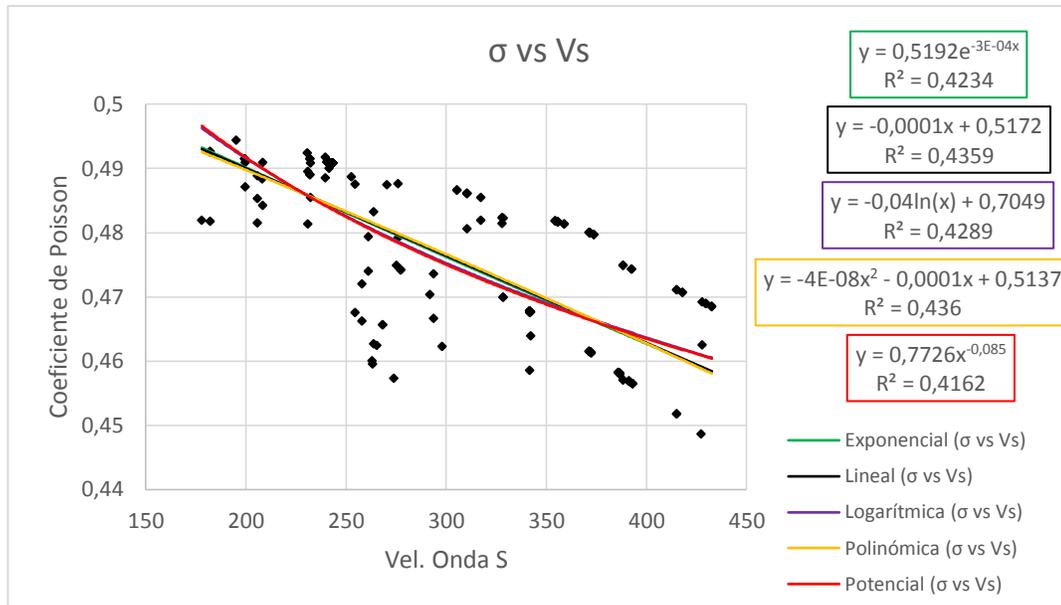


Figura 145. Curvas de correlación entre el coeficiente de Poisson y la velocidad de onda S.

Fuente: Autores, 2017.

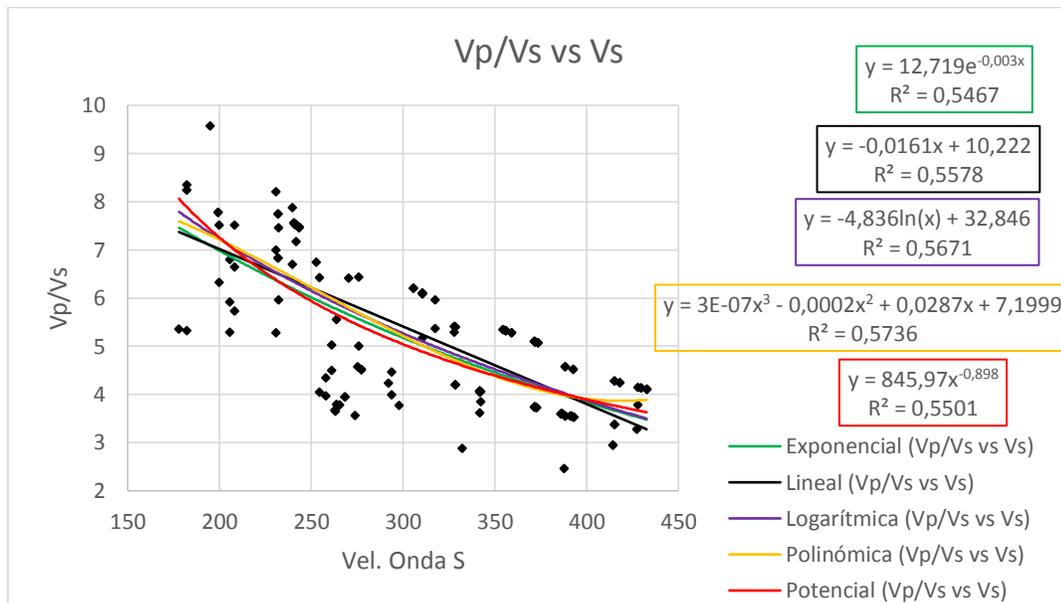


Figura 146. Curvas de correlación entre Vp/Vs y la velocidad de onda S.

Fuente: Autores, 2017.

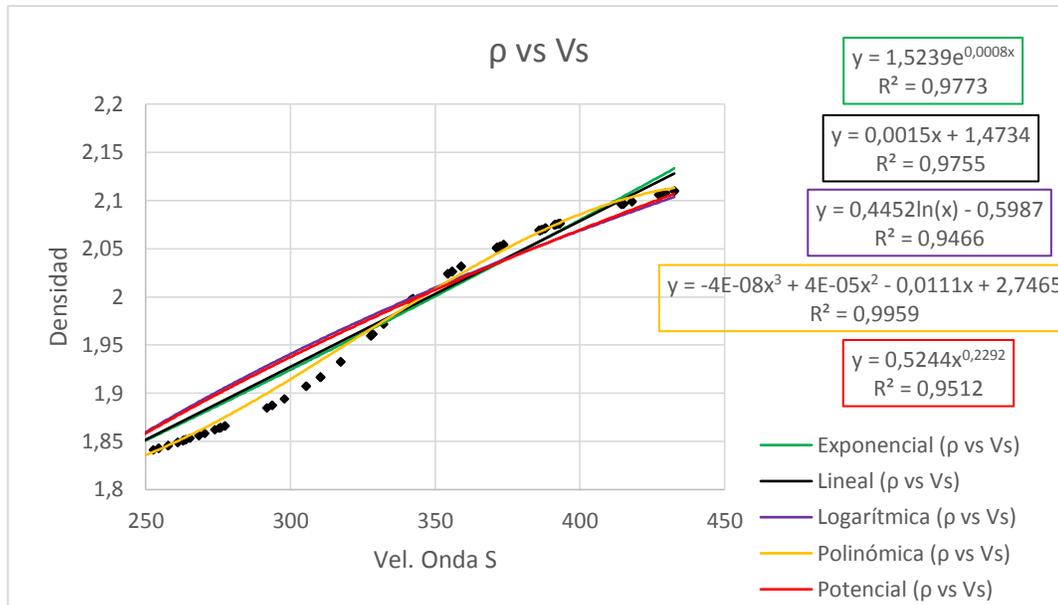


Figura 147. Curvas de correlación entre la densidad y la velocidad de onda S.

Fuente: Autores, 2017.

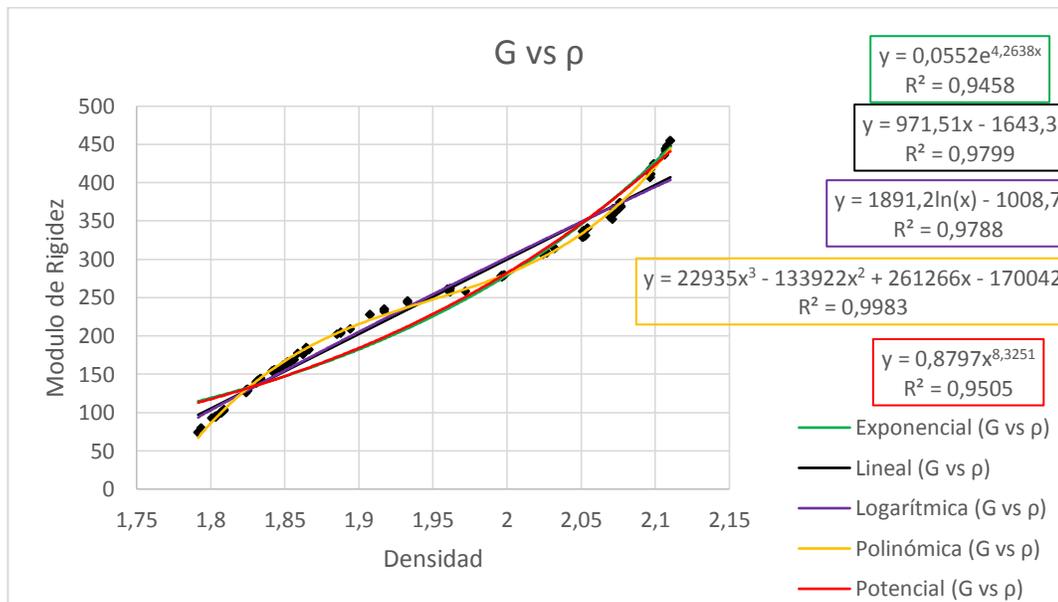


Figura 148. Curvas de correlación entre el módulo de rigidez y la densidad.

Fuente: Autores, 2017.

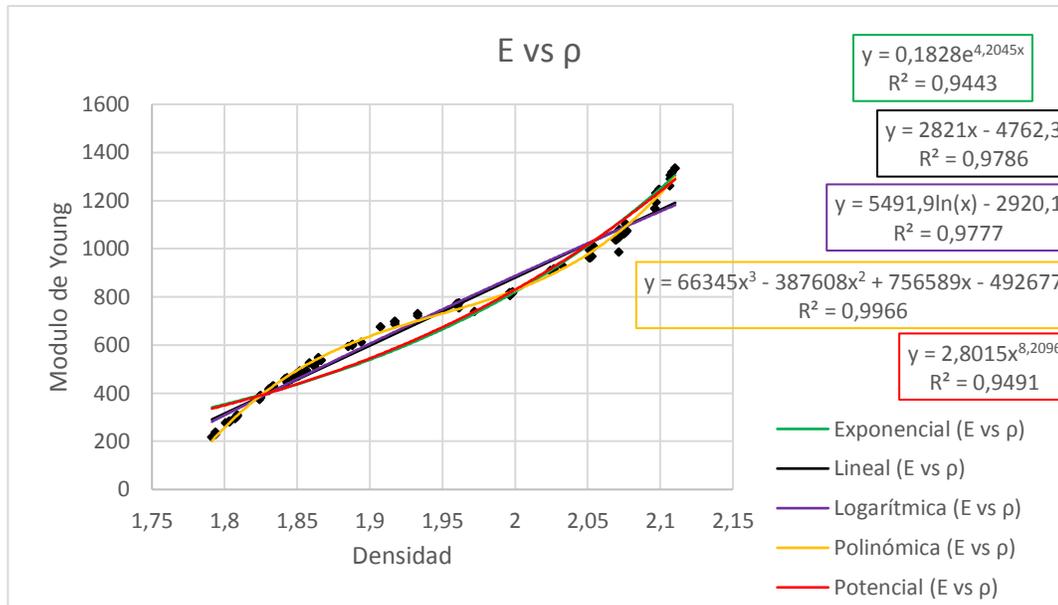


Figura 149. Curvas de correlación entre el módulo de Young y la densidad.

Fuente: Autores, 2017.

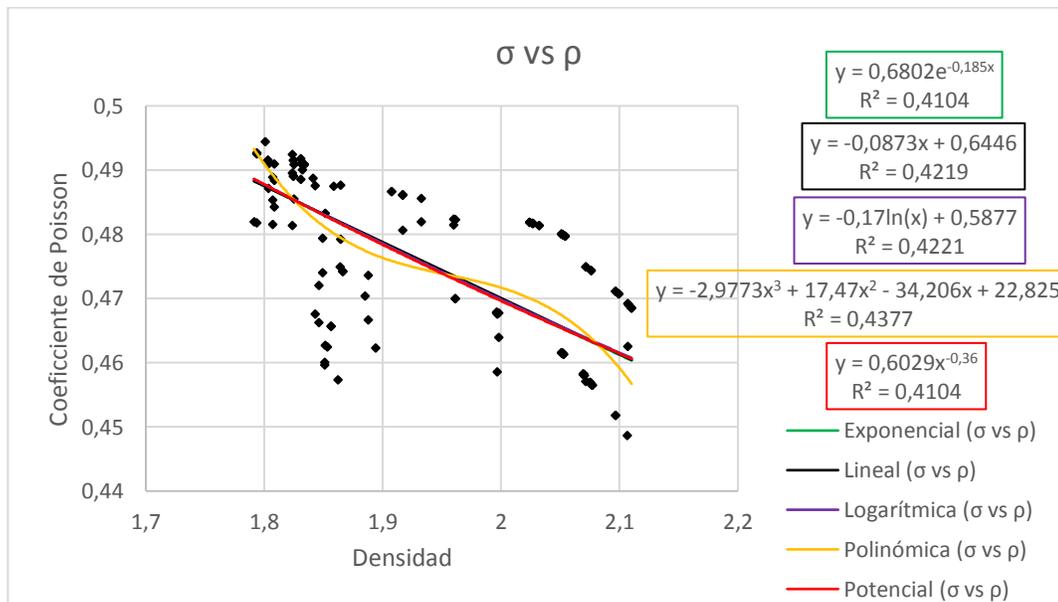


Figura 150. Curvas de correlación entre el coeficiente de Poisson y la densidad.

Fuente: Autores, 2017.

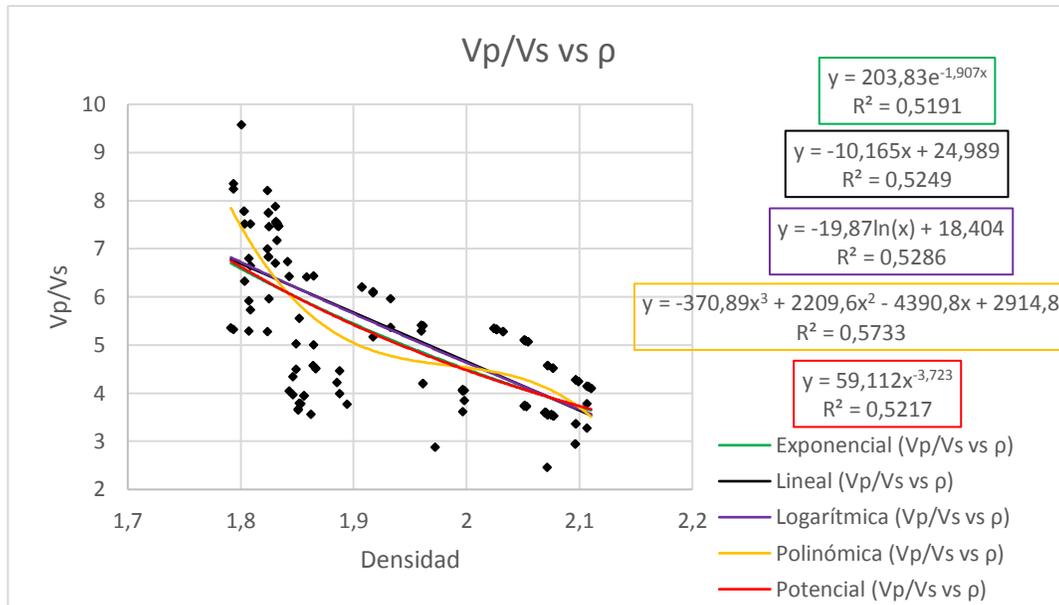


Figura 151. Curvas de correlación entre Vp/Vs y la densidad.

Fuente: Autores, 2017.

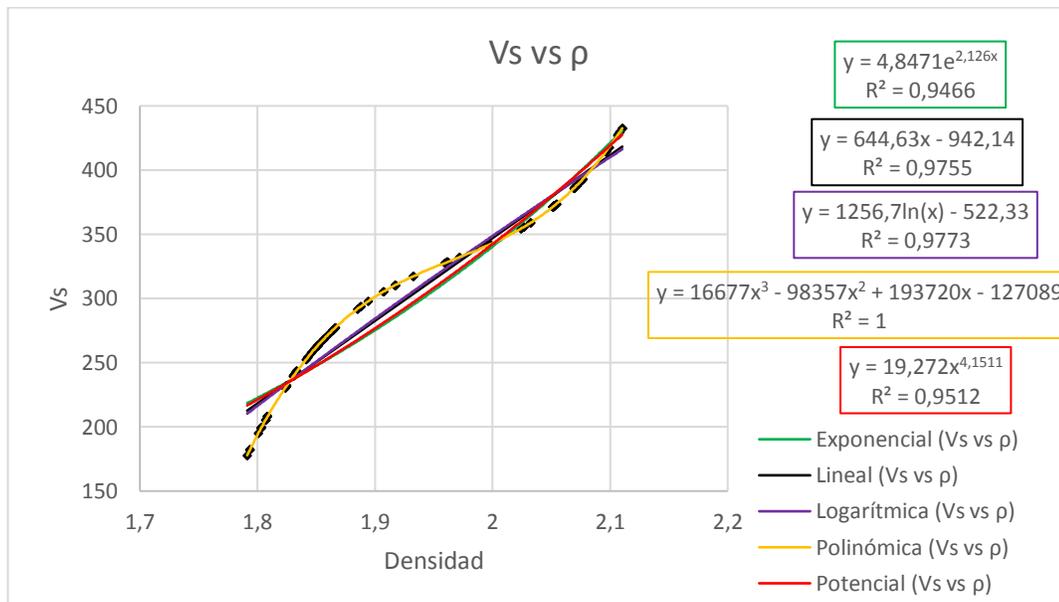


Figura 152. Curvas de correlación entre la velocidad de onda S y la densidad.

Fuente: Autores, 2017.

En los cuadros 7 y 8 se muestra un resumen de los análisis de correlación realizados.

Cuadro 7. Resumen de las ecuaciones de correlación para el material conglomerado.

Parámetro	Conglomerado			
	Vs		ρ	
	Ecuación	R ²	Ecuación	R ²
VP	$V_s 2,2127e^{-3E-04x}$	0,0009	$V_s 4,4634e^{-0,423\rho}$	0,0011
	$V_s (-0,0026V_s + 2,9526)$	0,0099	$V_s(-3,1726\rho + 8,1546)$	0,0105
	$V_s(-0,57\ln(V_s) + 5,4378)$	0,0091	$V_s(-5,88\ln(\rho) + 5,9009)$	0,0106
	$V_s(-4E-05V_s^2 + 0,0149V_s + 0,9956)$	0,0126	$V_s(7,9651\rho^2 - 32,648\rho + 35,41)$	0,0108
	$V_s 2,9153V_s^{-0,065}$	0,0007	$V_s 3,3046\rho^{-0,785}$	0,0011
Vs	Vs	1	$0,0294e^{4,8886\rho}$	0,8977
			$1130,3\rho - 1838,3$	0,9338
			$2099\ln(\rho) - 1038$	0,942
			$16654\rho^3 - 98219\rho^2 + 193448\rho - 126910$	1
			$0,9301\rho^{9,0885}$	0,9076
ρ	$1,6504e^{0,0004V_s}$	0,942	ρ	1
	$V_s 0,0008V_s + 1,6403$	0,9338		
	$V_s 0,1836\ln(V_s) + 0,8356$	0,8977		
	$4E-08V_s^3 - 2E-05V_s^2 + 0,0051V_s + 1,3951$	0,9996		
	$1,0654V_s^{0,0999}$	0,9076		
σ	$0,0277e^{0,0088V_s}$	0,1434	$8E-09e^{9,3516\rho}$	0,1179
	$0,0013V_s + 0,0037$	0,1149	$1,4076\rho - 2,2637$	0,093
	$0,3123\ln(V_s) - 1,3804$	0,1218	$2,6257\ln(\rho) - 1,274$	0,0946
	$3E-06V_s^{2,0507}$	0,1509	$-11,332\rho^2 + 43,342\rho - 41,039$	0,1182
	$-1E-05V_s^2 + 0,0082V_s - 0,757$	0,1333	$6E-06\rho^{17,433}$	0,1198
G	$15,144e^{0,0089V_s}$	0,9937	$2E-06e^{9,8613\rho}$	0,8964
	$1,0771V_s - 121,01$	0,993	$1241,6\rho - 2145,5$	0,9645
	$242,18\ln(V_s) - 1185,2$	0,9768	$2302,8\ln(\rho) - 1264,5$	0,9704
	$0,0023V_s^2 + 0,0082V_s - 1,8619$	0,999	$-3614,2\rho^2 + 14616\rho - 14513$	0,9988
	$0,0021V_s^{2,0178}$	0,9991	$0,0018\rho^{18,333}$	0,9063
E	$33,009e^{0,0088V_s}$	0,5632	$3E-06e^{10,001\rho}$	0,5319
	$2,5427V_s - 297,22$	0,5647	$3005,8\rho - 5213,4$	0,5768
	$568,56\ln(V_s) - 2792,2$	0,5494	$5563,8\ln(\rho) - 3074$	0,5781
	$0,0105V_s^2 - 2,3448V_s + 247,61$	0,5775	$-3360,3\rho^2 + 15441\rho - 16712$	0,5798
	$0,0055V_s^{1,9802}$	0,5552	$0,0034\rho^{18,563}$	0,5361

Fuente: Autores, 2017.

Cuadro 8. Resumen de las ecuaciones de correlación para las arcillolitas.

Parámetro	Pan de Jabón			
	Vs		ρ	
	Ecuación	R ²	Ecuación	R ²
VP	$V_s 12,719e^{-0,003V_s}$	0,5467	$V_s 203,83e^{-1,907\rho}$	0,5191
	$V_s(-0,0161V_s + 10,222)$	0,5578	$V_s(-10,165\rho + 24,989)$	0,5249
	$V_s(-4,836\ln(V_s) + 32,846)$	0,5671	$V_s(-19,87\ln(\rho) + 18,404)$	0,5286
	$V_s(3E-07V_s^3 - 0,0002V_s^2 + 0,0287V_s + 7,1999)$	0,5736	$V_s(-370,89\rho^3 + 2209,6\rho^2 - 4390,8\rho + 2914,8)$	0,5733
	$V_s 845,97V_s^{-0,898}$	0,5501	$V_s 59,112\rho^{-3,723}$	0,5217
Vs	Vs	1	$4,8471e^{2,126\rho}$	0,9466
			$644,63\rho - 942,14$	0,9755
			$1256,7\ln(\rho) - 522,33$	0,9773
			$16677\rho^3 - 98357\rho^2 + 193720\rho - 127089$	1
			$19,272\rho^{4,1511}$	0,9512
ρ	$1,5239e^{0,0008V_s}$	0,9773	ρ	1
	$0,0015V_s + 1,4734$	0,9755		
	$0,4452\ln(V_s) - 0,5987$	0,9466		
	$-4E-08V_s^3 + 4E-05V_s^2 - 0,0111V_s + 2,7465$	0,9959		
	$0,5244V_s^{0,2292}$	0,9512		
σ	$0,5192e^{-3E-04V_s}$	0,4234	$0,6802e^{-0,185\rho}$	0,4104
	$-0,0001V_s + 0,5172$	0,4359	$-0,0873\rho + 0,6446$	0,4219
	$-0,04\ln(V_s) + 0,7049$	0,4289	$-0,17\ln(\rho) + 0,5877$	0,4221
	$-4E-08V_s^2 - 0,0001V_s + 0,5137$	0,436	$-2,9773\rho^3 + 17,47\rho^2 - 34,206\rho + 22,825$	0,4377
	$0,7726V_s^{-0,085}$	0,4162	$0,6029\rho^{-0,36}$	0,4104
G	$27,524e^{0,0067V_s}$	0,9886	$0,0552e^{4,2638\rho}$	0,9458
	$1,4961V_s - 219,96$	0,9899	$971,51\rho - 1643,3$	0,9799
	$440,14\ln(V_s) - 2268,4$	0,9604	$1891,2\ln(\rho) - 1008,7$	0,9788
	$0,0024V_s^2 - 0,0171V_s + 1,9522$	0,9992	$22935\rho^3 - 133922\rho^2 + 261266\rho - 170042$	0,9983
	$0,0023V_s^{2,0056}$	0,9993	$0,8797\rho^{8,3251}$	0,9505
E	$83,553e^{0,0066V_s}$	0,9872	$0,1828e^{4,2045\rho}$	0,9443
	$4,3453V_s - 629,71$	0,9891	$2821\rho - 4762,3$	0,9786
	$1278,8\ln(V_s) - 6581,9$	0,9603	$5491,9\ln(\rho) - 2920,1$	0,9777
	$0,0068V_s^2 + 0,1279V_s - 11,261$	0,9976	$66345\rho^3 - 387608\rho^2 + 756589\rho - 492677$	0,9966
	$0,008V_s^{1,9783}$	0,9983	$2,8015\rho^{8,2096}$	0,9491

Fuente: Autores, 2017.

Al analizar los diferentes coeficientes de correlación para cada parámetro, son evidentes dos aspectos: inicialmente que las variables velocidad de onda P (V_p) y coeficiente de Poisson (σ) son las que poseen el mayor porcentaje de error, lo cual es evidente teniendo en cuenta que las gráficas no muestran una tendencia definida con relación a las variables de Densidad y Velocidad de Onda S, esto no significa necesariamente que sean valores aleatorios o atípicos, en cambio puede que estas variables posean una mayor relación con otras variables, por ejemplo en la figura 153 se puede apreciar como el coeficiente de Poisson (σ) se ajusta perfectamente a las la relación V_p/V_s , y es precisamente porque este parámetro depende de estas dos variables. En el caso de la Velocidad de Onda P, el asunto es un poco más indeterminado, debido a que como se ha mencionado en referencias el Valor de la Onda P, llega ser entre un 60% y un 140% el valor de la onda S. El segundo aspecto evidente de los datos es que en general, el coeficiente de correlación mejora a medida que se incrementa la profundidad, como es el caso del segundo tipo de materiales característico de la formación algodonada, las arcillolitas, denominadas comúnmente en la ciudad como “Pan de jabón”, lo que se debe esencialmente a que este material es más homogéneo que los demás materiales de la formación, que corresponden a materiales conglomeraticos.

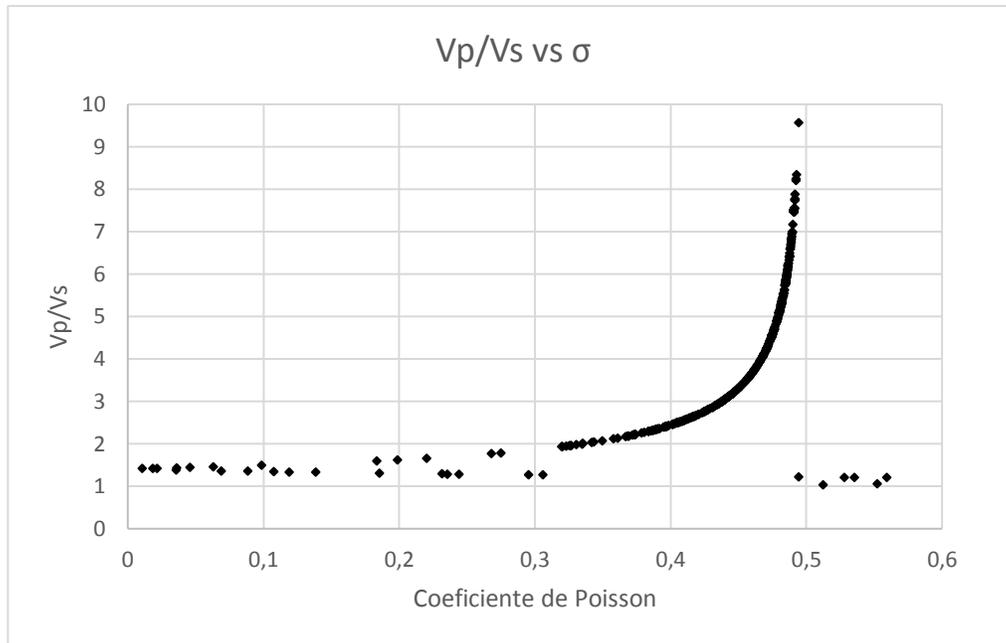


Figura 153. Relación V_p/V_s respecto al coeficiente de Poisson.

Fuente: Autores, 2017.

Una vez se ha establecido la relación entre los parámetros y su respectiva variación, para los diferentes sectores en estudio, ahora se analiza el comportamiento de los datos en todo su conjunto. Lo anterior permitirá establecer un comportamiento de los parámetros analizados a nivel de la formación algodonada, para los sectores en los que esta se ha estudiado. En las figuras 154 a 173 se muestra el análisis estadístico de los datos por tipo de material para el conjunto de sitios analizados.

Formación algodonal

Material Conglomeratico

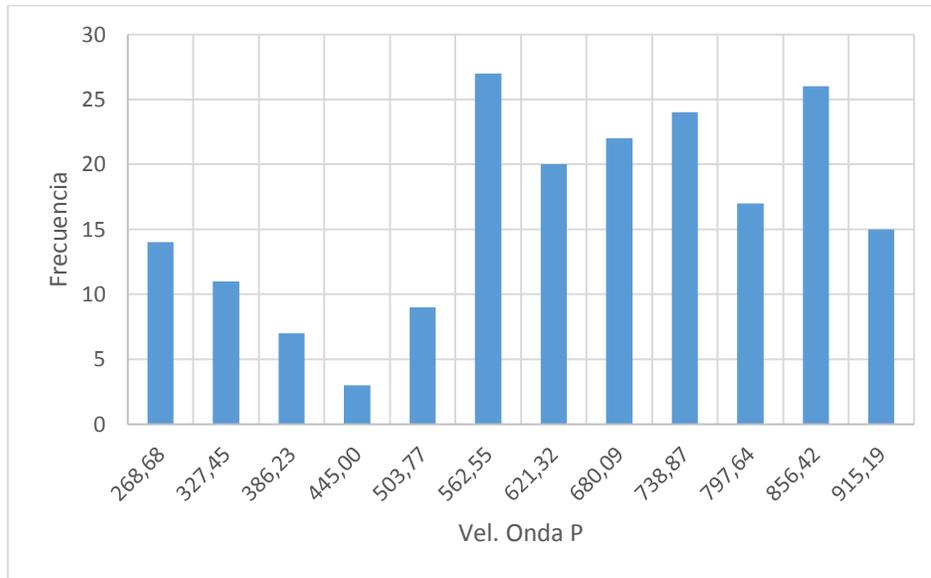


Figura 154. Histograma de valores de velocidad de onda P.

Fuente: Autores, 2017.

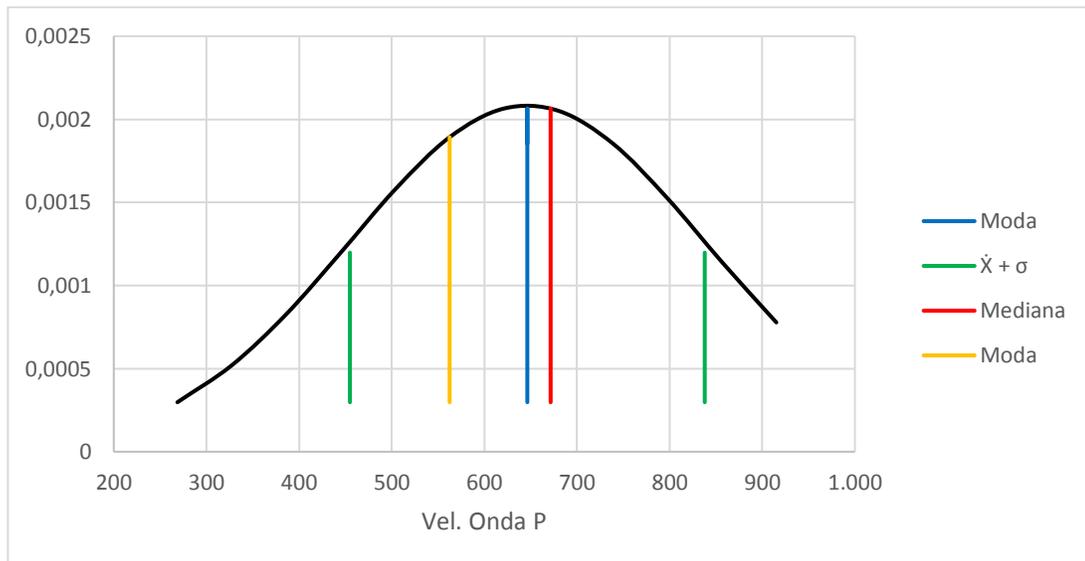


Figura 155. Distribución de valores de velocidad de onda P.

Fuente: Autores, 2017.

Tabla 23. Medidas estadísticas de los valores de velocidad de onda P.

<i>Resumen Vp</i>	
Media	646,426
Error típico	13,715
Mediana	671,570
Moda	562,55
Desviación estándar	191,515
Varianza de la muestra	36677,831
Curtosis	-0,623
Coefficiente de asimetría	-0,546
Rango	705,283
Mínimo	239,292
Máximo	944,575
Suma	126053,102
Cuenta	195,000
Nivel de confianza (95,0%)	27,049

Fuente: Autores, 2017.

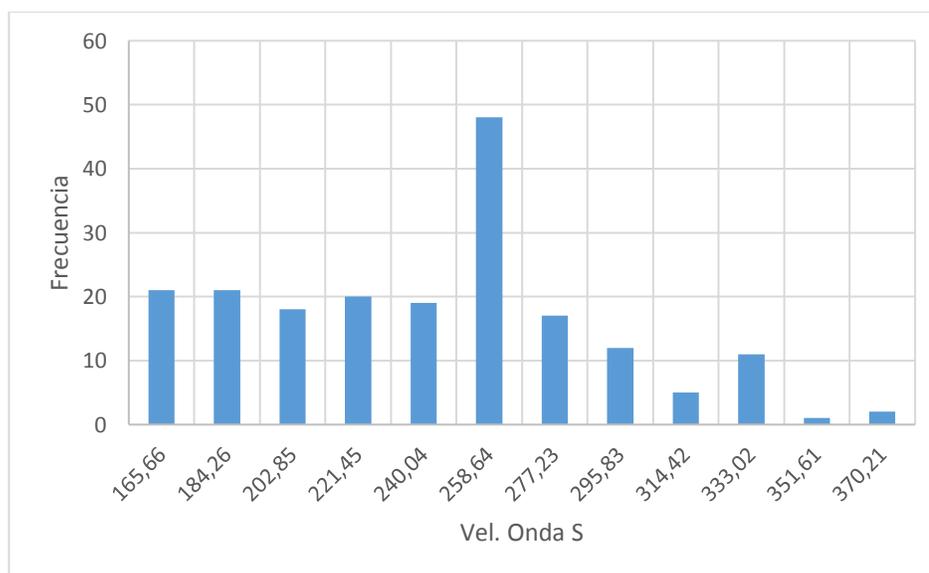


Figura 156. Histograma de valores de velocidad de onda S.

Fuente: Autores, 2017.

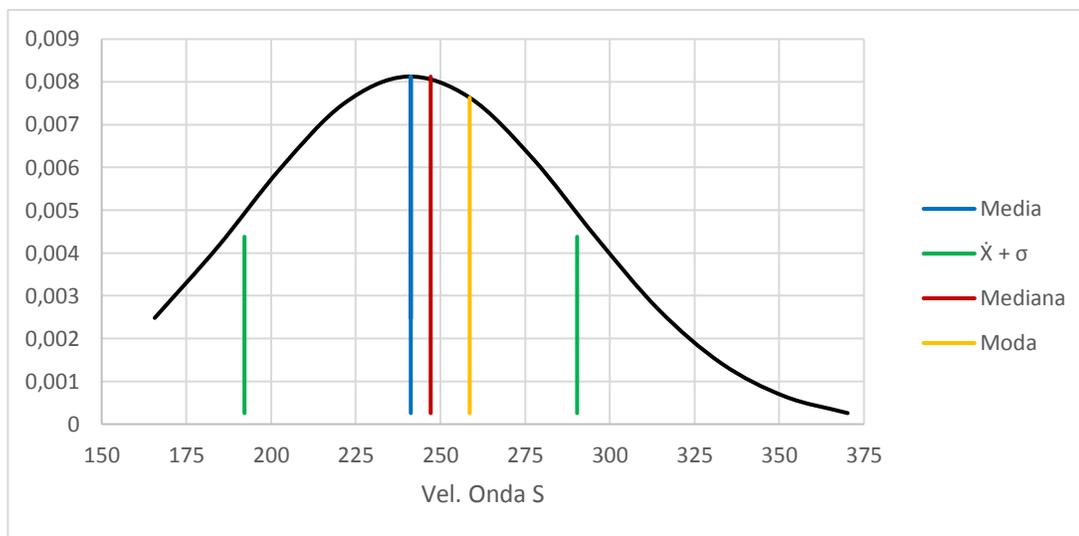


Figura 157. Distribución de valores de velocidad de onda S.

Fuente: Autores, 2017.

Tabla 24. Medidas estadísticas de los valores de velocidad de onda S.

<i>Resumen Vs</i>	
Media	241,248
Error típico	3,516
Mediana	247,124
Moda	258,64
Desviación estándar	49,093
Varianza de la muestra	2410,095
Curtosis	-0,434
Coefficiente de asimetría	0,218
Rango	223,142
Mínimo	156,362
Máximo	379,504
Suma	47043,278
Cuenta	195,000
Nivel de confianza (95,0%)	6,934

Fuente: Autores, 2017.

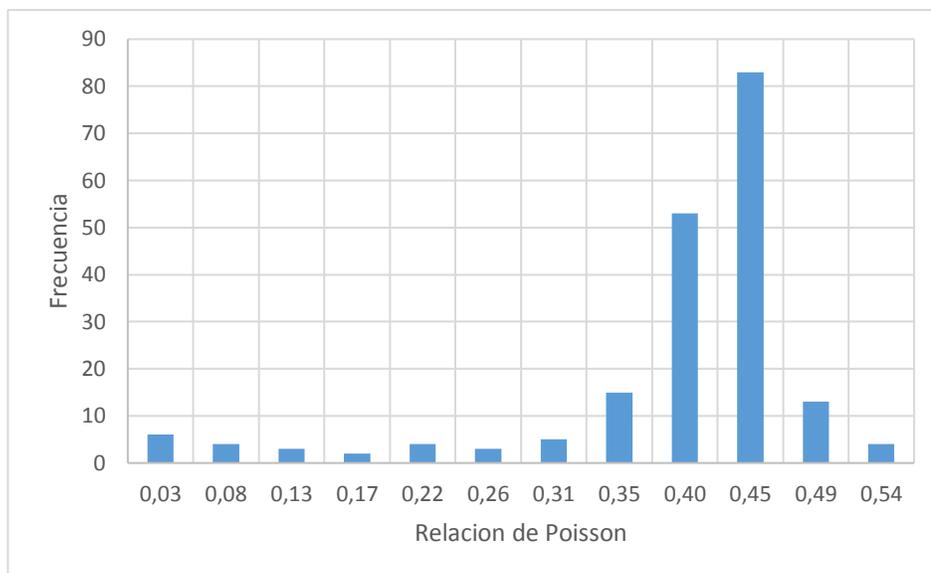


Figura 158. Histograma de valores de coeficiente de Poisson.

Fuente: Autores, 2017.

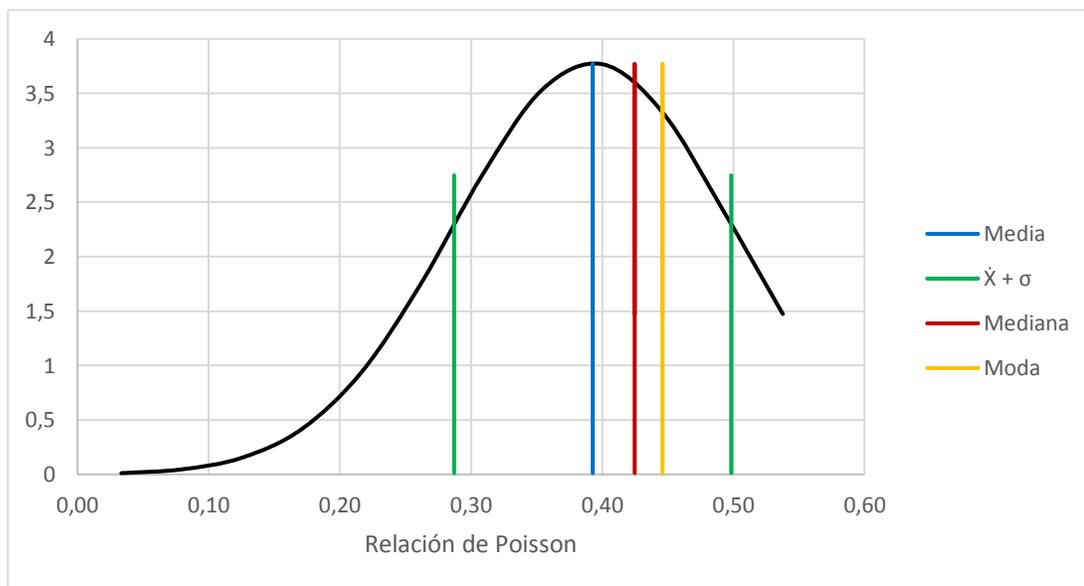


Figura 159. Distribución de valores de coeficiente de Poisson.

Fuente: Autores, 2017.

Tabla 25. Medidas estadísticas de los valores de coeficiente de Poisson.

<i>Resumen σ</i>	
Media	0,393
Error típico	0,008
Mediana	0,425
Moda	0,452
Desviación estándar	0,106
Varianza de la muestra	0,011
Curtosis	4,409
Coefficiente de asimetría	-2,153
Rango	0,549
Mínimo	0,011
Máximo	0,559
Suma	76,590
Cuenta	195,000
Nivel de confianza (95,0%)	0,015

Fuente: Autores, 2017.

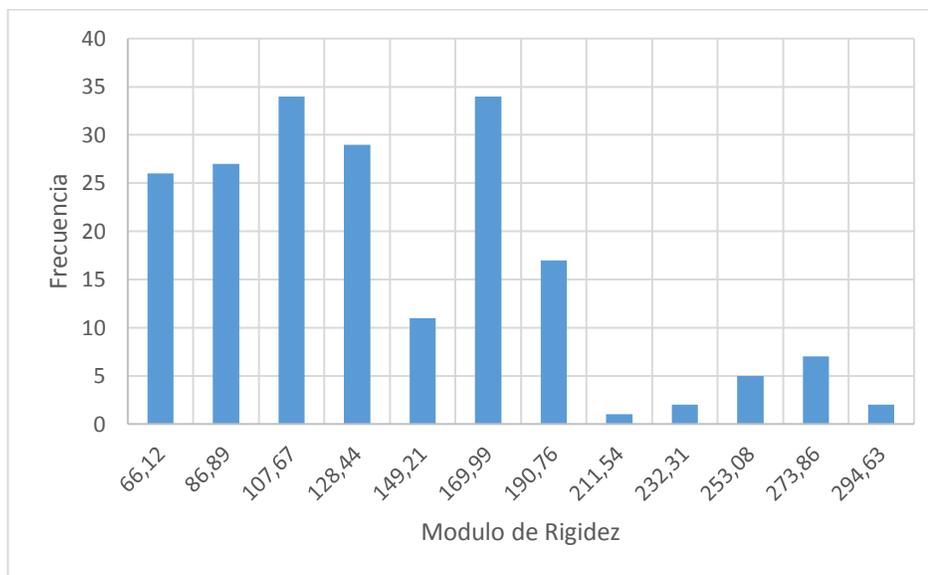


Figura 160. Histograma de valores de módulo de rigidez.

Fuente: Autores, 2017.

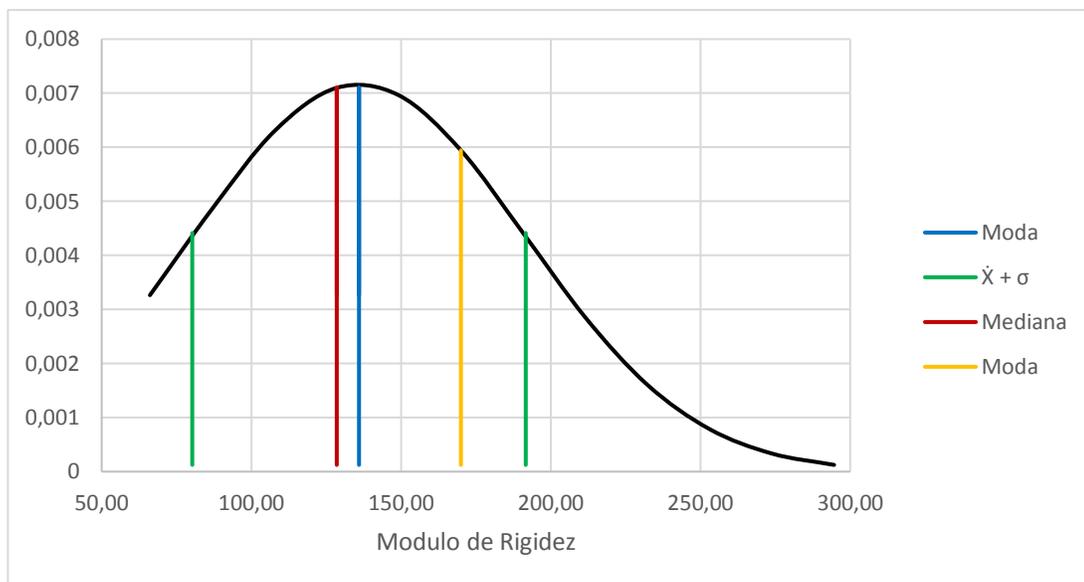


Figura 161. Distribución de valores de módulo de rigidez.

Fuente: Autores, 2017.

Tabla 26. Medidas estadísticas de los valores de módulo de rigidez.

<i>Resumen G</i>	
Media	135,948
Error típico	3,988
Mediana	128,518
Moda	169,992
Desviación estándar	55,696
Varianza de la muestra	3102,039
Curtosis	0,371
Coefficiente de asimetría	0,822
Rango	249,286
Mínimo	55,731
Máximo	305,017
Suma	26509,833
Cuenta	195,000
Nivel de confianza (95,0%)	7,866

Fuente: Autores, 2017.

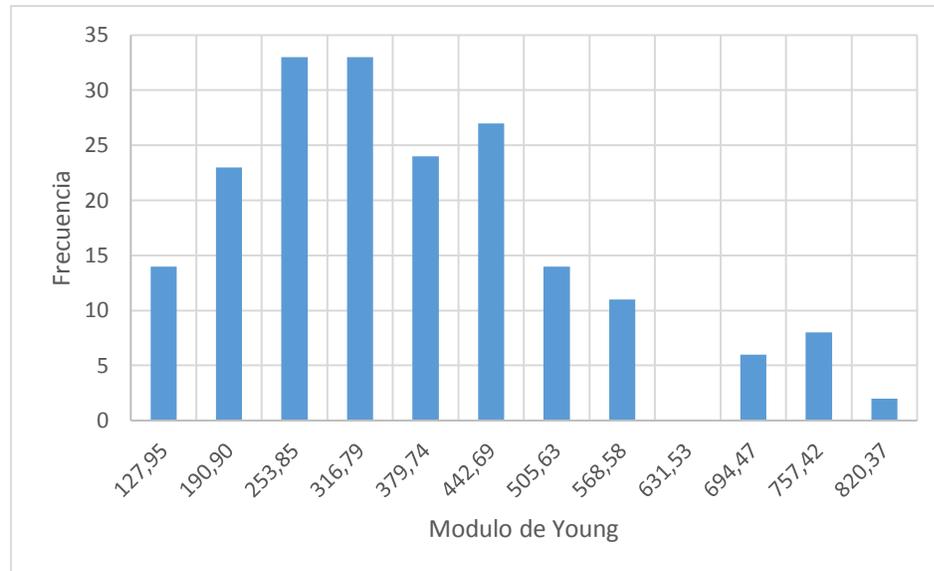


Figura 162. Histograma de valores de módulo de Young.

Fuente: Autores, 2017.

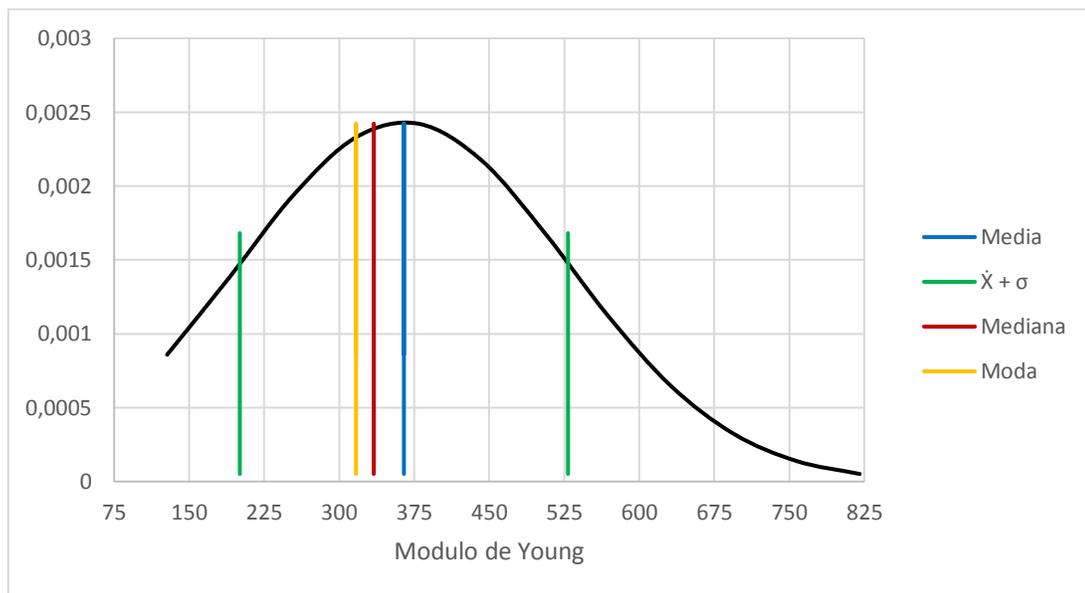


Figura 163. Distribución de valores de módulo de Young.

Fuente: Autores, 2017.

Tabla 27. Medidas estadísticas de los valores de módulo de elasticidad.

<i>Resumen E</i>	
Media	364,708
Error típico	11,749
Mediana	334,561
Moda	316,791
Desviación estándar	164,063
Varianza de la muestra	26916,668
Curtosis	0,306
Coefficiente de asimetría	0,814
Rango	755,360
Mínimo	96,480
Máximo	851,840
Suma	71118,084
Cuenta	195,000
Nivel de confianza (95,0%)	23,172

Fuente: Autores, 2017.

Arcillolitas

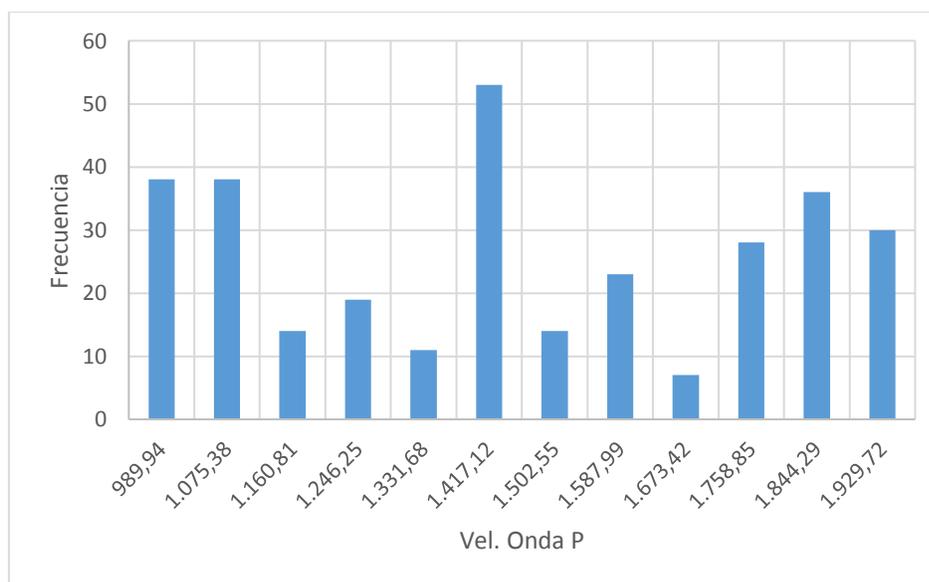


Figura 164. Histograma de valores de velocidad de onda P.

Fuente: Autores, 2017.

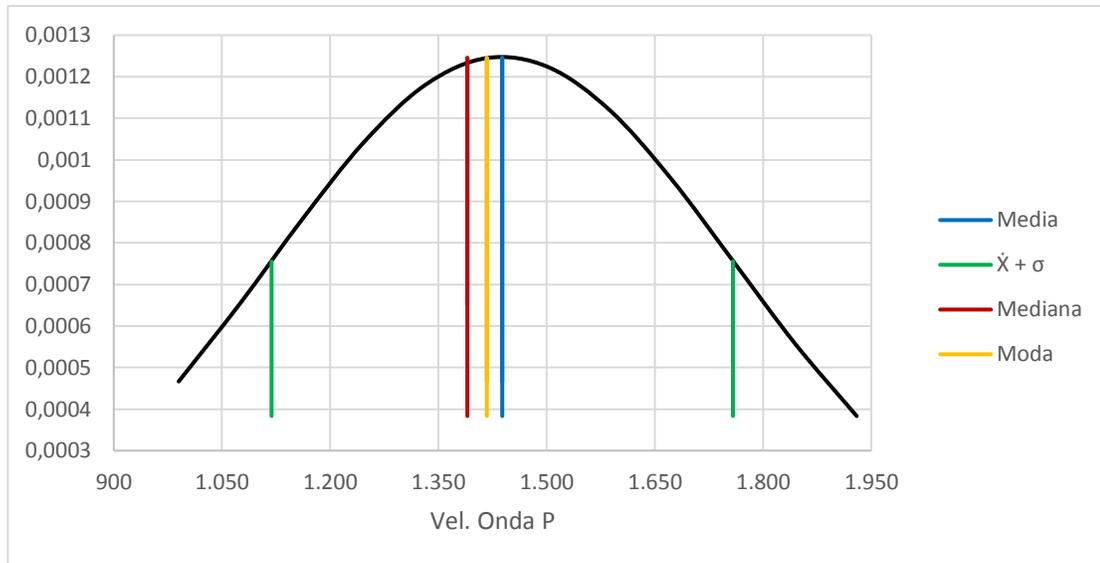


Figura 165. Distribución de valores de velocidad de onda P.

Fuente: Autores, 2017.

Tabla 28. Medidas estadísticas de los valores de velocidad de onda P.

<i>Resumen Vp</i>	
Media	1438,453
Error típico	18,131
Mediana	1390,100
Moda	1417,116
Desviación estándar	319,735
Varianza de la muestra	102230,526
Curtosis	-1,317
Coefficiente de asimetría	0,015
Rango	1025,214
Mínimo	947,226
Máximo	1972,440
Suma	447358,878
Cuenta	311,000
Nivel de confianza (95,0%)	35,674

Fuente: Autores, 2017.

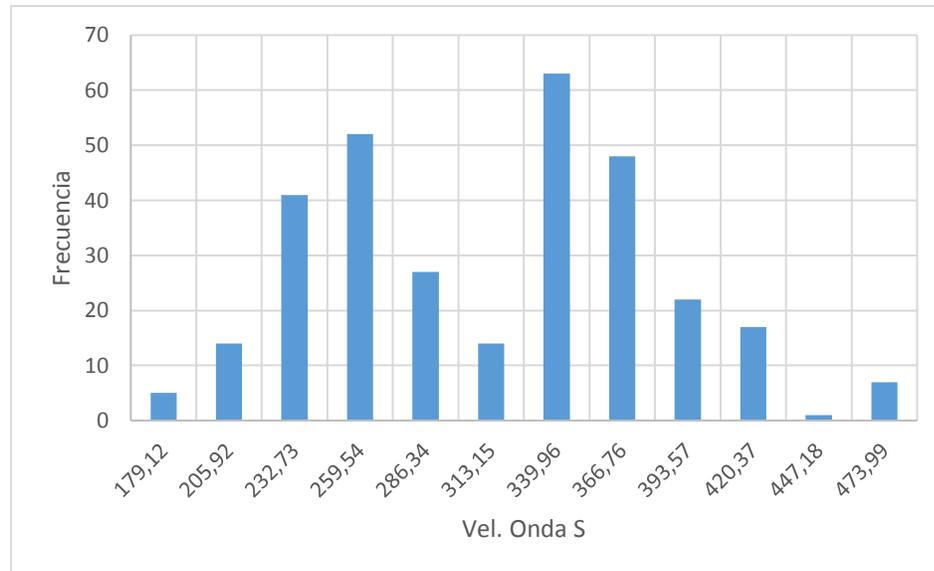


Figura 166. Histograma de valores de velocidad de onda S.

Fuente: Autores, 2017.

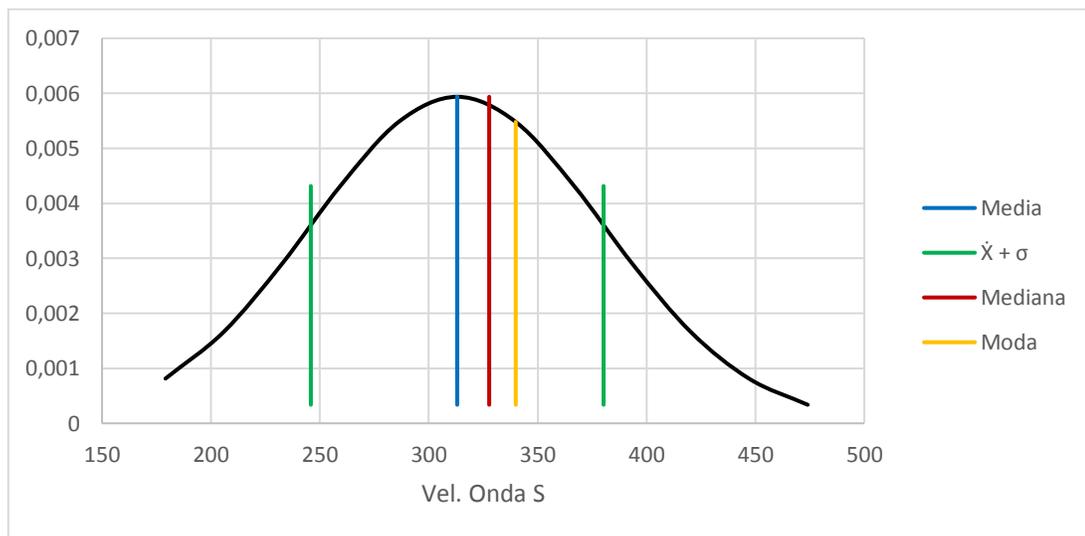


Figura 167. Distribución de valores de velocidad de onda S.

Fuente: Autores, 2017.

Tabla 29. Medidas estadísticas de los valores de velocidad de onda S.

<i>Resumen Vs</i>	
Media	313,079
Error típico	3,810
Mediana	327,774
Moda	339,956
Desviación estándar	67,195
Varianza de la muestra	4515,190
Curtosis	-0,592
Coefficiente de asimetría	0,186
Rango	321,674
Mínimo	165,715
Máximo	487,389
Suma	97367,584
Cuenta	311,000
Nivel de confianza (95,0%)	7,497

Fuente: Autores, 2017.

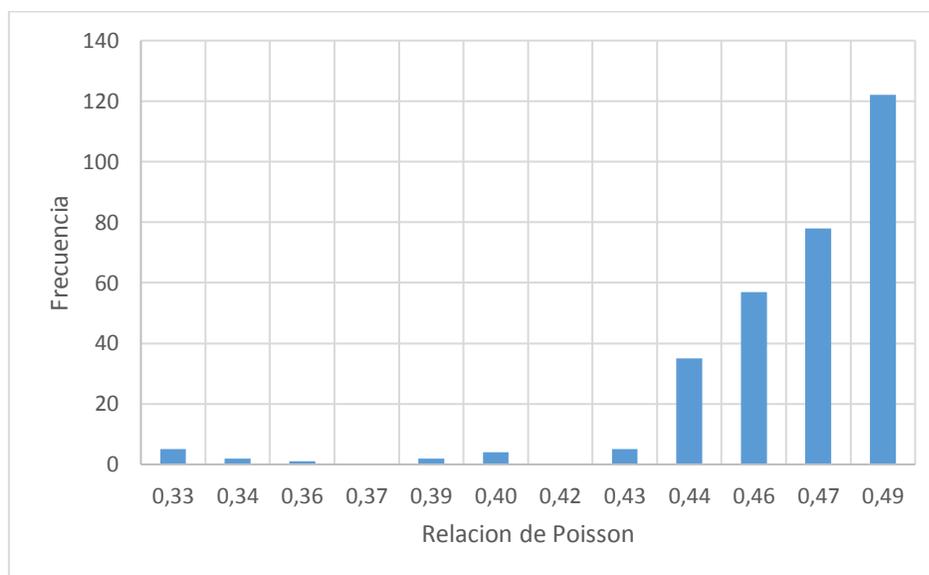


Figura 168. Histograma de valores de coeficiente de Poisson.

Fuente: Autores, 2017.

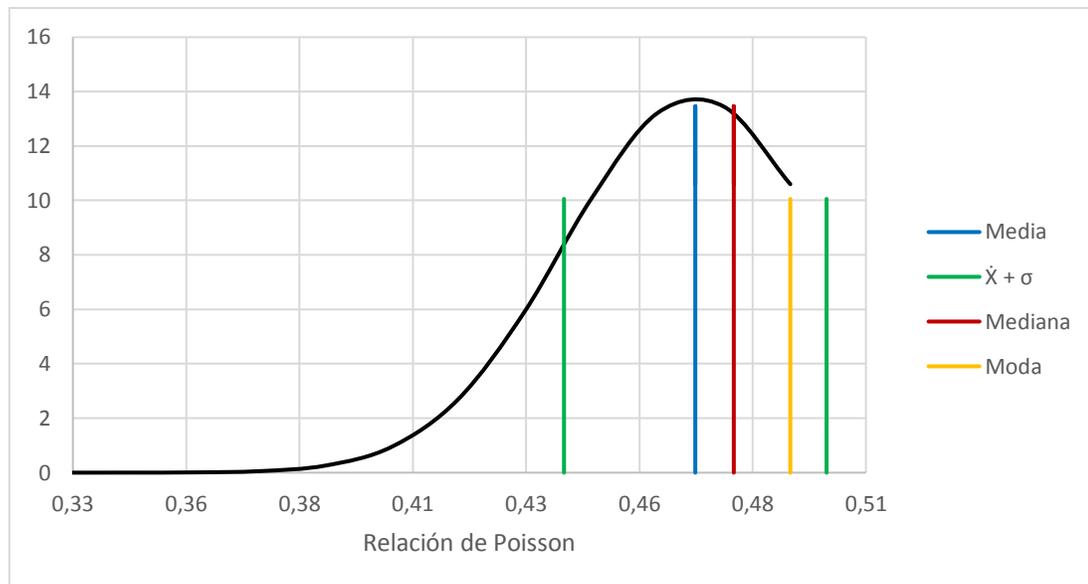


Figura 169. Distribución de valores de coeficiente de Poisson.

Fuente: Autores, 2017.

Tabla 30. Medidas estadísticas de los valores de módulo de Poisson.

<i>Resumen σ</i>	
Media	0,467
Error típico	0,002
Mediana	0,476
Moda	0,488
Desviación estándar	0,029
Varianza de la muestra	0,001
Curtosis	11,620
Coefficiente de asimetría	-3,050
Rango	0,175
Mínimo	0,320
Máximo	0,494
Suma	145,345
Cuenta	311,000
Nivel de confianza (95,0%)	0,003

Fuente: Autores, 2017.

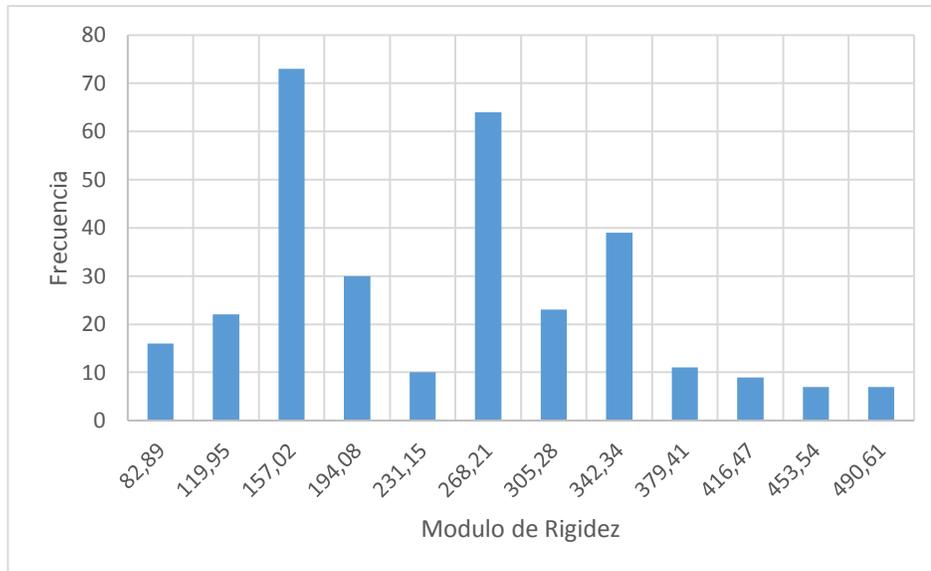


Figura 170. Histograma de valores de módulo de rigidez.

Fuente: Autores, 2017.

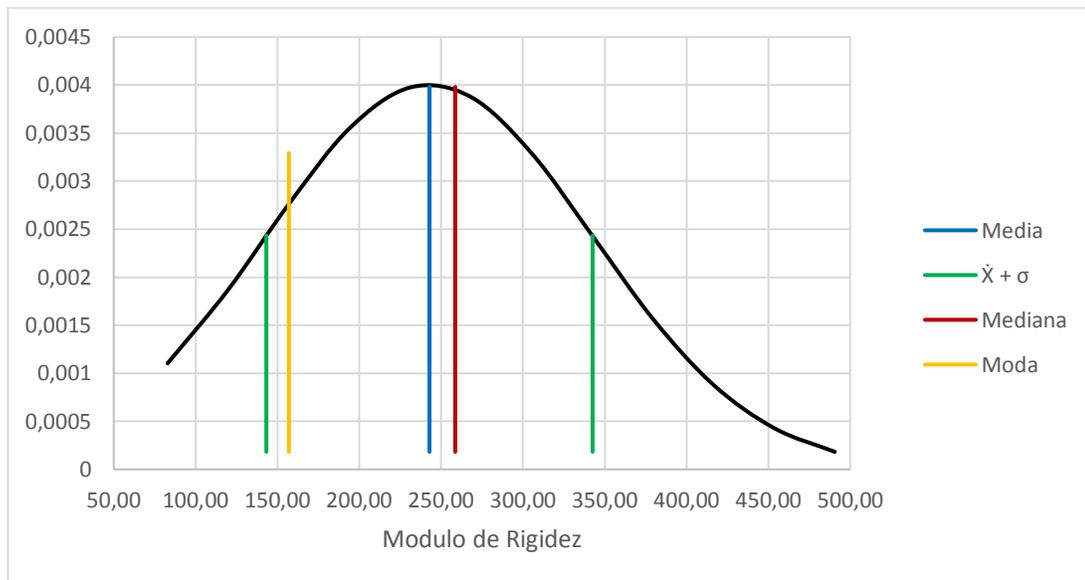


Figura 171. Distribución de valores de módulo de rigidez.

Fuente: Autores, 2017.

Tabla 31. Medidas estadísticas de los valores de módulo de rigidez.

<i>Resumen G</i>	
Media	242,919
Error típico	5,652
Mediana	258,647
Moda	157,018
Desviación estándar	99,682
Varianza de la muestra	9936,516
Curtosis	-0,530
Coefficiente de asimetría	0,446
Rango	444,782
Mínimo	64,355
Máximo	509,137
Suma	75547,746
Cuenta	311,000
Nivel de confianza (95,0%)	11,122

Fuente: Autores, 2017.

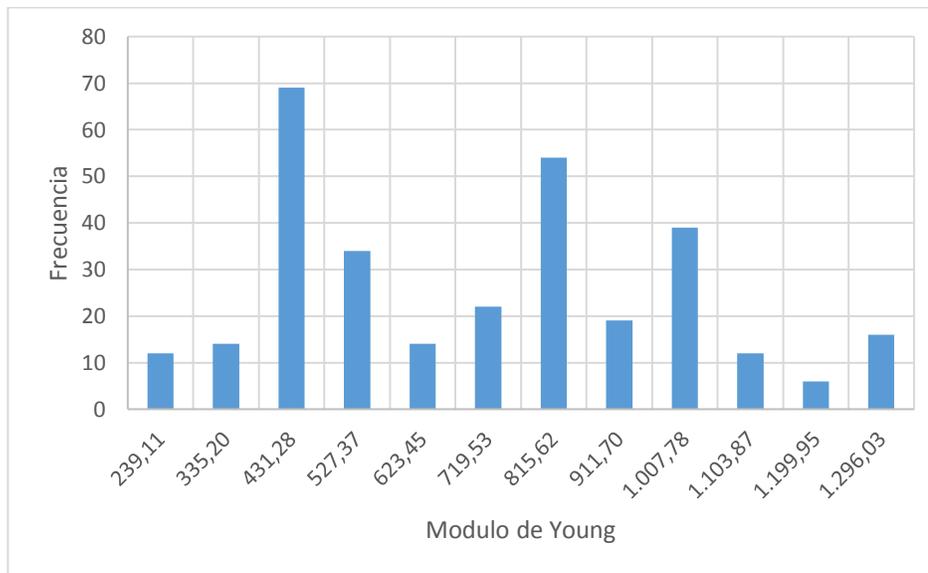


Figura 172. Histograma de valores de módulo de Young.

Fuente: Autores, 2017.

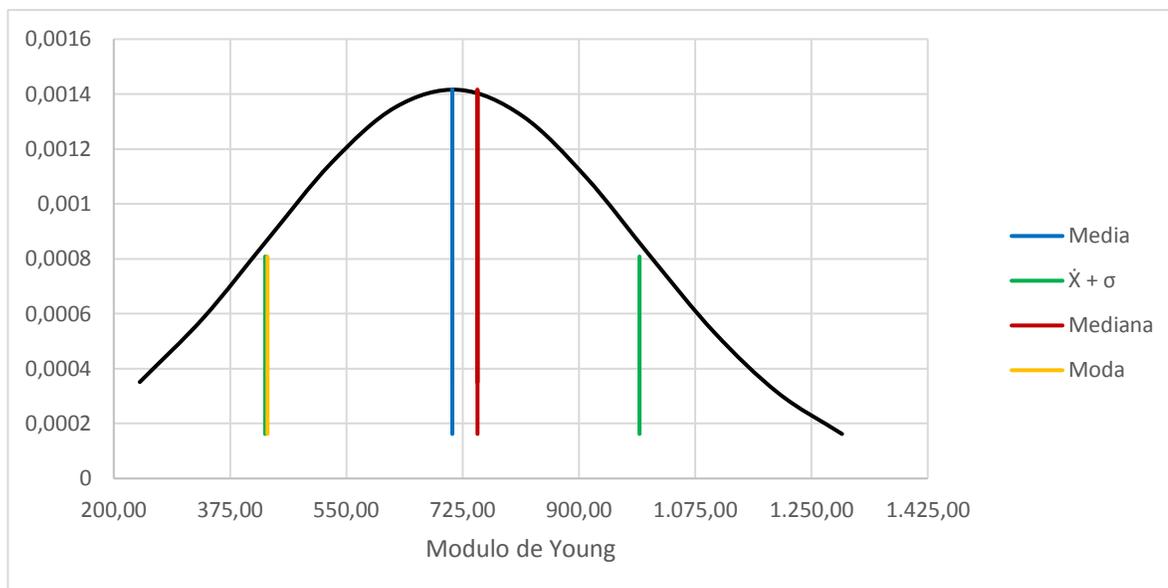


Figura 173. Distribución de valores de módulo de Young.

Fuente: Autores, 2017.

Tabla 32. Medidas estadísticas de los valores de módulo de elasticidad.

<i>Resumen E</i>	
Media	709,512
Error típico	15,975
Mediana	747,431
Moda	431,282
Desviación estándar	281,714
Varianza de la muestra	79362,673
Curtosis	-0,820
Coficiente de asimetría	0,337
Rango	1153,002
Mínimo	191,073
Máximo	1344,075
Suma	220658,205
Cuenta	311,000
Nivel de confianza (95,0%)	31,432

Fuente: Autores, 2017.

Una vez analizado el comportamiento individual de los datos, ya sea por zonas de estudio o abarcando todos estos datos en un mismo grupo de datos al que llamamos formación algodonol, se procede a verificar la variación de cada zona con respecto al grupo total de datos, siendo esto un indicador de la consistencia de los datos en la formación algodonol. En las tablas 33 y 34 y las figuras 174 a 183 se puede apreciar el análisis realizado.

Tabla 33. Resumen de variaciones de los parámetros dinámicos para el material conglomerado en la formación algodonol.

	Conglomerado				Variaciones Porcentuales con respecto a la Formación Algodonol		
	Zona Sur	Zona Sur-Oriente	Zona Centro-Occidente	Formación Algodonol	Zona Sur	Zona Sur Oriente	Zona Centro Occidente
<i>Resumen Vp</i>							
Media	692,28	648,767	545,306	646,426	-7,09%	-0,36%	15,64%
Mínimo	424,27	291,195	239,292	239,292	-77,30%	-21,69%	0,00%
Máximo	909,55	944,575	912,312	944,575	3,71%	0,00%	3,42%
<i>resumen Vs</i>							
Media	254,83	226,650	236,288	241,248	-5,63%	6,05%	2,06%
Mínimo	183,29	156,362	164,185	156,362	-17,22%	0,00%	-5,00%
Máximo	379,50	361,458	332,218	379,504	0,00%	4,76%	12,46%
<i>Resumen σ</i>							
Media	0,41	0,414	0,320	0,393	-4,56%	-5,43%	18,55%
Mínimo	0,18	0,069	0,011	0,011	1642,59%	-555,16%	0,00%
Máximo	0,47	0,528	0,559	0,559	16,47%	5,62%	0,00%
<i>Resumen G</i>							
Media	145,20	125,436	133,484	135,948	-6,81%	7,73%	1,81%
Mínimo	77,37	55,731	61,286	55,731	-38,83%	0,00%	-9,97%
Máximo	296,95	305,017	256,573	305,017	2,65%	0,00%	15,88%
<i>Resumen E</i>							
Media	408,65	345,040	303,599	364,708	-12,05%	5,39%	16,76%
Mínimo	223,27	122,424	96,480	96,480	-131,42%	-26,89%	0,00%
Máximo	823,62	851,840	712,581	851,840	3,31%	0,00%	16,35%

Fuente: Autores, 2017.

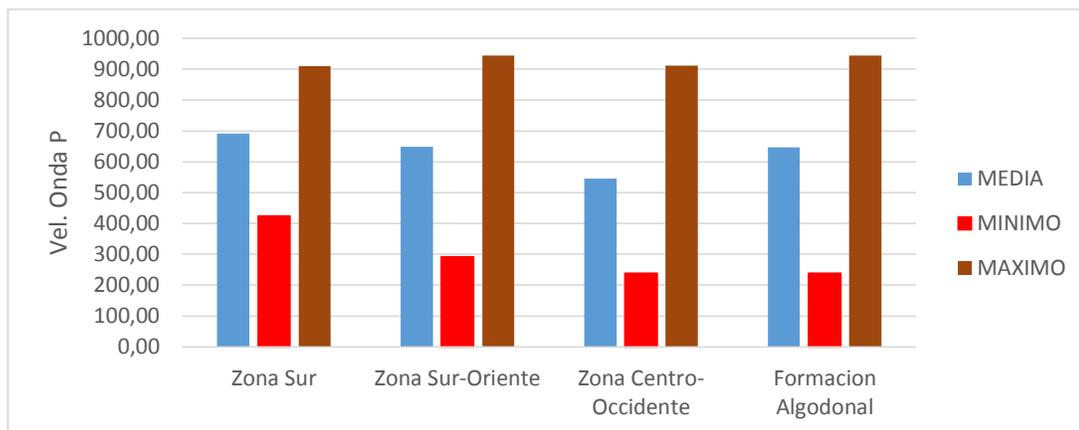


Figura 174. Diagrama de valores máximos, mínimos y medios de velocidad de onda P en cada zona para el material conglomerado.

Fuente: Autores, 2017.

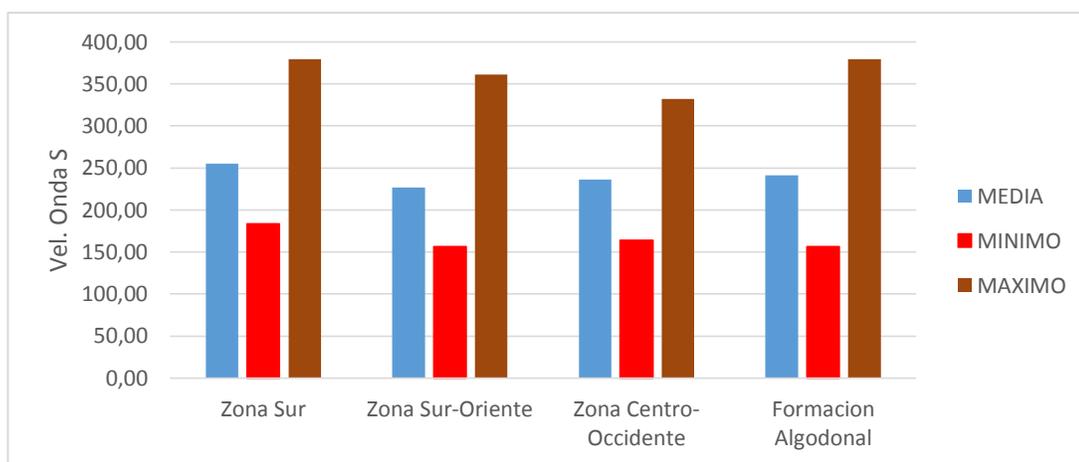


Figura 175. Diagrama de valores máximos, mínimos y medios de velocidad de onda S en cada zona para el material conglomerado.

Fuente: Autores, 2017.

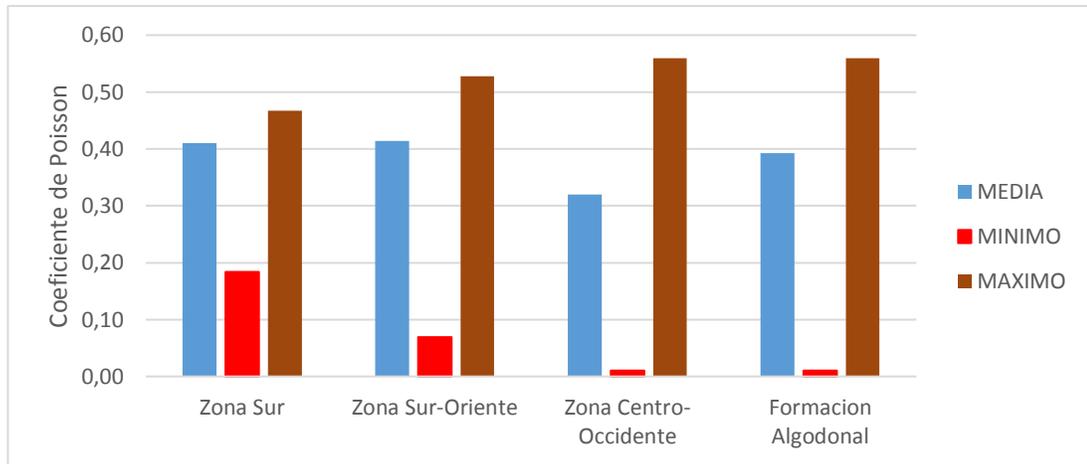


Figura 176. Diagrama de valores máximos, mínimos y medios de coeficiente de Poisson en cada zona para el material conglomerado.

Fuente: Autores, 2017.

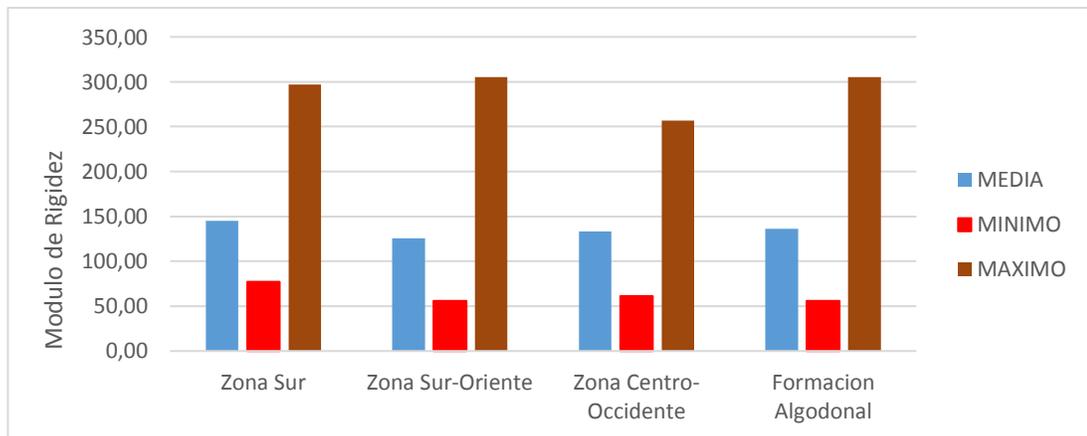


Figura 177. Diagrama de valores máximos, mínimos y medios de módulo de rigidez en cada zona para el material conglomerado.

Fuente: Autores, 2017.

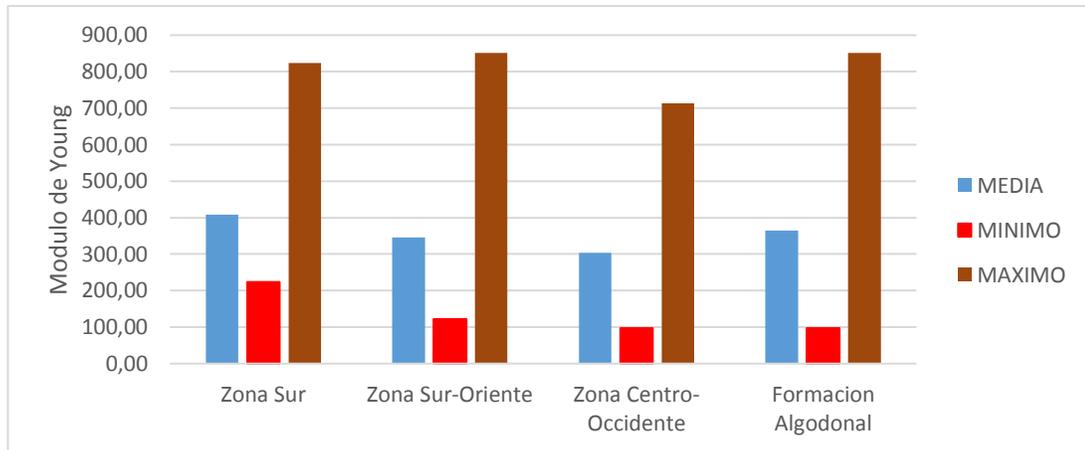


Figura 178. Diagrama de valores máximos, mínimos y medios de módulo de Young en cada zona para el material conglomerado.

Fuente: Autores, 2017.

Tabla 34. Resumen de variaciones de los parámetros dinámicos para las arcillolitas en la formación algodonal.

Arcillolitas (Pan de Jabón)	Variaciones Porcentuales con respecto a la Formación Algodonal
-----------------------------	--

	Zona Sur	Zona Sur-Oriente	Zona Centro-Occidente	Formación Algodonal	Zona Sur	Zona Sur Oriente	Zona Centro Occidente
<i>Resumen Vp</i>							
Media	1309,22	1372,937	1542,759	1438,453	8,98%	4,55%	-7,25%
Mínimo	947,23	956,689	952,954	947,226	0,00%	-1,00%	-0,60%
Máximo	1972,44	1702,267	1895,450	1972,440	0,00%	13,70%	3,90%
<i>Resumen Vs</i>							
Media	341,10	278,557	312,760	313,079	-8,95%	11,03%	0,10%
Mínimo	250,50	165,715	177,855	165,715	-51,17%	0,00%	-7,33%
Máximo	487,39	371,526	432,630	487,389	0,00%	23,77%	11,24%
<i>Resumen σ</i>							
Media	0,45	0,478	0,475	0,467	4,48%	-2,19%	-1,58%
Mínimo	0,32	0,455	0,402	0,320	0,00%	-42,15%	-25,58%
Máximo	0,49	0,487	0,494	0,494	0,99%	1,53%	0,00%
<i>Resumen G</i>							
Media	274,96	191,599	247,969	242,919	-13,19%	21,13%	-2,08%
Mínimo	115,43	64,355	74,116	64,355	-79,37%	0,00%	-15,17%
Máximo	509,14	334,295	454,809	509,137	0,00%	34,34%	10,67%
<i>Resumen E</i>							
Media	789,64	565,517	729,305	709,512	-11,29%	20,29%	-2,79%
Mínimo	337,62	191,073	219,674	191,073	-76,70%	0,00%	-14,97%
Máximo	1344,07	986,166	1335,835	1344,075	0,00%	26,63%	0,61%

Fuente: Autores, 2017.

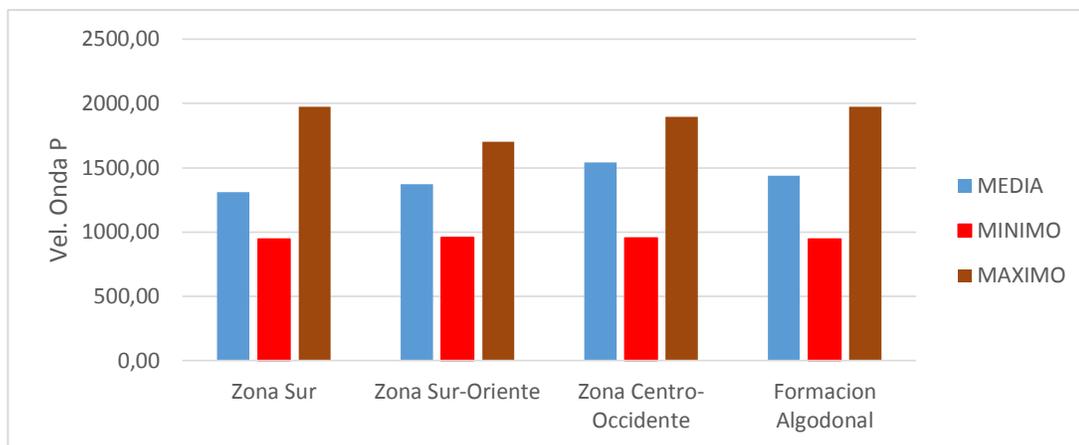


Figura 179. Diagrama de valores máximos, mínimos y medios de velocidad de onda P en cada zona para las arcillotas.

Fuente: Autores, 2017

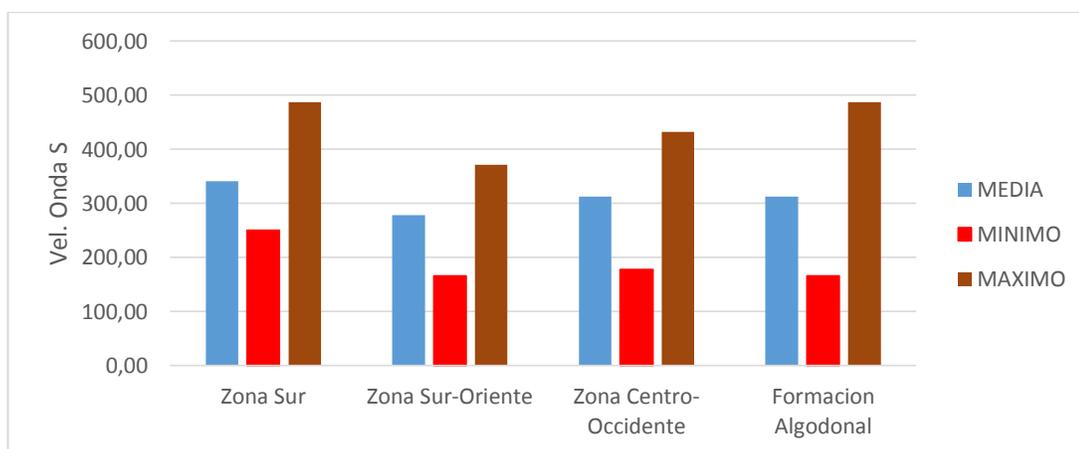


Figura 180. Diagrama de valores máximos, mínimos y medios de velocidad de onda S en cada zona para las arcillotas.

Fuente: Autores, 2017

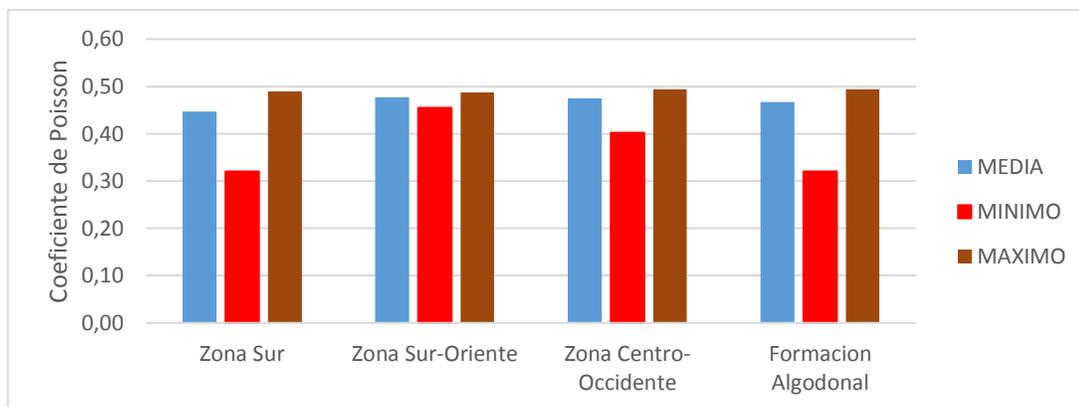


Figura 181. Diagrama de valores máximos, mínimos y medios de coeficiente de Poisson en cada zona para las arcillotas.

Fuente: Autores, 2017

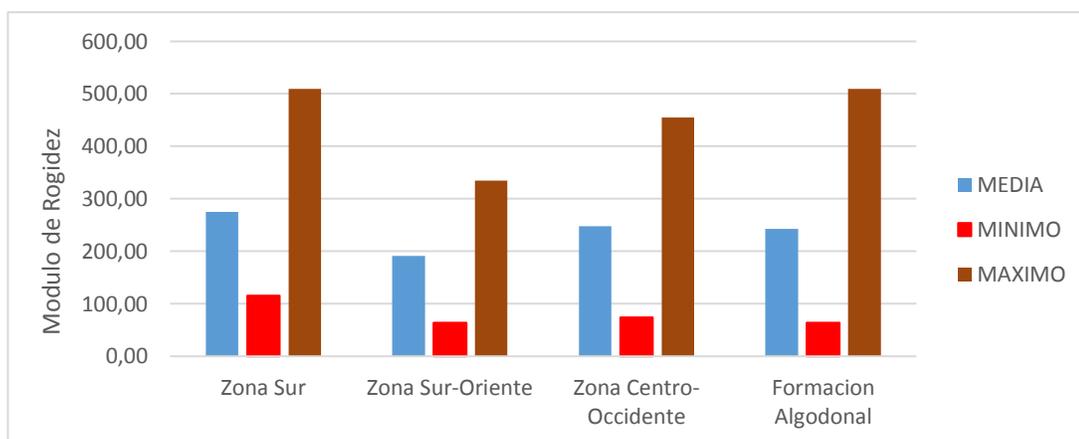


Figura 182. Diagrama de valores máximos, mínimos y medios de módulo de rigidez en cada zona para las arcillotas.

Fuente: Autores, 2017

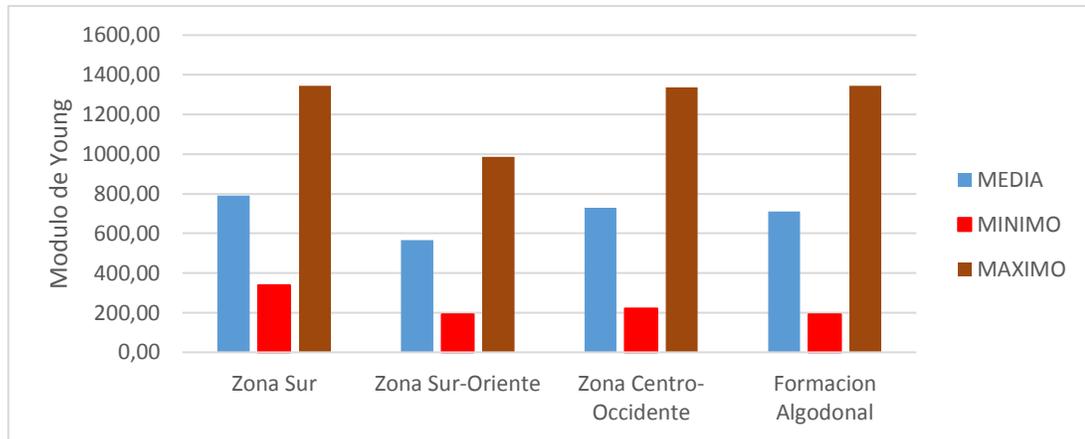


Figura 183. Diagrama de valores máximos, mínimos y medios de módulo de Young en cada zona para las arcillotas.

Fuente: Autores, 2017

Con base en la variación porcentual de los datos y las gráficas de los valores de la Media, el valor Mínimo y Máximo, se puede decir, que la variación de datos no es muy alta, ya que el porcentaje de variación, se mantiene en un rango relativamente bajo, lo que nos permite asumir, que en general los datos de velocidad de onda P y onda S se mantienen en un rango similar, y por ende la consistencia de los datos para la Formación algodonala, es aceptable, es decir, de un punto a otro no se encontraran grandes variaciones de datos.

5.2. Limitantes

Dentro de los aspectos limitantes que se tuvieron en el desarrollo del proyecto, se encuentran principalmente la disponibilidad de unos geófonos de 4,5 Hz, ya el trabajo de campo para la adquisición de MASW se realizó haciendo uso de los geófonos de 14,5 Hz, que son recomendados para los ensayos de refracción sísmica. Y el inconveniente con estos geófonos es que no son capaces de registrar frecuencias por debajo a los 14,5 Hz, y estas

frecuencias, mejoran el espectro de velocidad, pudiendo identificar en forma más clara los valores de la fase de velocidad en frecuencias por debajo de los 14,5 Hz.

Adicionalmente otro de los principales inconvenientes consistió en la adquisición de muestras inalteradas, ya que para la toma de muestras a profundidades considerables, es necesario el uso de equipo especializado, como el equipo de rotación, capaz de adquirir muestras a diferentes profundidades, y su utilización representa un costo considerable, que no se pudo asumir.

Y finalmente, otro de los aspectos limitantes corresponde al tamaño de la muestra, y esto hace referencia a la disponibilidad de sitios para la realización de los ensayos, que como ya se ha mencionado debe reunir un conjunto de parámetros mínimos, como por ejemplo ser un área descubierta, y sin construcciones vecinas, y ya que el proyecto se desarrolló dentro del casco urbano, los espacios con estas condiciones fueron muy limitados.

Capítulo 6: Conclusiones

Considerando que la formación algodonal es una formación geológica con propiedades litológicas comunes como lo son la composición y la estructura, se partió del supuesto de que el comportamiento dinámico, y así mismo la velocidad de ondas P y ondas S, también tendrían valores comunes en toda la formación, por lo cual se planteó el cálculo de estas variables y posterior a un análisis estadístico de los datos se estableció la desviación de los mismos. En función de los resultados obtenidos y la información geológica para cada zona, se puede decir que la formación algodonal, como lo menciona Baez (2017) consiste en una formación geológica de carácter sedimentario, constituida por conglomerados con fragmentos de roca y cuarzo de color amarillo y gris, con intercalaciones de areniscas arcillosas de color verde y gris, y arcillolita gris verdosa y amarillenta.

Con referencia a lo anterior y como resultado de las visitas y toma de muestra sobre algunos taludes de la formación algodonal, se ha identificado la presencia de dos capas o dos tipos de materiales en los perfiles de esta formación, una primera capa denominada Conglomerado, compuesta por arenas, gravas y arcilla, con velocidades de onda P que varían entre los 239,29 m/s y 944,58 m/s y velocidad de onda S entre los 156,36 m/s y los 379,5 m/s y una segunda capa de Arcillolita denominado coloquialmente como Pan de Jabón compuesto por arcillas y limos, con velocidades de onda P que varían entre los 947,23 m/s y 1972,44 m/s y velocidad de onda S entre 165,72 y 487,39 m/s.

Como resultado de la recopilación de los fundamentos teóricos, se logró establecer los procedimientos y recomendaciones para la ejecución de los ensayos geofísicos de Refracción sísmica y MASW, adicionalmente se identificaron las formulas a partir de la teoría de la elasticidad, que permiten el cálculo de los parámetros dinámicos, que determinan el comportamiento del suelo bajo cargas dinámicas, y son ampliamente usados en el área de la geotecnia y el diseño estructural. Con el desarrollo de este proyecto se logró la medición en campo de las velocidades de ondas P y ondas S y, haciendo uso de ecuaciones que se derivan de la teoría de la elasticidad se calcularon los parámetros dinámicos en 11 sitios de la formación algodonol, iniciando por la determinación del valor de la densidad, de la cual depende el valor del módulo de Rigidez (G) y a su vez el módulo de Young (E) y el Coeficiente de Poisson (σ).

A partir de los ensayos de refracción sísmica y MASW se estableció que en la zona sur el conglomerado posee una velocidad de onda P entre 424,27 y 909,55 m/s, la velocidad de onda S entre 183,29 y 379,50 m/s, el coeficiente de Poisson se encuentra entre 0,18 y 0,47 el módulo de rigidez esta entre 77,37 y 296,95 Mpa, y el módulo de Young posee un valor entre 222,27 y 823,62 Mpa. Asimismo la Arcillolita posee una velocidad de onda P entre 947,23 y 1972,44 m/s, la velocidad de onda S entre 250,50 y 487,39 m/s, el coeficiente de Poisson se encuentra entre 0,32 y 0,49 el módulo de rigidez esta entre 115,43 y 509,114 Mpa, y el módulo de Young posee un valor entre 337,62 y 1344,07 Mpa.

Por su parte en la zona Sur-Oriente el conglomerado posee una velocidad de onda P entre 291,20 y 944,58 m/s, la velocidad de onda S entre 156,36 y 361,46 m/s, el coeficiente de Poisson se encuentra entre 0,07 y 0,52 el módulo de rigidez esta entre 55,73 y 305,02

Mpa y el módulo de Young posee un valor entre 122,42 y 851,84 Mpa. Asimismo la Arcillolita posee una velocidad de onda P entre 956,69 y 1702,27 m/s, una velocidad de onda S entre 165,72 y 371,53 m/s, el coeficiente de Poisson se encuentra entre 0,46 y 0,49 el módulo de rigidez esta entre 64,36 y 334,30 Mpa y el módulo de Young posee un valor entre 191,07 y 986,12 Mpa.

Adicionalmente en la zona Centro-occidente en el Conglomerado se encuentran velocidades de onda P entre 239,29 y 912,31 m/s y velocidades de onda S entre 164,19 y 322,22 m/s, el coeficiente de Poisson se encuentra entre 0,01 y 0,55 el módulo de rigidez esta entre 61,29 y 256,57 Mpa y el módulo de Young posee un valor entre 96,48 y 712,58 Mpa, y finalmente la Arcillolita en esta zona presenta velocidades de onda P entre 952,95 y 1895,45 m/s, velocidades de onda S entre 177,86 y 432,63 m/s, y un coeficiente de Poisson entre 0,40 y 0,49 el módulo de rigidez esta entre 74,12 y 454,81 Mpa y el módulo de Young posee un valor entre 219,67 y 1335,84 Mpa.

Es importante destacar que los valores anteriormente mencionados se calcularon hasta una profundidad entre los 12 y 14 m, que corresponde a la profundidad alcanzada con los ensayos refracción y MASW. Además, con base en el reglamento colombiano de construcción sismoresistente de 2010, se pueden clasificar los perfiles de suelo en cada zona, encontrando en la zona sur perfiles de suelo tipo E a una profundidad de 0 m hasta los 4 m y un perfil de suelo tipo C desde la superficie hasta los 13 m de profundidad, en la zona sur se encuentran los mayores valores de velocidad de onda S, con perfiles de suelo tipo D con una profundidad variable de 0 m a 10 m, y perfil de suelo tipo C con una profundidad variable entre 6 m y 12 m. en el caso de la zona centro-occidente se encuentran los tres

tipos de perfiles antes mencionados, perfil de suelo tipo E con una profundidad superficial de 2 m, perfil de suelo D con una profundidad variable de 0 m hasta 10 m, y un perfil de suelo tipo C desde los 7 m hasta los 14 m.

Para diseños sísmo resistentes futuros en la ciudad de Ocaña, esta clasificación de perfiles de suelos es muy importante, ya que comúnmente se ha considerado que la ciudad posee perfiles de suelos tipo C, y en el marco de las observaciones anteriores vemos que esta afirmación solo sería válida para la zona sur y centro-occidente a partir de una profundidad de 6 m, de hecho, cabe decir que Ocaña, en general posee perfiles de suelos tipo D, que según la norma sísmo resistente corresponden a suelos rígidos.

Con base en los valores de velocidad y profundidad, se puede observar que el espesor de la capa de material tipo conglomerado, que hace parte de la formación algodonal, presenta mayores espesores en los sectores sur y sur-oriente, en comparación con el sector centro-occidente, variando entre 0 m y 8 m y entre 0 y 9 m respectivamente. Esto debido a la intensidad diferencial de los procesos erosivos que ha sufrido la formación algodonal en cada sector.

Con respecto a los parámetros dinámicos, para los dos materiales identificados sobre la formación algodonal vemos que, el coeficiente de poisson varía entre 0,01 y 0,56 para el conglomerado, y entre 0,32 y 0,49 en la arcillolita, el módulo de rigidez para el conglomerado se encuentra entre 55,73 y 305,02 Mpa, y en la arcillolita está entre 64,35 y 509,14 Mpa. Y el módulo de Young en el conglomerado esta entre 96,48 y 851,84 y en la arcillolita entre 191,07 y 1344,07 Mpa.

Con base en el análisis estadístico realizado sobre los valores obtenidos a partir de los ensayos de refracción y MASW, y el cálculo de los parámetros dinámicos, se obtuvo que en el material denominado conglomerado, el valor de la velocidad de onda P posee un valor promedio de 646,43 m/s con una variación porcentual con respecto a las tres zonas de 15,64%, la velocidad de onda S posee un promedio de 241,23 m/s con una variación porcentual de 6,05%, el coeficiente de poisson tiene un valor promedio de 0,39 con una variación del 18,55%, el módulo de rigidez tiene un valor promedio de 135,95 Mpa con una variación de 7,73%, y el módulo de Young tiene un valor promedio de 364,71 Mpa con una variación porcentual de 16,76%.

Así mismo, el segundo material constituido por arcillolitas, posee un valor promedio de onda P de 1438,45 m/s con una variación porcentual con respecto a las tres zonas de estudio de 8,98%, la velocidad de onda S posee un promedio de 313,08 m/s con una variación porcentual de 11,03%, el coeficiente de poisson tiene un valor promedio de 0,47 con un variación porcentual de 4,48%, el módulo de rigidez 242,92 Mpa con una variación de 21,13%, y el módulo de Young tiene un valor promedio de 709,512 Mpa con una variación porcentual de 20,29%.

De acuerdo a los porcentajes de variación, puede apreciarse un comportamiento consistente de las velocidades de onda P y onda S en la formación algodonada, principalmente en la segunda capa de material compuesto por arcillolitas. En consecuencia de estos porcentajes de variación se decidió plantear fórmulas de correlación para los diferentes parámetros, con respecto a las zonas, a la capa y finalmente con todo el conjunto de valores. Inicialmente se observa que los mejores coeficientes de correlación

corresponden al valor de la velocidad de onda S, con valores cercanos a la unidad, también los módulos de rigidez y de Young, poseen coeficientes bastante buenos, principalmente en la arcillolita, con valores superiores a 0,9. Adicionalmente se observa que los coeficientes mejoran en cuando se incrementa la profundidad, es decir, los mejores coeficientes de correlación se obtiene en la segunda capa correspondiente al material compuesto por arcillolita.

En conjunto con lo anterior y el incremento del valor del módulo de poisson tiene relación con lo que plantea Salem (2000), y es que la primera capa de material puede corresponder a sedimentos más jóvenes y compresibles, que los suelos a mayor profundidad, los cuales son menos compresibles y más plásticos De igual este mismo autor explica que la presencia de valores del coeficiente de poisson negativos en los suelos indica anisotropía, y corresponden principalmente a depósitos sedimentarios, este tipo de valores negativos se dieron principalmente en la zona sur y sur-oriente, donde el espesor de la capa de material conglomeratico es mayor, y adicionalmente esta capa presenta los coeficientes de correlación más bajos; por su lado la arcillolita posee un valor promedio cercano a 0,5 que representa una mayor uniformidad en esta capa de material.

Álvarez, Garnica y Pérez (2003) afirman que “los materiales geológicos con la profundidad se convierten en más compactos debido a la presión litostática, por tanto, resulta en un incremento de la rigidez y un incremento en la velocidad de propagación de las ondas elásticas”, lo cual indica que según los valores promedio de módulo de rigidez calculados para cada material, la capa compuesta por arcillolitas tiene una mayor capacidad de resistir esfuerzos cortantes que la capa de conglomerado, y teniendo en cuenta que este

tipo de esfuerzos son generados por la propagación de ondas S en el suelo, las arcillolitas tendrán un mejor comportamiento en eventos sísmicos.

Capítulo 7: Recomendaciones

Para el desarrollo de ensayos geofísicos que procedan al cálculo de parámetros dinámicos se recomienda la realización de ensayos sobre muestras inalteradas a diferentes profundidades mediante columna resonante o triaxial cíclica, para comparar los parámetros dinámicos obtenidos mediante los ensayos de refracción sísmica y MASW, con respecto a los datos que arrojan ensayos de este tipo

Siendo este trabajo un primer aporte a la microzonificación sísmica, se recomienda continuar con la realización de ensayos geofísicos en otras zonas de la ciudad, a fin de obtener información en los diferentes sectores de la ciudad.

Para el desarrollo de futuros proyectos se recomienda el uso de geófonos de 4,5 Hz para la adquisición de datos de MASW.

Realizar al menos una perforación profunda (de aproximadamente 10 metros), para evaluar los parámetros dinámicos a una profundidad considerable, y principalmente para la determinación de la densidad.

Referencias

- Álvarez, M. (2015). *Determinación de la amplificación sísmica local en el campus sur UPM mediante la técnica de sismología de microtemblores ReMi*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Álvarez-Manilla Aceves, A., GARNICA ANGUAS, P., & Pérez Salazar, A. (2003). *Evaluación indirecta de los módulos elásticos de rigidez IN SITU y la relación entre V_p/V_s y el ángulo de fricción interna*. *Publicación Técnica*, (225).
- Argáez-Mendoza, S., & Oliva, A. L. (2011). El principio de Fermat, la braquistócrona y ¿la curvatura de la luz? *Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY*, 47-55.
- Avilés, J., & Barzallo, B. (2016). *Caracterización de suelos del centro histórico de la ciudad de Cuenca mediante métodos geofísicos*. Cuenca, Ecuador: Universidad de Cuenca.
- Baez, P. (2017). *Informe geológico de tres taludes de la formación algodonol en el municipio de Ocaña*. Ocaña.
- Bran, J., Gonzáles, R., & Ortiz, H. (2009). *MÉTODOS DE ENSAYO PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS PRINCIPALES PROPIEDADES DINÁMICAS DE LOS SUELOS DE EL SALVADOR*. San Salvador: Universidad de El Salvador.
- Briceño, & Cuellar. (1991). Ensayos de reflexión y refracción sísmica. *Ensayos de reflexión y refracción sísmica* (pág. 107). Bogotá: Ingeominas.
- Brocher, T. (2005). *Compressional and Shear Wave Velocity Versus Depth in the San Francisco Bay Area, California: Rules for USGS Bay Area Velocity Model 05.0.0*. USGS, San Francisco .
- Cantos, J. (1973). *Tratado de geofísica aplicada*. Madrid.
- CMGRD. (2012). *Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres*. Ocaña.
- CORPONOR. (2011). *CONSTRUCCIÓN OBRAS DE PROTECCIÓN, BARRIO SESQUICENTENARIO*. Ocaña.
- Czelada, J. A. (2009). *Medición del módulo de Young y módulo de corte mediante técnicas geofísicas*. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires.
- Dal Moro, G. (2015). *Surface wave analysis for near surface applications*. Amsterdam: Elsevier Inc.
- Díaz del Castillo, S. L. (2007). *Caracterización de suelos arenosos mediante*. Ciudad de México: Academia de ingeniería de México.
- Dimate, C. (1998). *Sismotectónica de Colombia; deformación continental activa y subducción*. *Física de la tierra*.
- Espíndola, J., & Jimenez, Z. (1994). *Terremotos y ondas sísmicas, una breve introducción* (Vol. I). UNAM.
- Estrada, L. (2012). *Apuntes de sismología*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUCUMAN.
- Farmer, I. (1968). *Engineering properties of rocks*. Londres: E & F.N. SPON .
- Ferdinand, B., Johnston, R., Dewolf, J., & Mazurek, D. (2010). *Mecánica de materiales* (Quinta ed.). (J. Murrieta, Trad.) Ciudad de México: Mc Graw Hill.
- Giancoli, D. (2006). *Física. Principios con aplicaciones* (6 ed.). México D.F., México: Prentice Hall, Inc.
- Greenhouse, J., PHEME, P., Coulter, D., & Yarie, Q. (1998). Trends in geophysical site characterization. *Geotechnical site characterization proceedings of the first international conference* (págs. 23-34). Atlanta: Robertson & Mayne.

- Herráiz, M. (1997). *Conceptos básicos de sismología para ingenieros* (1 ed.). Lima, Perú: Centro Peruano Japonés de investigaciones sísmicas y mitigación de desastres.
- Hibbeler, R. (2006). *Mecánica de materiales* (Sexta ed.). (V. Gonzáles, & J. Alonso, Trads.) Ciudad de Mexico: Pearson Educación.
- Jaimés, J. (2011). *Métodos geofísicos aplicados a la caracterización de suelos: estado del arte*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Lazcano, S. (2007). *Caracterización de suelos arenosos mediante análisis de ondas de superficie*.
- López, J. M., Mejía, J. A., & Vega, N. (2008). *Aplicación del Método de Refracción Sísmica Para la Determinación de Velocidades de Ondas P*. Universidad de El Salvador.
- Lopez, J., Mejia, J., & Vega, N. (2008). *Aplicación del metodo de refracción sísmica para la determinación de velocidades de ondas P*. San Salvador: Universidad de el Salvador.
- Matthews, M. C., Hope, V. S., & Clayton, C. R. (1996). *The use of surface waves in the determination of ground stiffness profiles*. London : Proc. Institute of civil Engineers, Geotechnical Engineering.
- Ramírez, J. E. (1975). *Historia de los terremotos en Colombia*. Bogotá: Instituto Geografico Agustín Codazzi-IGAC.
- Recursostic. (29 de Mayo de 2017). Obtenido de http://recursostic.educacion.es/secundaria/edad/4esofisicaquimica/4quincena11/4q11_contenidos_2d.htm
- Rosales, C. (2001). *Sobre el comportamiento sísmicos de los depositos de suelos del área de cañaveralejo, Cali, Colombia*. Cali: Universidad del Valle.
- Saavedra, O. (2013). *Analisis de ondas sísmicas en entorno MATLAB*. México, D.F.: Instituto Politécnico Nacional.
- Salem, H. (2000). Poisson's ratio and the porosity of surface soils and shallow sediments, determined from seismic compressional and shear wave velocities. *Geotechnique*, 50, 461-463.
- Sarria, A. (1996). *Métodos geofísicos con aplicaciones a la Ingeniería Civil*. Bogotá: Ediciones Uniandes.
- Sauter, F. (1989). *Fundamentos de ingeniería sísmica*. San José, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa.
- Serna Vásquez, A. F. (2015). *Evaluación de la resolución del método de análisis de dispersión de ondas superficiales MASW (multichannel analysis of surface waves) en suelos residuales*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2009). *Física para ciencias e ingeniería con Física Moderna* (Séptima ed., Vols. II,). Mexico, D.F.: Cengage Learning Editores.
- Survey., E. o. (28 de Noviembre de 2016). *The Worlds of David Darling*. Obtenido de The Worlds of David Darling. Visible body: [Ehttp://www.daviddarling.info/encyclopedia/P/P_wave.html](http://www.daviddarling.info/encyclopedia/P/P_wave.html)
- Taboda, A., Dimatè, C., & Fuenzalida, A. (1998). *Sismotectónica de Colombia: deformación continental activa y subducción*. Bogotá : Universidad de los Andes .
- USGS science for a changing world. . (28 de Noviembre de 2016). Obtenido de Earthquake Glossary - Rayleigh wave: <https://earthquake.usgs.gov/learn/glosaary/?term=Rayleigh%20wave>

- Villamizar, J. D. (2011). *Métodos geofísicos aplicados a la caracterización de suelos: ESTADO DEL ARTE*. Bucaramanga: Universidad Industrial De Santander .
- Woods, R. D. (1968). *Screening of Surface Waves in Soils*.
- Young, .. H., & Freedman, R. (2009). *Física universitaria* (Decimosegunda ed., Vol. I). (V. Flores, Trad.) Ciudad de Mexico: Pearson educación.
- Young, H., Freedman, R., & Ford, L. (2005). *Física universitaria: con física moderna* (Vol. 2). (P. educación, Ed.)

Apéndices

Apéndice A. Mapa geológico de Ocaña, con ubicación de los puntos de realización de ensayos de geofísica.

Apéndice B. Ubicación de las líneas de geofísica, dromocronas y dispersión de fase de velocidad de onda S y frecuencia.

Sector de Acolsure-Zona Sur		
Ubicación, sistema de coordenadas: MAGNA Colombia Bogotá		
N 1401237,846 E 1081840,770		
Rango de velocidades		
	Máximo	Mínimo
Vp (m/sec)	947,226	424,266
Vs (m/sec)	487,389	226,456
Localización		
		
<p>Figura 184. Localización de la línea en el sector de Acolsure.</p> <p>Fuente: Google earth modificado, 2017.</p>		

Dromocronas observadas y calculadas

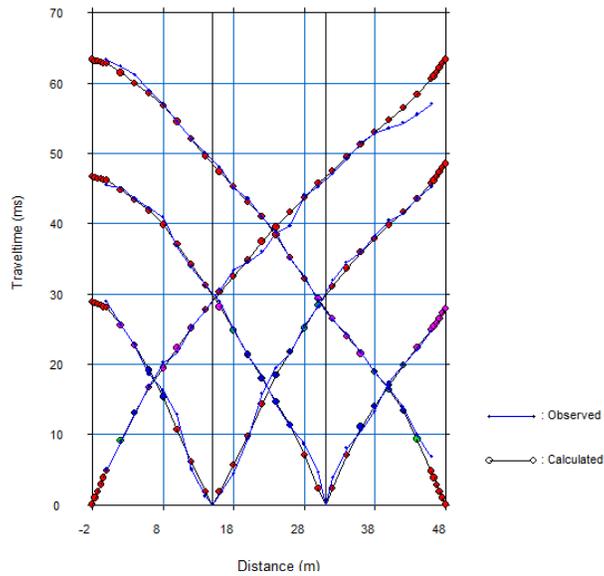


Figura 185. Domocronas observadas y calculas en el sector de Acolsure.

Fuente: Autores, 2017.

Dispersión de fase de velocidad de onda S vs Frecuencia

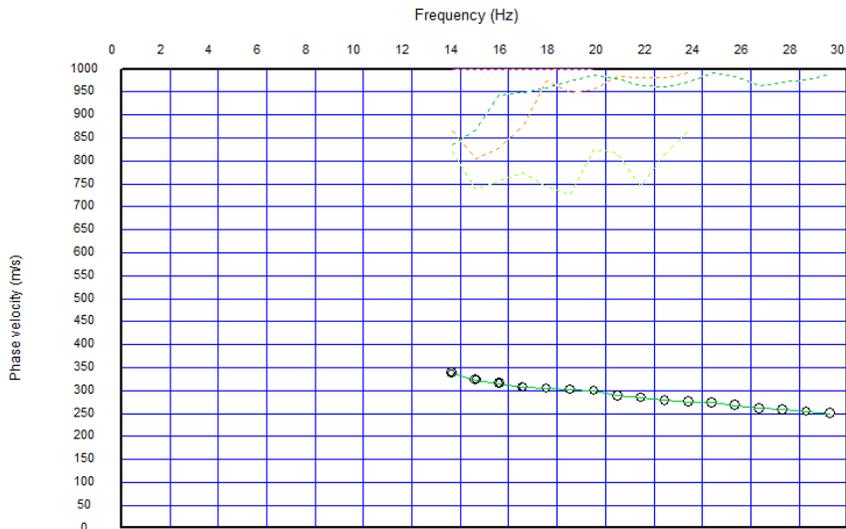


Figura 186. Curva de dispersión de velocidad de Onda S vs Frecuencia.

Fuente: Autores, 2017.

Sector de Anexos, UFPSO-Zona Sur Oriente

Ubicación, sistema de coordenadas: MAGNA Colombia Bogotá

N 1402697,984

E 1083461,701

Rango de velocidades

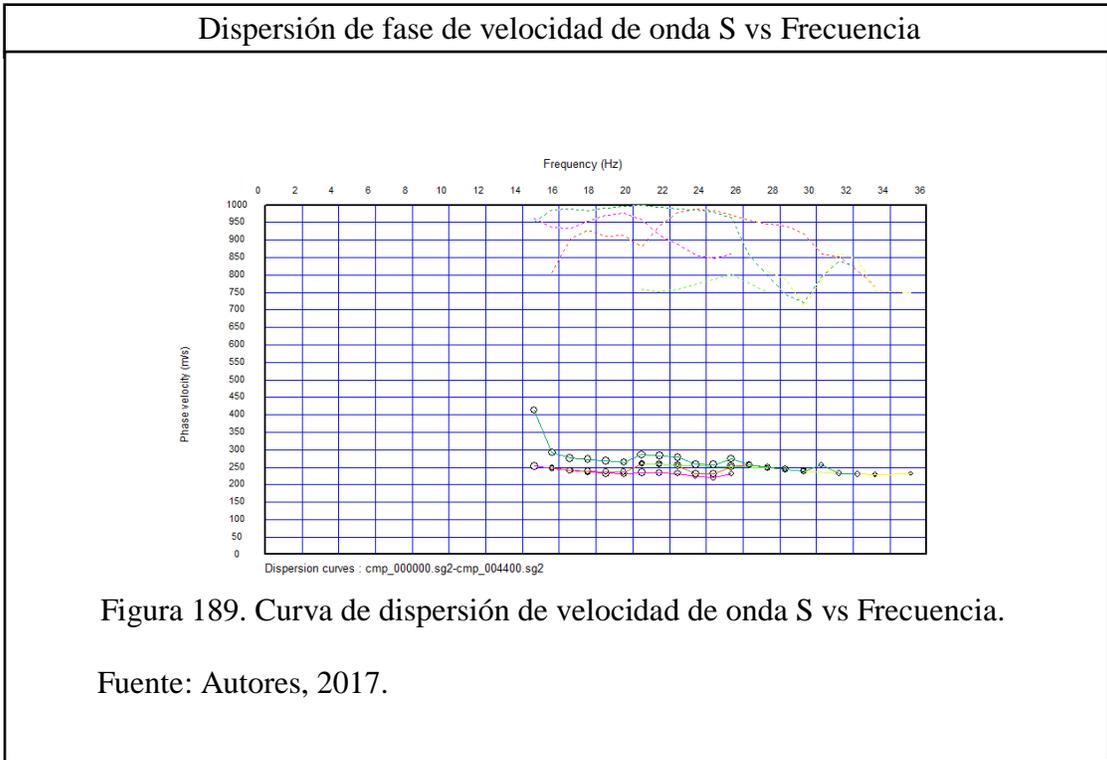
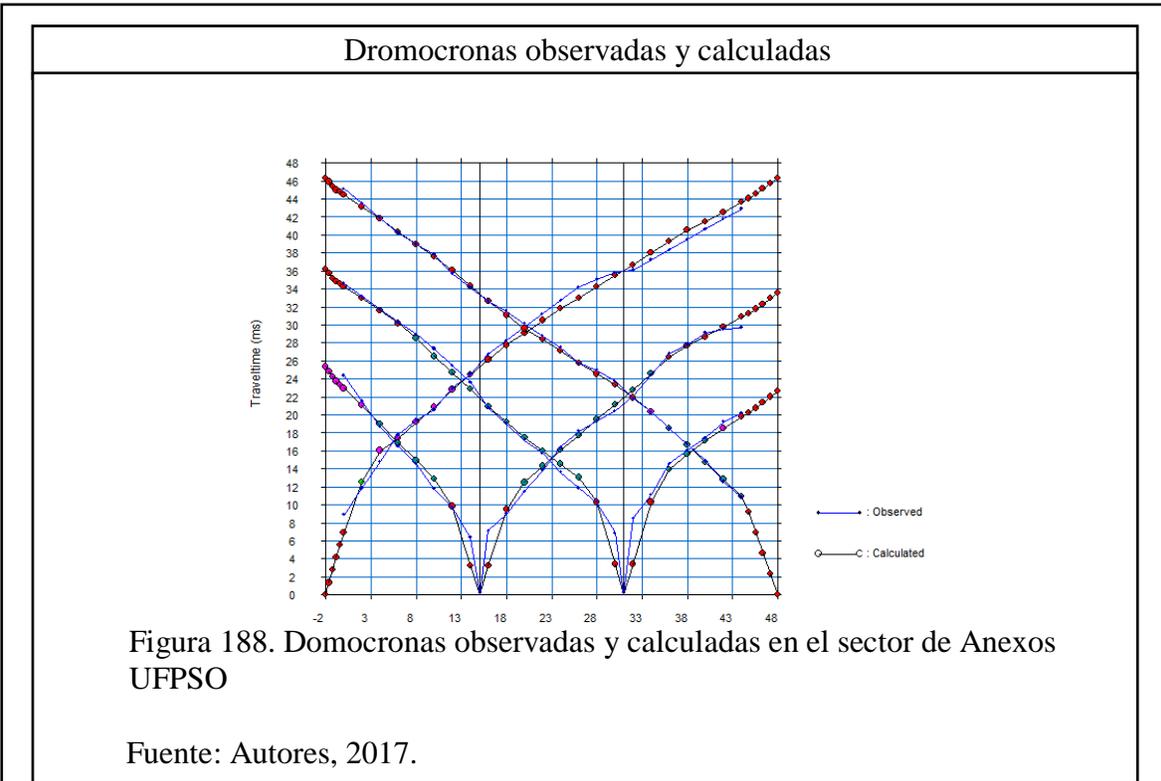
	Máximo	Mínimo
Vp (m/sec)	1588,913	291,195
Vs (m/sec)	355,038	219,625

Localización



Figura 187. Localización de la línea en el sector de Anexos UFPSO.

Fuente: Bing Maps modificado, 2017.



Sector de Bella Vista-Zona Centro Occidente

Ubicación, sistema de coordenadas: MAGNA Colombia Bogotá

N 1403952,165

E 1078812,578

Rango de velocidades

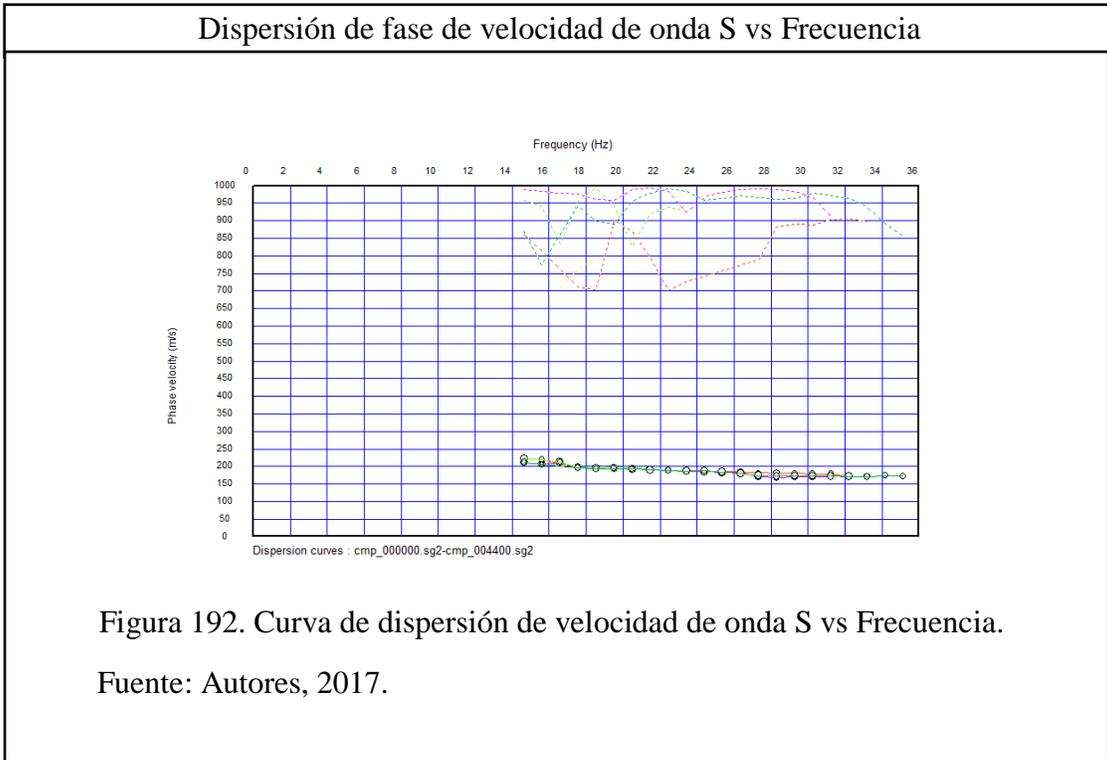
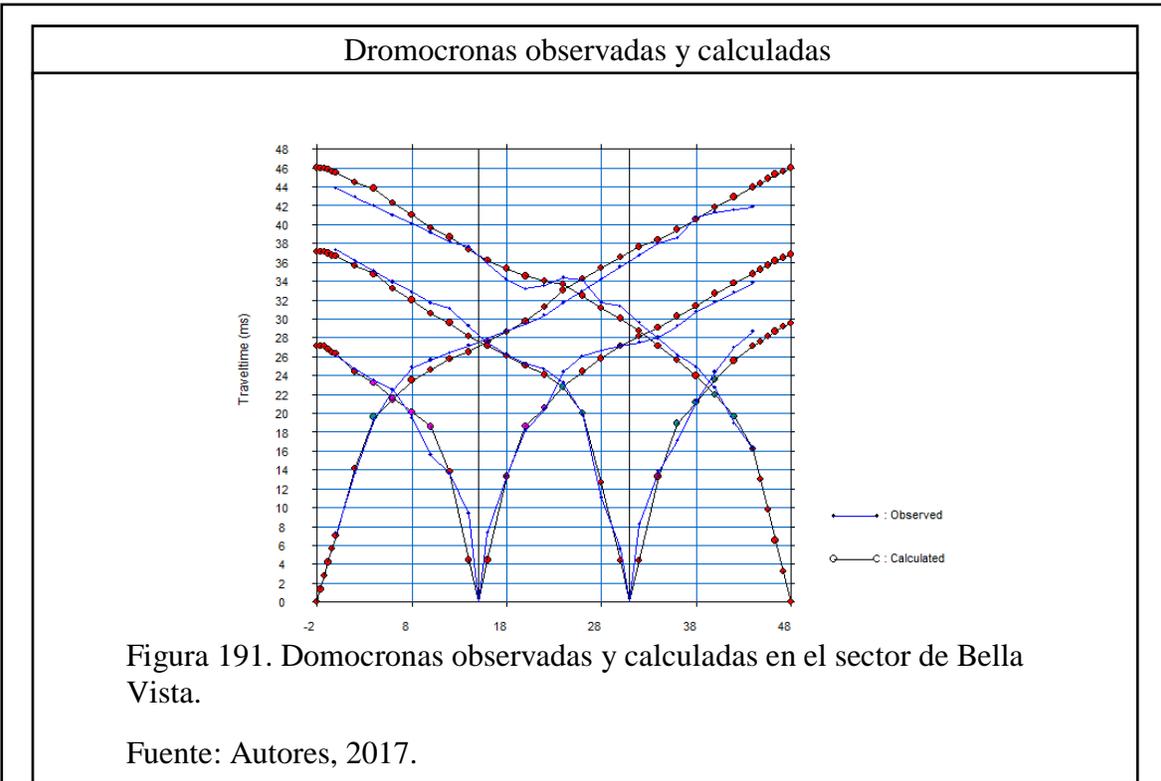
	Máximo	Mínimo
Vp (m/sec)	1895,450	239,292
Vs (m/sec)	371,320	164,185

Localización



Figura 190. Localización de la línea en el sector de Bella Vista.

Fuente: Google Earth modificado, 2017.



Sector de Buenos Aires-Zona Centro Occidente

Ubicación, sistema de coordenadas: MAGNA Colombia Bogotá

N 1405259,700

E 1079696,018

Rango de velocidades

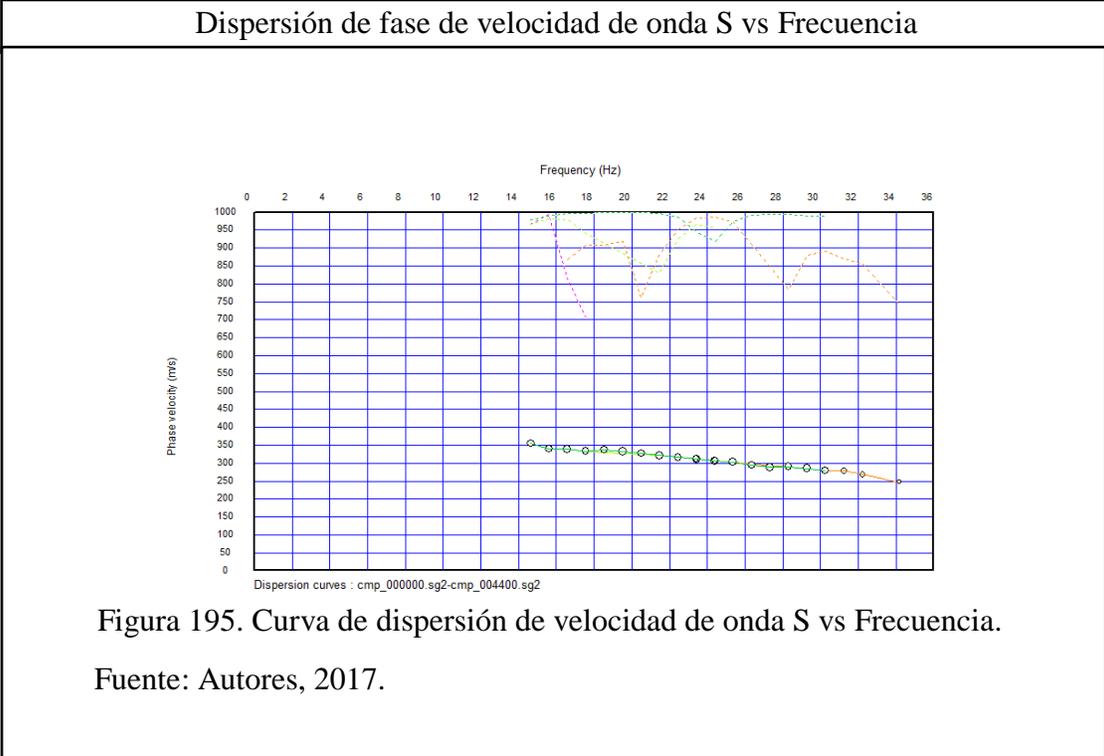
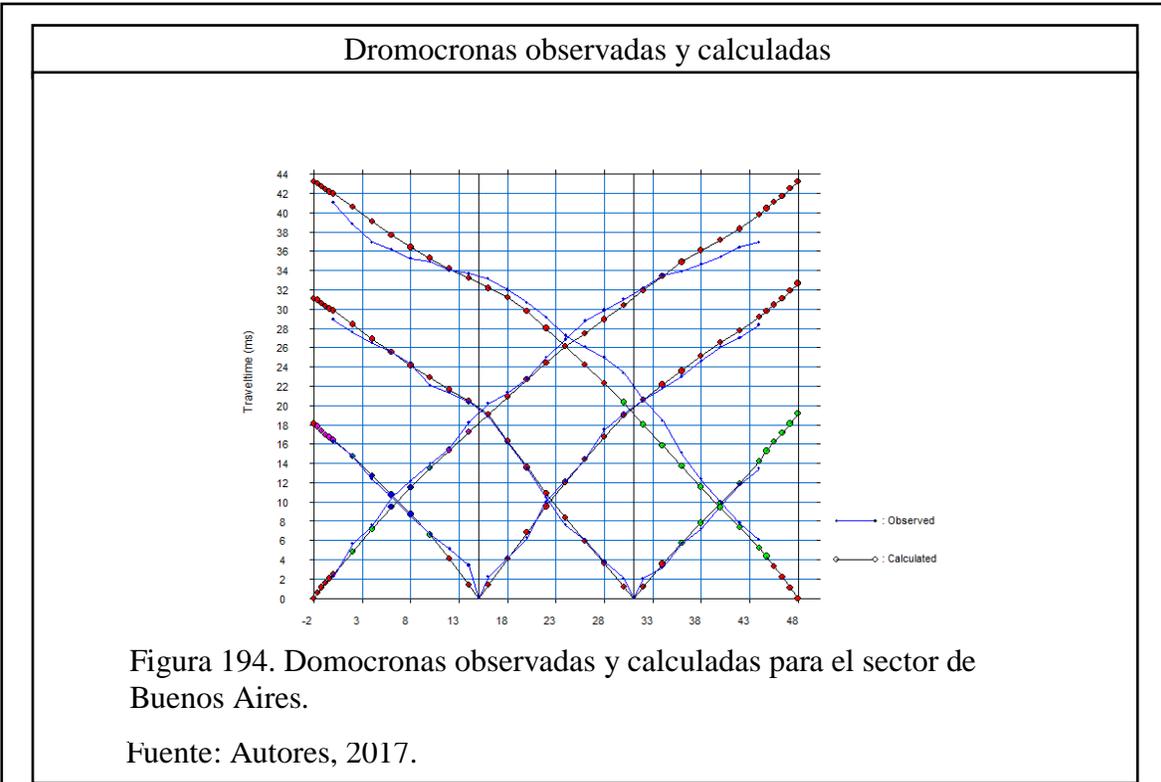
	Máximo	Mínimo
Vp (m/sec)	1818,120	727,511
Vs (m/sec)	392,978	262,887

Localización



Figura 193. Localización de la línea en el sector de Buenos Aires.

Fuente: Google Earth modificado, 2017.



Sector de la Circunvalar a la altura del barrio Belén-Zona Sur

Ubicación, sistema de coordenadas: MAGNA Colombia Bogotá

N 1401719,457

E 1081547,643

Rango de velocidades

	Máximo	Mínimo
Vp (m/sec)	1148,007	567,617
Vs (m/sec)	338,431	183,288

Localización



Figura 196. Localización de la línea en el sector de la circunvalar a la altura del barrio Belén.

Fuente: Google Earth modificado, 2017.

Dromocronas observadas y calculadas

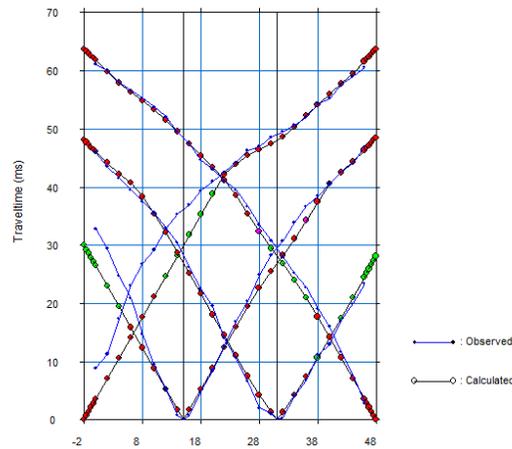


Figura 197. Dromocronas observadas y calculadas para el sector de la circunvalar a la altura del barrio Belén.

Fuente: Autores, 2017.

Dispersión de fase de velocidad de onda S vs Frecuencia

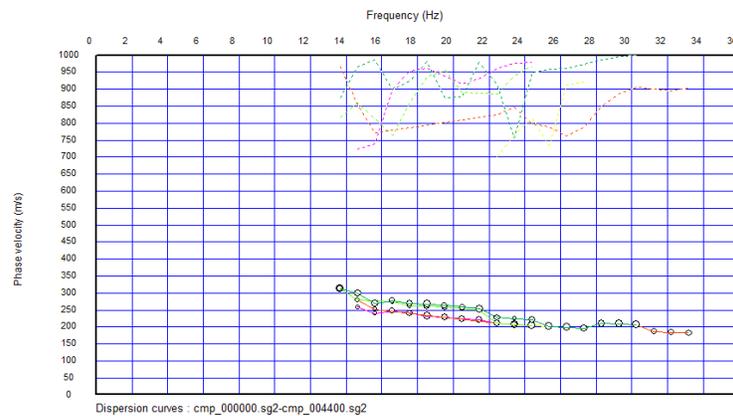


Figura 198. Curva de dispersión de velocidad de onda S vs Frecuencia.

Fuente: Autores, 2017.

Sector de El Dorado-Zona Centro Occidente

Ubicación, sistema de coordenadas: MAGNA Colombia Bogotá

N 1404936,791

E 1079620,002

Rango de velocidades

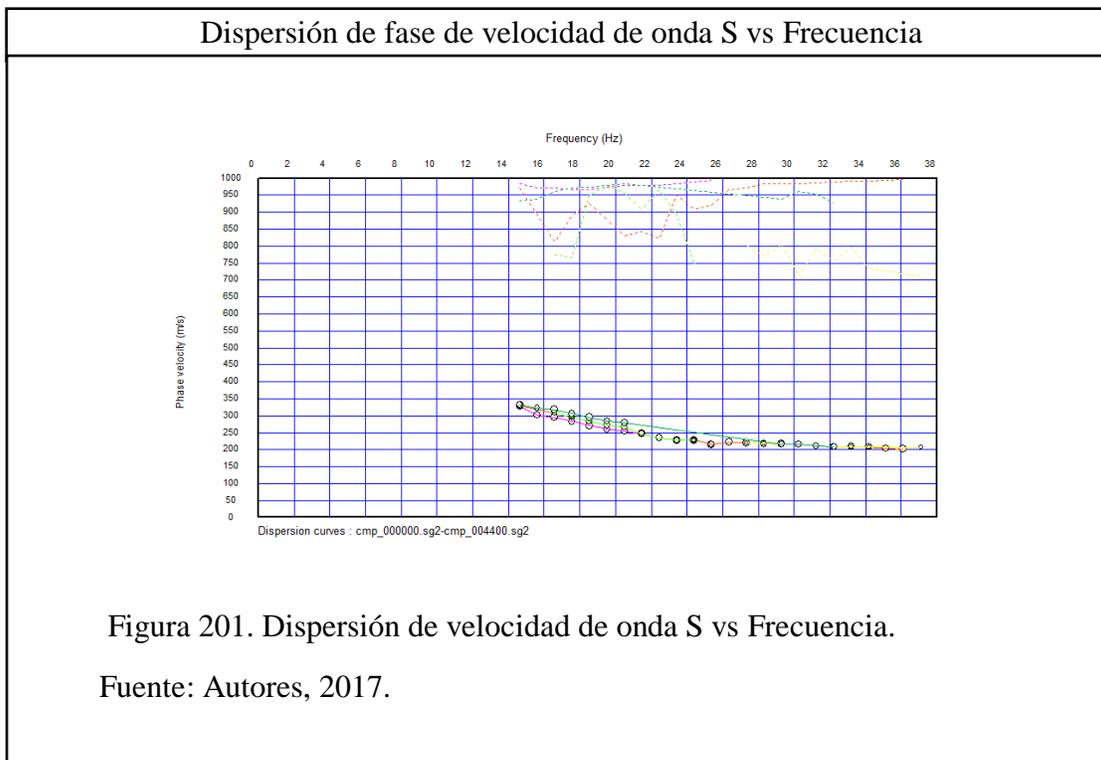
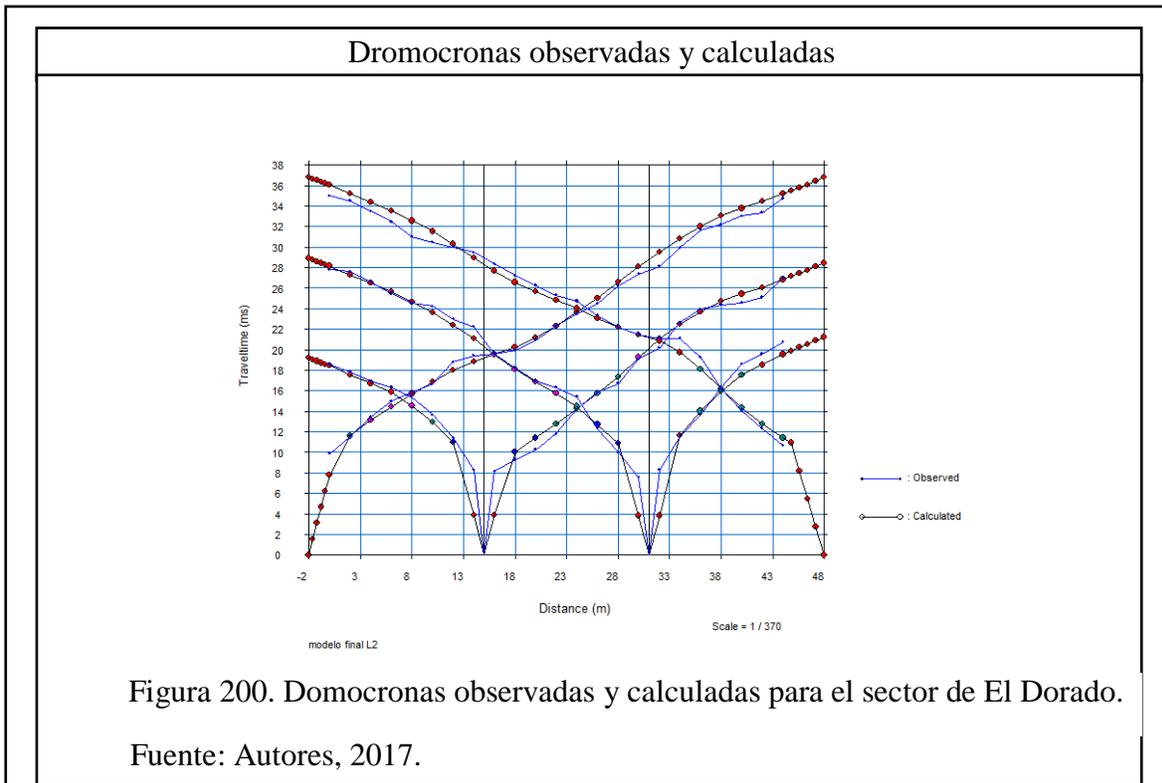
	Máximo	Mínimo
Vp (m/sec)	1895,450	260,417
Vs (m/sec)	373,613	199,612

Localización



Figura 199. Localización de la línea en el sector de El Dorado.

Fuente: Google Earth modificado, 2017.



Sector de La Granja, UFPSO-Zona Sur Oriente

Ubicación, sistema de coordenadas: MAGNA Colombia Bogotá

N 1403227,763

E 1083551,449

Rango de velocidades

	Máximo	Mínimo
Vp (m/sec)	1702,267	547,928
Vs (m/sec)	371,526	203,340

Localización



Figura 202. Localización de la línea en el sector de la Granja UFPSO.

Fuente: Google Earth modificado, 2017.

Dromocronas observadas y calculadas

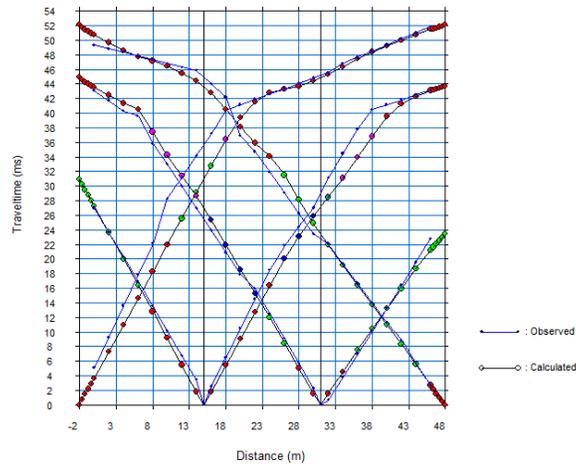


Figura 203. Dromocronas observadas y calculadas en el sector de la Granja UFPSO.

Fuente: Autores, 2017.

Dispersión de fase de velocidad de onda S vs Frecuencia

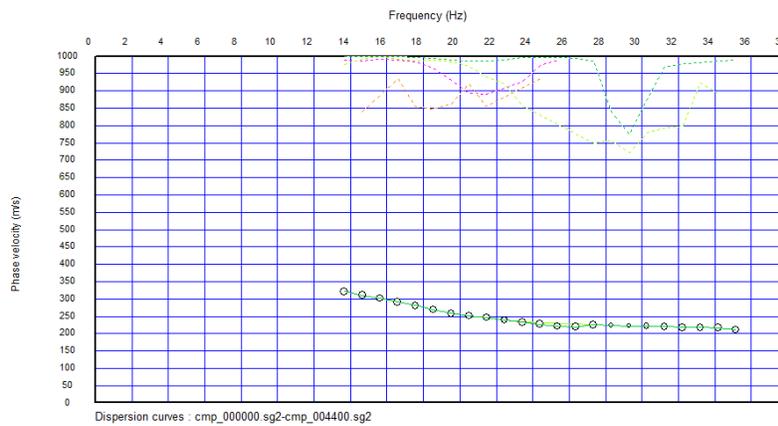


Figura 204. Curva de dispersión de velocidad vs Frecuencia.

Fuente: Autores, 2017.

Sector de la vía a la UFPSO-Zona Sur Oriente

Ubicación, sistema de coordenadas: MAGNA Colombia Bogotá

N 1401639,244

E 1082599,143

Rango de velocidades

	Máximo	Mínimo
Vp (m/sec)	1480,199	329,385
Vs (m/sec)	253,757	156,362

Localización



Figura 205. Localización de la línea en el sector de la vía a la universidad.

Fuente: Google Earth modificado, 2017.

Dromocronas observadas y calculadas

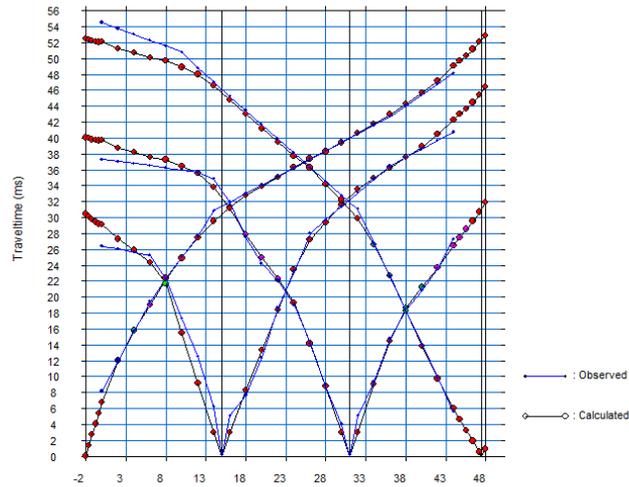


Figura 206. Dromocronas observadas y calculadas en el sector de la vía a la universidad.

Fuente: Autores, 2017.

Dispersión de fase de velocidad de onda S vs Frecuencia

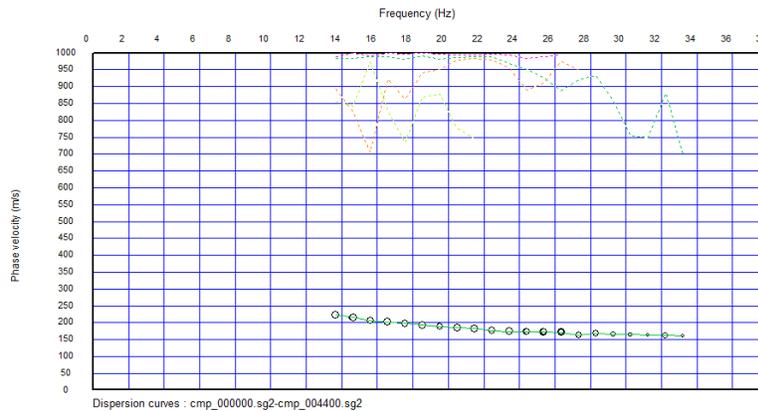


Figura 207. Curva de dispersión de velocidad de onda S vs Frecuencia.

Fuente: Autores, 2017.

Sector de Los Lagos-Zona Centro Occidente

Ubicación, sistema de coordenadas: MAGNA Colombia Bogotá

N 1404290,874

E 1078592,307

Rango de velocidades

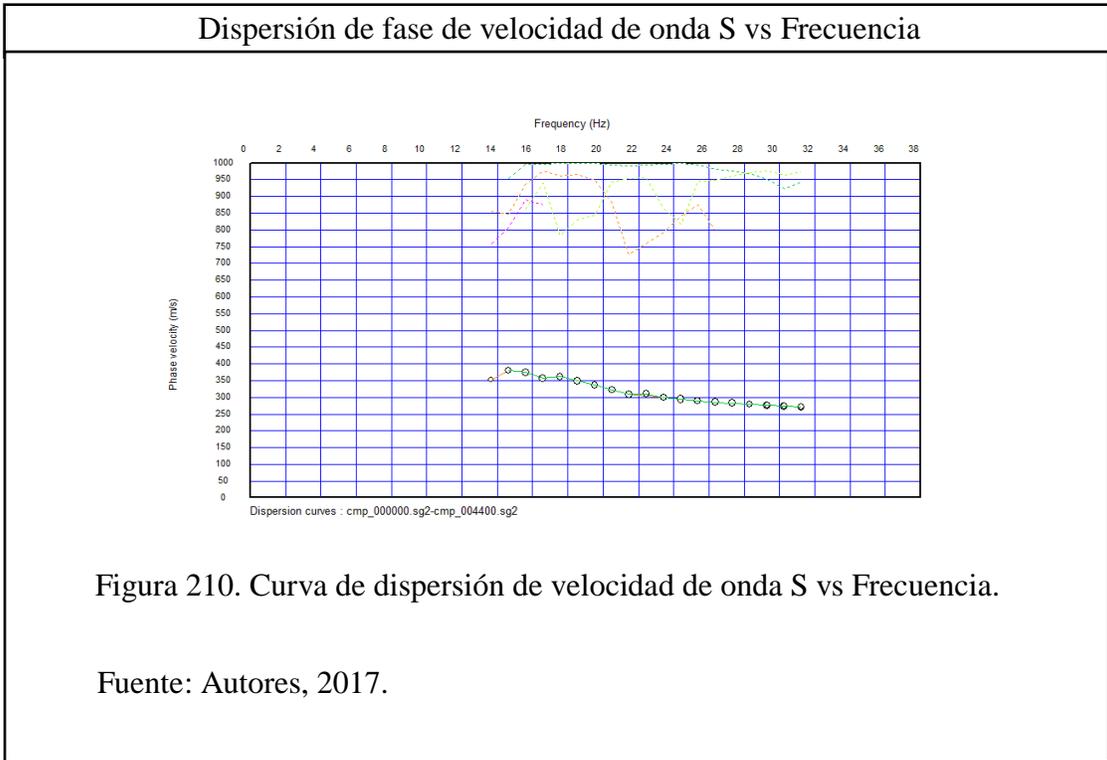
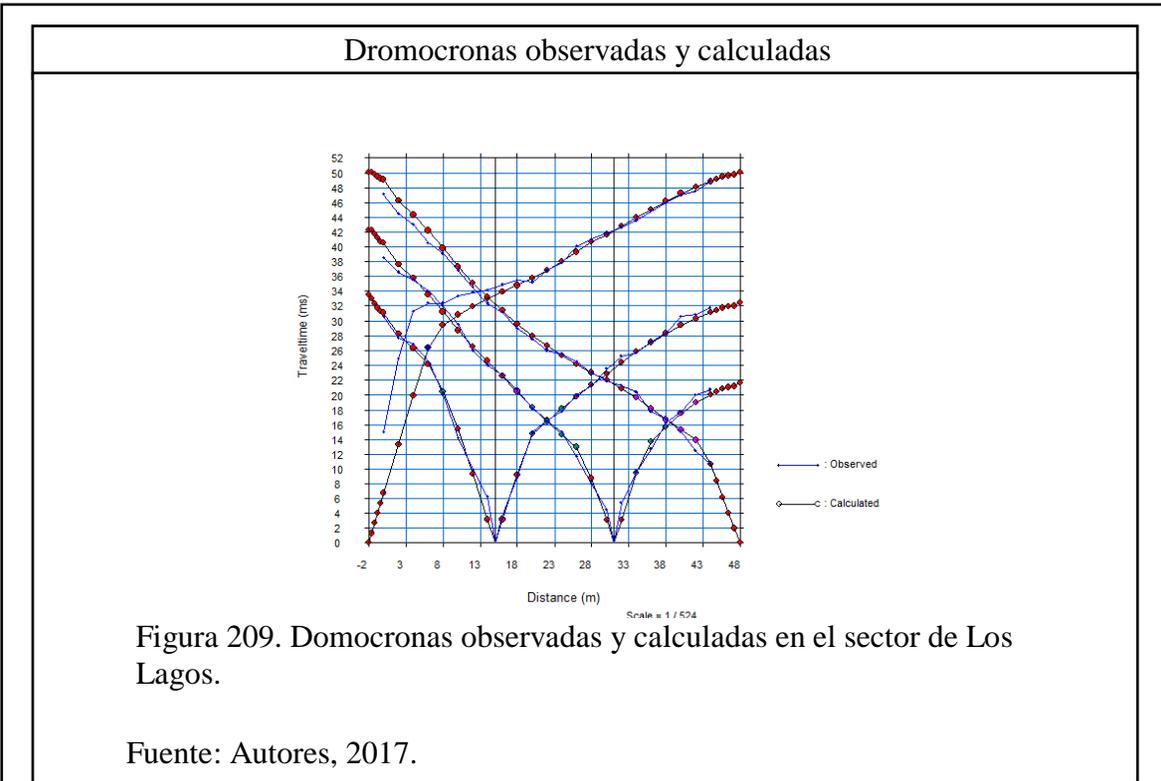
	Máximo	Mínimo
Vp (m/sec)	1778,880	290,071
Vs (m/sec)	432,630	201,222

Localización



Figura 208. Localización de la línea en el sector de Los Lagos.

Fuente: Google Earth modificado, 2017.



Sector de Libardo Alonso-Zona Sur

Ubicación, sistema de coordenadas: MAGNA Colombia Bogotá

N 1402439,451

E 1080914,296

Rango de velocidades

	Máximo	Mínimo
Vp (m/sec)	1089,390	480,064
Vs (m/sec)	362,176	228,543

Localización



Figura 211. Localización de la línea en el sector de Libardo Alonso.

Fuente: Google Earth modificado, 2017.

Dromocronas observadas y calculadas

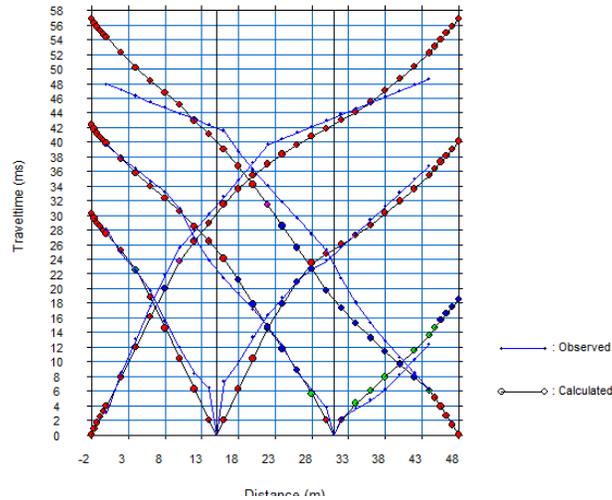


Figura 212. Dromocronas observadas y calculadas en el sector de Libardo Alonso.

Fuente: Autores, 2017.

Dispersión de fase de velocidad de onda S vs Frecuencia

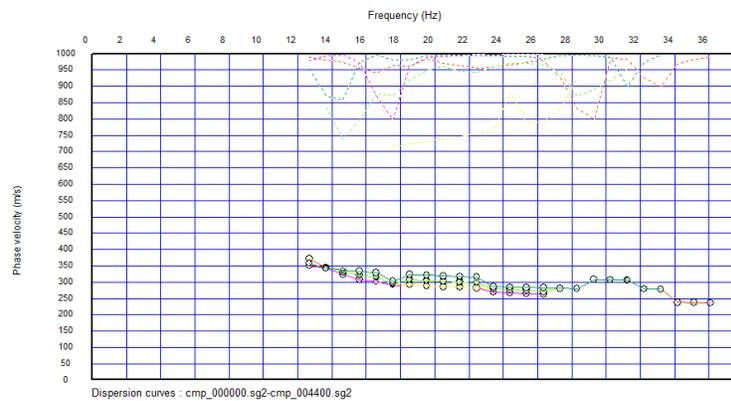


Figura 213. Curva dispersión de velocidad de onda S vs Frecuencia.

Fuente: Autores, 2017.

Sector de Tacaloa-Zona Sur

Ubicación, sistema de coordenadas: MAGNA Colombia Bogotá

N 1402394,402

E 100496,402

Rango de velocidades

	Máximo	Mínimo
Vp (m/sec)	1972,441	519,907
Vs (m/sec)	377,109	244,631

Localización



Figura 214. Localización de la línea en el sector de Tacaloa.

Fuente: Google Earth modificado, 2017.

Dromocronas observadas y calculadas

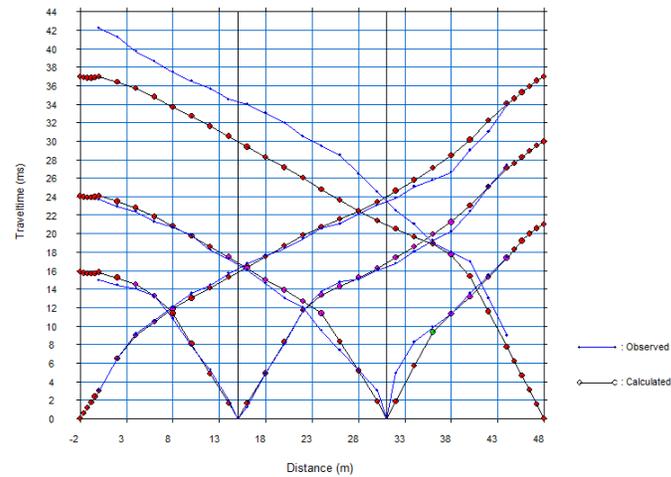


Figura 215. Dromocronas observadas y calculadas en el sector de Tacalooa.

Fuente: Autores, 2017.

Dispersión de fase de velocidad de onda S vs Frecuencia

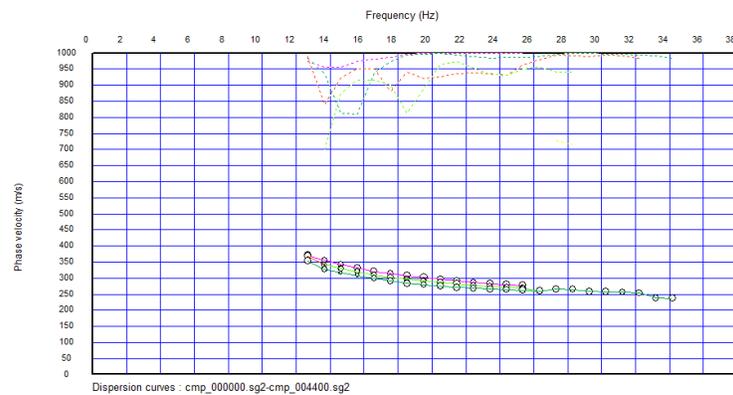


Figura 216. Cueva de dispersión de velocidad de onda S vs Frecuencia.

Fuente: Autores, 2017.

Apéndice C. Formatos de ensayos de densidad en laboratorio

DENSIDAD EN LABORATORIO			
Localización	MUNICIPIO DE OCAÑA N.S SECTOR DE LIBARDO ALONSO		
Descripción	PAN DE JABÓN		
Profundidad	2,2 metros	Fecha	Mayo 25 de 2017
PRUEBA Nº	1	2	3
Peso de la muestra (grs)	208,35	137,50	322,80
Peso de la muestra + parafina (grs)	218,97	149,92	335,85
Peso sumergido (grs)	94,30	62,50	142,50
Peso parafina (grs)	10,62	12,42	13,05
Densidad de la parafina (gr/cm ³)	0,8915	0,8915	0,8915
Volumen de la parafina (cm ³)	11,913	13,932	14,638
Volumen de la muestra + parafina (cm ³)	124,67	87,42	193,35
Volumen de la muestra (cm ³)	112,757	73,488	178,712
Densidad húmeda del material	1,847	1,871	1,806
Humedad (%)	6,490	6,340	6,690
Densidad seca del material (gr/cm ³)	1,735	1,759	1,693
CONTENIDO DE HUMEDAD			
Tara Nº	1	2	3
Peso del recipiente + suelo húmedo (grs.)	134,74	128,61	150,26
Peso del recipiente + suelo seco (grs.)	131,18	125,67	145,94
Peso del recipiente (grs.)	76,30	79,30	81,37
Peso del suelo seco (grs.)	54,88	46,37	64,57
Peso del Agua (grs.)	3,56	2,94	4,32
Contenido de humedad (%)	6,49	6,34	6,69
Observaciones	Humedades determinadas en horno		
Recomendaciones			
ENSAYO	REVISO		
Firma	Firma		

DENSIDAD EN LABORATORIO			
Localización	MUNICIPIO DE OCAÑA N.S SECTOR DE LIBARDO ALONSO		
Descripción	PAN DE JABÓN		
Profundidad	4,2 metros	Fecha	Mayo 25 de 2017
PRUEBA Nº	1	2	3
Peso de la muestra (grs)	129,64	47,11	37,10
Peso de la muestra + parafina (grs)	136,86	50,46	39,81
Peso sumergido (grs)	59,80	21,60	17,00
Peso parafina (grs)	7,22	3,35	2,71
Densidad de la parafina (gr/cm ³)	0,8915	0,8915	0,8915
Volumen de la parafina (cm ³)	8,099	3,758	3,039
Volumen de la muestra + parafina (cm ³)	77,06	28,86	22,81
Volumen de la muestra (cm ³)	68,961	25,102	19,770
Densidad húmeda del material	1,879	1,877	1,876
Humedad (%)	8,150	8,110	8,450
Densidad seca del material (gr/cm ³)	1,738	1,736	1,730
CONTENIDO DE HUMEDAD			
Tara Nº	1	2	3
Peso del recipiente + suelo húmedo (grs.)	135,17	116,39	106,47
Peso del recipiente + suelo seco (grs.)	130,98	114,10	104,14
Peso del recipiente (grs.)	79,57	85,87	76,58
Peso del suelo seco (grs.)	51,41	28,23	27,56
Peso del Agua (grs.)	4,19	2,29	2,33
Contenido de humedad (%)	8,15	8,11	8,45
Observaciones	Humedades determinadas en horno		
Recomendaciones			
ENSAYO	REVISO		
Firma	Firma		

DENSIDAD EN LABORATORIO			
Localización	MUNICIPIO DE OCAÑA N.S SECTOR DE LIBARDO ALONSO		
Descripción	PAN DE JABÓN		
Profundidad	6,2 metros	Fecha	Mayo 25 de 2017
PRUEBA Nº	1	2	3
Peso de la muestra (grs)	160,23	240,02	86,28
Peso de la muestra + parafina (grs)	171,95	261,98	97,41
Peso sumergido (grs)	78,00	115,80	40,30
Peso parafina (grs)	11,72	21,96	11,13
Densidad de la parafina (gr/cm ³)	0,8915	0,8915	0,8915
Volumen de la parafina (cm ³)	13,146	24,633	12,485
Volumen de la muestra + parafina (cm ³)	93,95	146,18	57,11
Volumen de la muestra (cm ³)	80,804	121,547	44,625
Densidad húmeda del material	1,983	1,975	1,933
Humedad (%)	11,740	12,010	11,660
Densidad seca del material (gr/cm ³)	1,775	1,763	1,732
CONTENIDO DE HUMEDAD			
Tara Nº	1	2	3
Peso del recipiente + suelo húmedo (grs.)	105,45	120,39	117,36
Peso del recipiente + suelo seco (grs.)	102,57	116,92	113,01
Peso del recipiente (grs.)	78,03	88,02	75,70
Peso del suelo seco (grs.)	24,54	28,90	37,31
Peso del Agua (grs.)	2,88	3,47	4,35
Contenido de humedad (%)	11,74	12,01	11,66
Observaciones	Humedades determinadas en horno		
Recomendaciones	_____		
ENSAYO	REVISO		
Firma	Firma		

DENSIDAD EN LABORATORIO			
Localización	MUNICIPIO DE OCAÑA N.S SECTOR DE LA CIRCUNVALAR		
Descripción	CONGLOMERADO		
Profundidad	2,6 metros	Fecha	Marzo 24 de 2017
PRUEBA Nº	1	2	3
Peso de la muestra (grs)	140,31	150,03	72,26
Peso de la muestra + parafina (grs)	156,55	161,89	79,7
Peso sumergido (grs)	60,94	65,31	31,36
Peso parafina (grs)	16,24	11,86	7,44
Densidad de la parafina (gr/cm ³)	0,8915	0,8915	0,8915
Volumen de la parafina (cm ³)	18,2165	13,303	8,345
Volumen de la muestra + parafina (cm ³)	95,61	96,58	48,34
Volumen de la muestra (cm ³)	77,3935	83,277	39,995
Densidad húmeda del material	1,8129	1,802	1,807
Humedad (%)	5,170	5,190	4,810
Densidad seca del material (gr/cm ³)	1,724	1,713	1,724
CONTENIDO DE HUMEDAD			
Tara Nº	1	2	3
Peso del recipiente + suelo húmedo (grs.)	111,87	122,97	101,57
Peso del recipiente + suelo seco (grs.)	110,37	120,82	100,58
Peso del recipiente (grs.)	81,33	79,43	8,01
Peso del suelo seco (grs.)	29,04	41,39	92,57
Peso del Agua (grs.)	1,50	2,15	0,99
Contenido de humedad (%)	5,17	5,19	4,81
Observaciones	Humedades determinadas en horno		
Recomendaciones			
ENSAYO	REVISO		
Firma	Firma		

DENSIDAD EN LABORATORIO			
Localización	MUNICIPIO DE OCAÑA N.S SECTOR DE LA CIRCUNVALAR		
Descripción	CONGLOMERADO		
Profundidad	4,6 metros	Fecha	Marzo 24 de 2017
PRUEBA Nº	1	2	3
Peso de la muestra (grs)	77,81	94,81	103,66
Peso de la muestra + parafina (grs)	89,96	109,03	117,86
Peso sumergido (grs)	34,96	42,31	46,92
Peso parafina (grs)	12,15	14,22	14,2
Densidad de la parafina (gr/cm ³)	0,8915	0,8915	0,8915
Volumen de la parafina (cm ³)	13,629	15,951	15,9282
Volumen de la muestra + parafina (cm ³)	55	66,72	70,94
Volumen de la muestra (cm ³)	41,371	50,769	55,0118
Densidad húmeda del material	1,881	1,867	1,8843
Humedad (%)	5,350	5,720	5,540
Densidad seca del material (gr/cm ³)	1,785	1,766	1,785
CONTENIDO DE HUMEDAD			
Tara Nº	1	2	3
Peso del recipiente + suelo húmedo (grs.)	93,87	89,57	105,14
Peso del recipiente + suelo seco (grs.)	93,14	88,87	104,25
Peso del recipiente (grs.)	79,51	76,64	88,01
Peso del suelo seco (grs.)	13,63	12,23	16,24
Peso del Agua (grs.)	0,73	0,70	0,89
Contenido de humedad (%)	5,35	5,72	5,54
Observaciones	Humedades determinadas en horno		
Recomendaciones			
ENSAYO	REVISO		
Firma	Firma		

DENSIDAD EN LABORATORIO			
Localización	MUNICIPIO DE OCAÑA N.S SECTOR DE LA CIRCUNVALAR		
Descripción	CONGLOMERADO		
Profundidad	6,6 metros	Fecha	Marzo 24 de 2017
PRUEBA Nº	1	2	3
Peso de la muestra (grs)	290,03	99,36	249,68
Peso de la muestra + parafina (grs)	321,78	109,94	268,99
Peso sumergido (grs)	137,3	46,8	118,3
Peso parafina (grs)	31,75	10,58	19,31
Densidad de la parafina (gr/cm ³)	0,8915	0,8915	0,8915
Volumen de la parafina (cm ³)	35,614	11,868	21,660
Volumen de la muestra + parafina (cm ³)	184,48	63,14	150,69
Volumen de la muestra (cm ³)	148,866	51,272	129,030
Densidad húmeda del material	1,948	1,938	1,935
Humedad (%)	8,670	8,290	8,440
Densidad seca del material (gr/cm ³)	1,793	1,789	1,784
CONTENIDO DE HUMEDAD			
Tara Nº	1	2	3
Peso del recipiente + suelo húmedo (grs.)	119,77	129,26	120,27
Peso del recipiente + suelo seco (grs.)	116,42	125,36	117,14
Peso del recipiente (grs.)	77,79	78,33	80,07
Peso del suelo seco (grs.)	38,63	47,03	37,07
Peso del Agua (grs.)	3,35	3,90	3,13
Contenido de humedad (%)	8,67	8,29	8,44
Observaciones	Humedades determinadas en horno		
Recomendaciones	_____		
ENSAYO	REVISO		
Firma	Firma		

DENSIDAD EN LABORATORIO			
Localización	MUNICIPIO DE OCAÑA N.S SECTOR DE LA GRANJA UFPSO		
Descripción	ARENISCA		
Profundidad	1 metros	Fecha	Mayo 25 de 2017
PRUEBA Nº	1	2	3
Peso de la muestra (grs)	212,04	329,86	352,83
Peso de la muestra + parafina (grs)	226,42	345,02	367,18
Peso sumergido (grs)	87,6	135,3	148,6
Peso parafina (grs)	14,38	15,16	14,35
Densidad de la parafina (gr/cm ³)	0,8915	0,8915	0,8915
Volumen de la parafina (cm ³)	16,1301	17,005	16,0965
Volumen de la muestra + parafina (cm ³)	138,82	209,72	218,58
Volumen de la muestra (cm ³)	122,6899	192,715	202,4835
Densidad húmeda del material	1,7283	1,712	1,7425
Humedad (%)	2,060	2,410	2,240
Densidad seca del material (gr/cm ³)	1,693	1,671	1,704
CONTENIDO DE HUMEDAD			
Tara Nº	1	2	3
Peso del recipiente + suelo húmedo (grs.)	102,76	139,46	119,86
Peso del recipiente + suelo seco (grs.)	102,23	138,04	118,96
Peso del recipiente (grs.)	76,53	79,09	78,82
Peso del suelo seco (grs.)	25,70	58,95	40,14
Peso del Agua (grs.)	0,53	1,42	0,90
Contenido de humedad (%)	2,06	2,41	2,24
Observaciones	Humedades determinadas en horno		
Recomendaciones	_____		
ENSAYO	REVISO		
Firma	Firma		

DENSIDAD EN LABORATORIO			
Localización	MUNICIPIO DE OCAÑA N.S SECTOR DE LA GRANJA UFPSO		
Descripción	ARENISCA		
Profundidad	1,4 metros	Fecha	Mayo 25 de 2017
PRUEBA Nº	1	2	3
Peso de la muestra (grs)	408,2	437,43	313,73
Peso de la muestra + parafina (grs)	429,86	454,29	326,51
Peso sumergido (grs)	184,89	205,6	143,7
Peso parafina (grs)	21,66	16,86	12,78
Densidad de la parafina (gr/cm ³)	0,8915	0,8915	0,8915
Volumen de la parafina (cm ³)	24,296	18,912	14,335
Volumen de la muestra + parafina (cm ³)	244,97	248,69	182,81
Volumen de la muestra (cm ³)	220,674	229,778	168,475
Densidad húmeda del material	1,850	1,904	1,862
Humedad (%)	3,450	3,730	2,980
Densidad seca del material (gr/cm ³)	1,788	1,835	1,808
CONTENIDO DE HUMEDAD			
Tara Nº	1	2	3
Peso del recipiente + suelo húmedo (grs.)	123,89	122,82	136,62
Peso del recipiente + suelo seco (grs.)	122,39	121,34	134,98
Peso del recipiente (grs.)	78,96	81,62	79,99
Peso del suelo seco (grs.)	43,43	39,72	54,99
Peso del Agua (grs.)	1,50	1,48	1,64
Contenido de humedad (%)	3,45	3,73	2,98
Observaciones	Humedades determinadas en horno		
Recomendaciones			
ENSAYO	REVISO		
Firma	Firma		

DENSIDAD EN LABORATORIO			
Localización	MUNICIPIO DE OCAÑA N.S SECTOR DE LA GRANJA UFPSO		
Descripción	PAN DE JABÓN		
Profundidad	2 metros	Fecha	Mayo 25 de 2017
PRUEBA Nº	1	2	3
Peso de la muestra (grs)	233,08	395,05	525,43
Peso de la muestra + parafina (grs)	241,51	413,41	547,51
Peso sumergido (grs)	116,5	203	267,33
Peso parafina (grs)	8,43	18,36	22,08
Densidad de la parafina (gr/cm ³)	0,8915	0,8915	0,8915
Volumen de la parafina (cm ³)	9,456	20,595	24,767
Volumen de la muestra + parafina (cm ³)	125,01	210,41	280,18
Volumen de la muestra (cm ³)	115,554	189,815	255,413
Densidad húmeda del material	2,017	2,081	2,057
Humedad (%)	6,780	7,630	7,570
Densidad seca del material (gr/cm ³)	1,889	1,934	1,912
CONTENIDO DE HUMEDAD			
Tara Nº	1	2	3
Peso del recipiente + suelo húmedo (grs.)	122,74	114,34	104,96
Peso del recipiente + suelo seco (grs.)	119,92	112,32	103,34
Peso del recipiente (grs.)	78,32	85,83	81,93
Peso del suelo seco (grs.)	41,60	26,49	21,41
Peso del Agua (grs.)	2,82	2,02	1,62
Contenido de humedad (%)	6,78	7,63	7,57
Observaciones	Humedades determinadas en horno		
Recomendaciones			
ENSAYO	REVISO		
Firma	Firma		

DENSIDAD EN LABORATORIO			
Localización	MUNICIPIO DE OCAÑA N.S SECTOR DE LA GRANJA UFPSO		
Descripción	PAN DE JABÓN		
Profundidad	2,2 metros	Fecha	Mayo 25 de 2017
PRUEBA Nº	1	2	3
Peso de la muestra (grs)	274,24	307,15	247,06
Peso de la muestra + parafina (grs)	283,75	325,48	259,87
Peso sumergido (grs)	137,2	154,9	125,3
Peso parafina (grs)	9,51	18,33	12,81
Densidad de la parafina (gr/cm ³)	0,8915	0,8915	0,8915
Volumen de la parafina (cm ³)	10,667	20,561	14,369
Volumen de la muestra + parafina (cm ³)	146,55	170,58	134,57
Volumen de la muestra (cm ³)	135,883	150,019	120,201
Densidad húmeda del material	2,018	2,047	2,055
Humedad (%)	6,500	6,400	7,690
Densidad seca del material (gr/cm ³)	1,895	1,924	1,909
CONTENIDO DE HUMEDAD			
Tara Nº	1	2	3
Peso del recipiente + suelo húmedo (grs.)	115,87	107,68	112,90
Peso del recipiente + suelo seco (grs.)	114,06	106,48	110,57
Peso del recipiente (grs.)	86,22	87,72	80,28
Peso del suelo seco (grs.)	27,84	18,76	30,29
Peso del Agua (grs.)	1,81	1,20	2,33
Contenido de humedad (%)	6,50	6,40	7,69
<p>Observaciones <u>Humedades determinadas en horno</u></p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>Recomendaciones</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p>			
ENSAYO		REVISO	
Firma		Firma	

DENSIDAD EN LABORATORIO			
Localización	MUNICIPIO DE OCAÑA N.S SECTOR DE LANDIA		
Descripción	CONGLOMERADO		
Profundidad	0,2 metros	Fecha	Marzo 24 de 2017
PRUEBA Nº	1	2	3
Peso de la muestra (grs)	44,52	59,7	31,62
Peso de la muestra + parafina (grs)	48,86	63,91	34,22
Peso sumergido (grs)	18,3	24,8	13,2
Peso parafina (grs)	4,34	4,21	2,6
Densidad de la parafina (gr/cm ³)	0,8915	0,8915	0,8915
Volumen de la parafina (cm ³)	4,868	4,722	2,916
Volumen de la muestra + parafina (cm ³)	30,56	39,11	21,02
Volumen de la muestra (cm ³)	25,692	34,388	18,104
Densidad húmeda del material	1,733	1,736	1,747
Humedad (%)	6,870	6,260	6,590
Densidad seca del material (gr/cm ³)	1,621	1,634	1,639
CONTENIDO DE HUMEDAD			
Tara Nº	1	2	3
Peso del recipiente + suelo húmedo (grs.)	92,94	96,47	90,29
Peso del recipiente + suelo seco (grs.)	91,83	95,31	89,58
Peso del recipiente (grs.)	75,67	76,78	78,81
Peso del suelo seco (grs.)	16,16	18,53	10,77
Peso del Agua (grs.)	1,11	1,16	0,71
Contenido de humedad (%)	6,87	6,26	6,59
Observaciones	Humedades determinadas en horno		
Recomendaciones	_____		
ENSAYO	REVISO		
Firma	Firma		

DENSIDAD EN LABORATORIO			
Localización	MUNICIPIO DE OCAÑA N.S SECTOR DE LANDIA		
Descripción	CONGLOMERADO		
Profundidad	2,4 metros	Fecha	Marzo 24 de 2017
PRUEBA Nº	1	2	3
Peso de la muestra (grs)	140,16	151,23	73,26
Peso de la muestra + parafina (grs)	153,95	159,89	77,7
Peso sumergido (grs)	60,9	66,69	31,8
Peso parafina (grs)	13,79	8,66	4,44
Densidad de la parafina (gr/cm ³)	0,8915	0,8915	0,8915
Volumen de la parafina (cm ³)	15,468	9,714	4,980
Volumen de la muestra + parafina (cm ³)	93,05	93,2	45,9
Volumen de la muestra (cm ³)	77,582	83,486	40,920
Densidad húmeda del material	1,807	1,811	1,790
Humedad (%)	5,170	5,440	4,810
Densidad seca del material (gr/cm ³)	1,718	1,718	1,708
CONTENIDO DE HUMEDAD			
Tara Nº	1	2	3
Peso del recipiente + suelo húmedo (grs.)	111,87	123,07	101,57
Peso del recipiente + suelo seco (grs.)	110,37	120,82	100,58
Peso del recipiente (grs.)	81,33	79,43	80,01
Peso del suelo seco (grs.)	29,04	41,39	20,57
Peso del Agua (grs.)	1,50	2,25	0,99
Contenido de humedad (%)	5,17	5,44	4,81
Observaciones	Humedades determinadas en horno		
Recomendaciones			
ENSAYO	REVISO		
Firma	Firma		

DENSIDAD EN LABORATORIO			
Localización	MUNICIPIO DE OCAÑA N.S SECTOR DE LANDIA		
Descripción	PAN DE JABÓN		
Profundidad	4,5 metros	Fecha	Marzo 24 de 2017
PRUEBA Nº	1	2	3
Peso de la muestra (grs)	79,15	97,93	105,66
Peso de la muestra + parafina (grs)	87,13	107,75	114,86
Peso sumergido (grs)	37,3	45,9	48,82
Peso parafina (grs)	7,98	9,82	9,2
Densidad de la parafina (gr/cm ³)	0,8915	0,8915	0,8915
Volumen de la parafina (cm ³)	8,951	11,015	10,320
Volumen de la muestra + parafina (cm ³)	49,83	61,85	66,04
Volumen de la muestra (cm ³)	40,879	50,835	55,720
Densidad húmeda del material	1,936	1,926	1,896
Humedad (%)	6,850	7,150	6,630
Densidad seca del material (gr/cm ³)	1,812	1,797	1,778
CONTENIDO DE HUMEDAD			
Tara Nº	1	2	3
Peso del recipiente + suelo húmedo (grs.)	93,54	89,37	105,33
Peso del recipiente + suelo seco (grs.)	92,64	88,52	104,25
Peso del recipiente (grs.)	79,51	76,64	88,01
Peso del suelo seco (grs.)	13,13	11,88	16,24
Peso del Agua (grs.)	0,90	0,85	1,08
Contenido de humedad (%)	6,85	7,15	6,63
Observaciones	Humedades determinadas en horno		
Recomendaciones			
ENSAYO	REVISO		
Firma	Firma		

DENSIDAD EN LABORATORIO			
Localización	MUNICIPIO DE OCAÑA N.S SECTOR DE LANDIA		
Descripción	PAN DE JABÓN		
Profundidad	6,5 metros	Fecha	Marzo 24 de 2017
PRUEBA Nº	1	2	3
Peso de la muestra (grs)	287,05	100,39	244,36
Peso de la muestra + parafina (grs)	324,87	117,53	266,73
Peso sumergido (grs)	137,8	47,7	114,9
Peso parafina (grs)	37,82	17,14	22,37
Densidad de la parafina (gr/cm ³)	0,8915	0,8915	0,8915
Volumen de la parafina (cm ³)	42,423	19,226	25,093
Volumen de la muestra + parafina (cm ³)	187,07	69,83	151,83
Volumen de la muestra (cm ³)	144,647	50,604	126,737
Densidad húmeda del material	1,984	1,984	1,928
Humedad (%)	9,640	10,390	9,350
Densidad seca del material (gr/cm ³)	1,810	1,797	1,763
CONTENIDO DE HUMEDAD			
Tara Nº	1	2	3
Peso del recipiente + suelo húmedo (grs.)	118,17	128,26	120,17
Peso del recipiente + suelo seco (grs.)	114,62	123,56	116,74
Peso del recipiente (grs.)	77,79	78,33	80,07
Peso del suelo seco (grs.)	36,83	45,23	36,67
Peso del Agua (grs.)	3,55	4,70	3,43
Contenido de humedad (%)	9,64	10,39	9,35
Observaciones	Humedades determinadas en horno		
Recomendaciones			
ENSAYO	REVISO		
Firma	Firma		

DENSIDAD EN LABORATORIO			
Localización	MUNICIPIO DE OCAÑA N.S SECTOR DE LA VÍA A LA UNIVERSIDAD		
Descripción	MATERIAL SUPERFICIAL		
Profundidad	0,2 metros	Fecha	Abril 24 de 2017
PRUEBA Nº	1	2	3
Peso de la muestra (grs)	445,24	189,42	270,53
Peso de la muestra + parafina (grs)	475,98	221,71	300,92
Peso sumergido (grs)	190,71	79,3	113,8
Peso parafina (grs)	30,74	32,29	30,39
Densidad de la parafina (gr/cm ³)	0,8915	0,8915	0,8915
Volumen de la parafina (cm ³)	34,481	36,220	34,089
Volumen de la muestra + parafina (cm ³)	285,27	142,41	187,12
Volumen de la muestra (cm ³)	250,789	106,190	153,031
Densidad húmeda del material	1,775	1,784	1,768
Humedad (%)	8,400	8,340	8,870
Densidad seca del material (gr/cm ³)	1,638	1,646	1,624
CONTENIDO DE HUMEDAD			
Tara Nº	1	2	3
Peso del recipiente + suelo húmedo (grs.)	134,07	136,36	128,74
Peso del recipiente + suelo seco (grs.)	130,36	132,47	125,38
Peso del recipiente (grs.)	86,21	85,84	87,50
Peso del suelo seco (grs.)	44,15	46,63	37,88
Peso del Agua (grs.)	3,71	3,89	3,36
Contenido de humedad (%)	8,40	8,34	8,87
Observaciones	Humedades determinadas en horno		
Recomendaciones	_____		
ENSAYO	REVISO		
Firma	Firma		

DENSIDAD EN LABORATORIO			
Localización	MUNICIPIO DE OCAÑA N.S SECTOR DE LA VÍA A LA UNIVERSIDAD		
Descripción	MATERIAL SUPERFICIAL		
Profundidad	0,4 metros	Fecha	Abril 24 de 2017
PRUEBA Nº	1	2	3
Peso de la muestra (grs)	197,61	261,65	285,38
Peso de la muestra + parafina (grs)	214,07	276,5	306,41
Peso sumergido (grs)	82,6	113,19	122,3
Peso parafina (grs)	16,46	14,85	21,03
Densidad de la parafina (gr/cm ³)	0,8915	0,8915	0,8915
Volumen de la parafina (cm ³)	18,463	16,657	23,589
Volumen de la muestra + parafina (cm ³)	131,47	163,31	184,11
Volumen de la muestra (cm ³)	113,007	146,653	160,521
Densidad húmeda del material	1,749	1,784	1,778
Humedad (%)	8,590	8,650	8,670
Densidad seca del material (gr/cm ³)	1,610	1,642	1,636
CONTENIDO DE HUMEDAD			
Tara Nº	1	2	3
Peso del recipiente + suelo húmedo (grs.)	140,26	130,61	138,40
Peso del recipiente + suelo seco (grs.)	135,40	126,71	133,60
Peso del recipiente (grs.)	78,83	81,63	78,22
Peso del suelo seco (grs.)	56,57	45,08	55,38
Peso del Agua (grs.)	4,86	3,90	4,80
Contenido de humedad (%)	8,59	8,65	8,67
Observaciones	Humedades determinadas en horno		
Recomendaciones			
ENSAYO	REVISO		
Firma	Firma		

DENSIDAD EN LABORATORIO			
Localización	MUNICIPIO DE OCAÑA N.S SECTOR DE LA VÍA A LA UNIVERSIDAD		
Descripción	PAN DE JABÓN		
Profundidad	2,5 metros	Fecha	Abril 24 de 2017
PRUEBA Nº	1	2	3
Peso de la muestra (grs)	286,76	195,13	477,99
Peso de la muestra + parafina (grs)	298,29	219,97	493,82
Peso sumergido (grs)	119,4	89,6	226,5
Peso parafina (grs)	11,53	24,84	15,83
Densidad de la parafina (gr/cm ³)	0,8915	0,8915	0,8915
Volumen de la parafina (cm ³)	12,933	27,863	17,757
Volumen de la muestra + parafina (cm ³)	178,89	130,37	267,32
Volumen de la muestra (cm ³)	165,957	102,507	249,563
Densidad húmeda del material	1,728	1,904	1,915
Humedad (%)	14,430	15,320	14,380
Densidad seca del material (gr/cm ³)	1,509	1,651	1,675
CONTENIDO DE HUMEDAD			
Tara Nº	1	2	3
Peso del recipiente + suelo húmedo (grs.)	112,36	106,09	115,12
Peso del recipiente + suelo seco (grs.)	108,16	102,16	110,95
Peso del recipiente (grs.)	79,06	76,50	81,95
Peso del suelo seco (grs.)	29,10	25,66	29,00
Peso del Agua (grs.)	4,20	3,93	4,17
Contenido de humedad (%)	14,43	15,32	14,38
<p>Observaciones <u>Humedades determinadas en horno</u></p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>Recomendaciones</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p>			
ENSAYO	REVISO		
Firma	Firma		

DENSIDAD EN LABORATORIO			
Localización	MUNICIPIO DE OCAÑA N.S SECTOR DE LA VÍA A LA UNIVERSIDAD		
Descripción	PAN DE JABÓN		
Profundidad	4 metros	Fecha	Abril 24 de 2017
PRUEBA Nº	1	2	3
Peso de la muestra (grs)	371,93	425,51	241,01
Peso de la muestra + parafina (grs)	424,47	476,81	286,97
Peso sumergido (grs)	171,4	194,8	109
Peso parafina (grs)	52,54	51,3	45,96
Densidad de la parafina (gr/cm ³)	0,8915	0,8915	0,8915
Volumen de la parafina (cm ³)	58,934	57,543	51,554
Volumen de la muestra + parafina (cm ³)	253,07	282,01	177,97
Volumen de la muestra (cm ³)	194,136	224,467	126,416
Densidad húmeda del material	1,916	1,896	1,906
Humedad (%)	14,170	15,220	13,960
Densidad seca del material (gr/cm ³)	1,678	1,645	1,673
CONTENIDO DE HUMEDAD			
Tara Nº	1	2	3
Peso del recipiente + suelo húmedo (grs.)	106,18	112,02	110,86
Peso del recipiente + suelo seco (grs.)	102,93	107,83	106,95
Peso del recipiente (grs.)	80,00	80,30	78,94
Peso del suelo seco (grs.)	22,93	27,53	28,01
Peso del Agua (grs.)	3,25	4,19	3,91
Contenido de humedad (%)	14,17	15,22	13,96
Observaciones	Humedades determinadas en horno		
Recomendaciones			
ENSAYO	REVISO		
Firma	Firma		

Apéndice D. Formatos de ensayos de densidad en terreno

DENSIDAD EN EL TERRENO									
Localización	MUNICIPIO DE OCAÑA N.S SECTOR DE LIBARDO ALONSO								
Descripción	CONGLOMERADO								
Profundidad	0 metros			Fecha	Junio 1de 2017				
PRUEBA Nº	1			2			3		
Material	CONGLOMERADO			CONGLOMERADO			CONGLOMERADO		
Peso de frasco + arena inicial (grs.)	6218,00			6195,00			6189,00		
peso de frasco + arena restante (grs.)	3061,00			3095,00			3075,00		
Peso de arena total usada (grs.)	3157,00			3100,00			3114,00		
Constante del cono	1742,00			1742,00			1742,00		
Peso arena en el hueco (grs.)	1415,00			1358,00			1372,00		
Densidad de la arena (gr/cm ³)	1,406			1,406			1,406		
Volumen del hueco (cm ³)	1006,40			965,86			975,82		
Peso material extraído húmedo (grs.)	1844,00			1781,00			1792,00		
Densidad húmeda del material	1,832			1,844			1,836		
Humedad (%)	11,145			10,595			12,406		
Peso material extraído seco (grs.)	1659,09			1610,38			1594,22		
Densidad seca del material (gr/cm ³)	1,649			1,667			1,634		
CONTENIDO DE HUMEDAD									
Tara Nº	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Peso del recipiente + suelo húmedo (grs.)	200,02	189,99	176,42	194,12	177,43	196,02	199,01	192,97	190,25
Peso del recipiente + suelo seco (grs.)	189,01	179,11	166,52	183,99	167,87	184,84	185,24	180,83	178,09
Peso del recipiente (grs.)	85,31	83,40	80,06	87,74	78,95	78,45	70,53	79,93	85,85
Peso del suelo seco (grs.)	103,70	95,71	86,46	96,25	88,92	106,39	114,71	100,90	92,24
Peso del Agua (grs.)	11,01	10,88	9,90	10,13	9,56	11,18	13,77	12,14	12,16
Contenido de humedad (%)	10,62	10,60	11,45	10,52	10,75	10,51	12,00	12,03	13,18
Humedad promedio (%)	11,145			10,595			12,406		
Observaciones	Humedades determinadas en horno								
Recomendaciones									
ENSAYO	REVISOR								
Firma	Firma								

DENSIDAD EN EL TERRENO										
Localización	MUNICIPIO DE OCAÑA N.S SECTOR DE LIBARDO ALONSO									
Descripción	PAN DE JABÓN									
Profundidad	1,1 metros				Fecha	Junio 1de 2017				
PRUEBA Nº	1			2						
Material	PAN DE JABÓN			PAN DE JABÓN						
Peso de frasco + arena inicial (grs.)	6222,00			6221,00						
peso de frasco + arena restante (grs.)	3359,00			3138,00						
Peso de arena total usada (grs.)	2863,00			3083,00						
Constante del cono	1742,00			1742,00						
Peso arena en el hueco (grs.)	1121,00			1341,00						
Densidad de la arena (gr/cm ³)	1,406			1,406						
Volumen del hueco (cm ³)	797,30			953,77						
Peso material extraído húmedo (grs.)	1457,00			1747,00						
Densidad húmeda del material	1,827			1,832						
Humedad (%)	13,762			13,574						
Peso material extraído seco (grs.)	1280,74			1538,20						
Densidad seca del material (gr/cm ³)	1,606			1,613						
CONTENIDO DE HUMEDAD										
Tara Nº	1	2	3	1	2	3				
Peso del recipiente + suelo húmedo (grs.)	194,98	181,68	189,58	189,15	176,53	175,13				
Peso del recipiente + suelo seco (grs.)	180,67	169,87	176,85	176,44	164,66	164,68				
Peso del recipiente (grs.)	78,85	80,32	86,21	81,94	78,24	87,48				
Peso del suelo seco (grs.)	101,82	89,55	90,64	94,50	86,42	77,20				
Peso del Agua (grs.)	14,31	11,81	12,73	12,71	11,87	10,45				
Contenido de humedad (%)	14,05	13,19	14,04	13,45	13,74	13,54				
Humedad promedio (%)	13,762			13,574						
Observaciones	Humedades determinadas en horno									
Recomendaciones										
ENSAYO	REVISO									
Firma	Firma									

DENSIDAD EN EL TERRENO									
Localización	MUNICIPIO DE OCAÑA N.S SECTOR DE LA CIRCUNVALAR								
Descripción	CONGLOMERADO								
Profundidad	0 metros				Fecha	Junio 1de 2017			
PRUEBA Nº	1			2					
Material	CONGLOMERADO			CONGLOMERADO					
Peso de frasco + arena inicial (grs.)	6280,00			6275,00					
peso de frasco + arena restante (grs.)	3097,00			2917,00					
Peso de arena total usada (grs.)	3183,00			3358,00					
Constante del cono	1742,00			1742,00					
Peso arena en el hueco (grs.)	1441,00			1616,00					
Densidad de la arena (gr/cm ³)	1,406			1,406					
Volumen del hueco (cm ³)	1024,89			1149,36					
Peso material extraído húmedo (grs.)	1869,00			2088,00					
Densidad húmeda del material	1,824			1,817					
Humedad (%)	15,213			13,679					
Peso material extraído seco (grs.)	1622,21			1836,75					
Densidad seca del material (gr/cm ³)	1,583			1,598					
CONTENIDO DE HUMEDAD									
Tara Nº	1	2	3	1	2	3			
Peso del recipiente + suelo húmedo (grs.)	168,28	170,94	177,83	191,43	188,43	176,96			
Peso del recipiente + suelo seco (grs.)	156,02	158,26	164,36	177,65	175,34	165,06			
Peso del recipiente (grs.)	75,33	75,36	80,06	77,27	78,15	79,08			
Peso del suelo seco (grs.)	80,69	82,90	84,30	100,38	97,19	85,98			
Peso del Agua (grs.)	12,26	12,68	13,47	13,78	13,09	11,90			
Contenido de humedad (%)	15,19	15,30	15,15	13,73	13,47	13,84			
Humedad promedio (%)	15,213			13,679					
Observaciones	Humedades determinadas en horno								
Recomendaciones									
ENSAYO					REVISO				
Firma					Firma				

DENSIDAD EN EL TERRENO										
Localización	MUNICIPIO DE OCAÑA N.S SECTOR DE LA CIRCUNVALAR									
Descripción	CONGLOMERADO									
Profundidad	0,5 metros				Fecha	Junio 1de 2017				
PRUEBA Nº	1			2						
Material	CONGLOMERADO			CONGLOMERADO						
Peso de frasco + arena inicial (grs.)	6265,00			6251,00						
peso de frasco + arena restante (grs.)	2713,00			3044,00						
Peso de arena total usada (grs.)	3552,00			3207,00						
Constante del cono	1742,00			1742,00						
Peso arena en el hueco (grs.)	1810,00			1465,00						
Densidad de la arena (gr/cm ³)	1,406			1,406						
Volumen del hueco (cm ³)	1287,34			1041,96						
Peso material extraído húmedo (grs.)	2303,00			1858,00						
Densidad húmeda del material	1,789			1,783						
Humedad (%)	10,280			10,604						
Peso material extraído seco (grs.)	2088,32			1679,87						
Densidad seca del material (gr/cm ³)	1,622			1,612						
CONTENIDO DE HUMEDAD										
Tara Nº	1	2	3	1	2	3				
Peso del recipiente + suelo húmedo (grs.)	170,34	162,18	162,93	174,16	178,43	175,67				
Peso del recipiente + suelo seco (grs.)	161,57	154,74	154,62	164,96	168,73	166,20				
Peso del recipiente (grs.)	75,93	81,61	74,91	76,84	79,04	76,49				
Peso del suelo seco (grs.)	85,64	73,13	79,71	88,12	89,69	89,71				
Peso del Agua (grs.)	8,77	7,44	8,31	9,20	9,70	9,47				
Contenido de humedad (%)	10,24	10,17	10,43	10,44	10,82	10,56				
Humedad promedio (%)	10,28			10,604						
Observaciones	Humedades determinadas en horno									
Recomendaciones										
ENSAYO	REVISO									
Firma	Firma									

Apéndice E. Registro fotográfico.

Montaje de la línea de adquisición
Fuente. Autores, 2017.



Disparos
Fuente. Autores, 2017.



Adquisición de datos
Fuente. Autores, 2017.



Levantamientos topográficos
Fuente. Autores, 2017.



Instalación de geófonos
Fuente. Autores, 2017.



Realización de ensayos de laboratorio
Fuente. Autores, 2017.



Realización de ensayos de campo
Fuente. Autores, 2017.

Apéndice F. Análisis estadístico de las zonas sur-oriente y centro-occidente.

Zonas Sur-Oriente

MATERIAL CONGLOMERATICO

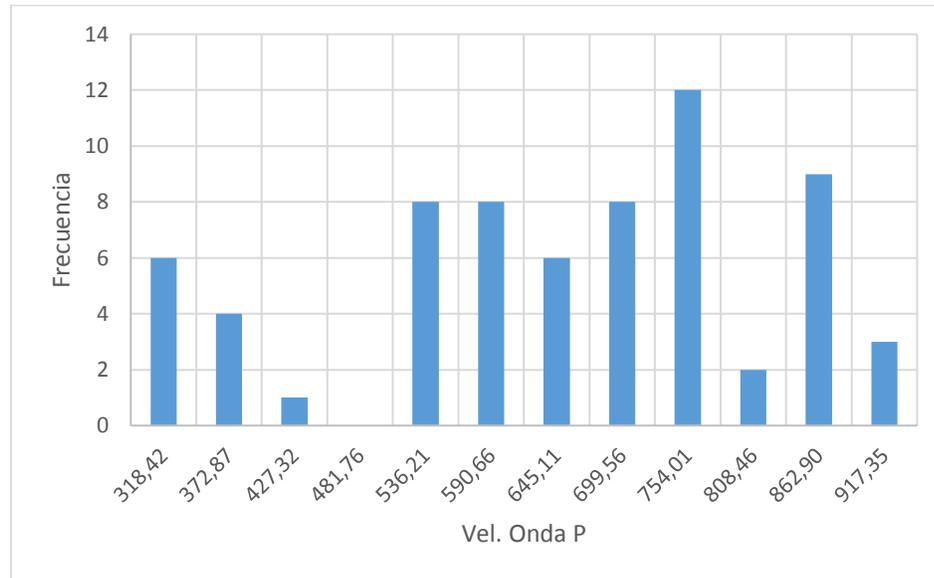


Figura 217. Histograma de los valores de velocidad de Onda P.

Fuente: Autores, 2017.

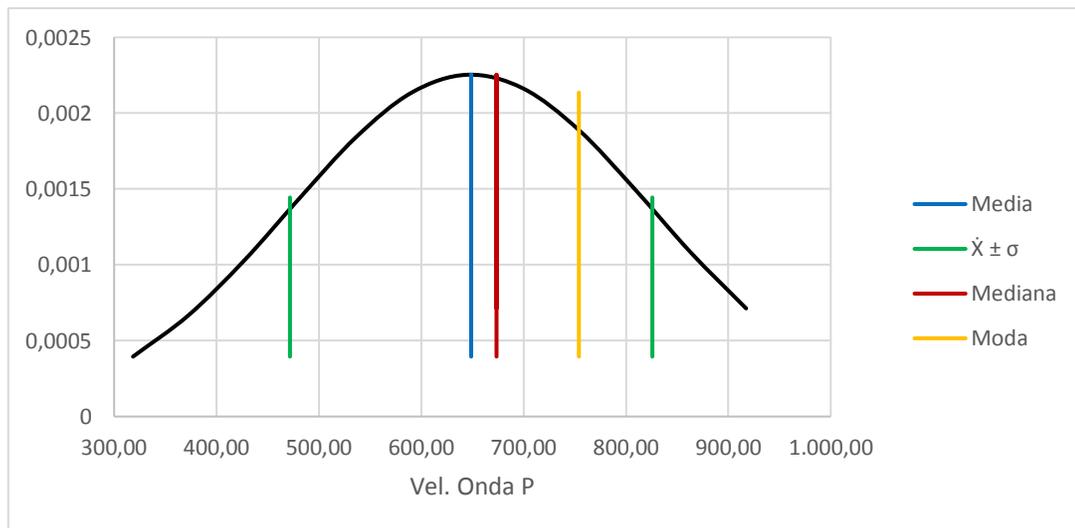


Figura 218. Distribución de los valores de velocidad de onda P.

Fuente: Autores, 2017.

Tabla 35. Medidas estadísticas de los valores de velocidad de onda P.

<i>Resumen Vp</i>	
Media	648,767
Error típico	21,623
Mediana	673,557
Moda	754,007
Desviación estándar	176,988
Varianza de la muestra	31324,687
Curtosis	-0,600
Coefficiente de asimetría	-0,451
Rango	653,380
Mínimo	291,195
Máximo	944,575
Suma	43467,380
Cuenta	67,000
Nivel de confianza (95,0%)	43,171

Fuente: Autores, 2017.

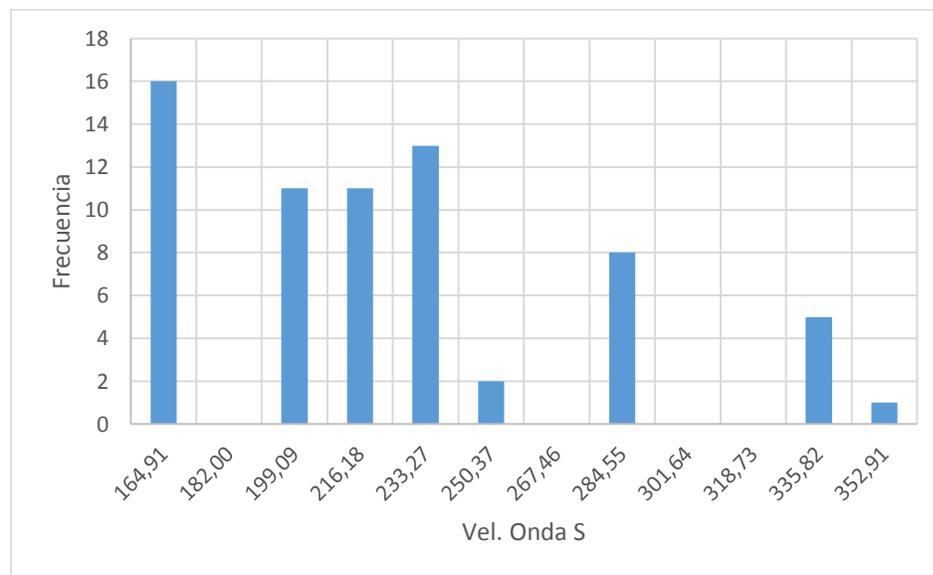


Figura 219. Histograma de los valores de velocidad de Onda S.

Fuente: Autores, 2017.

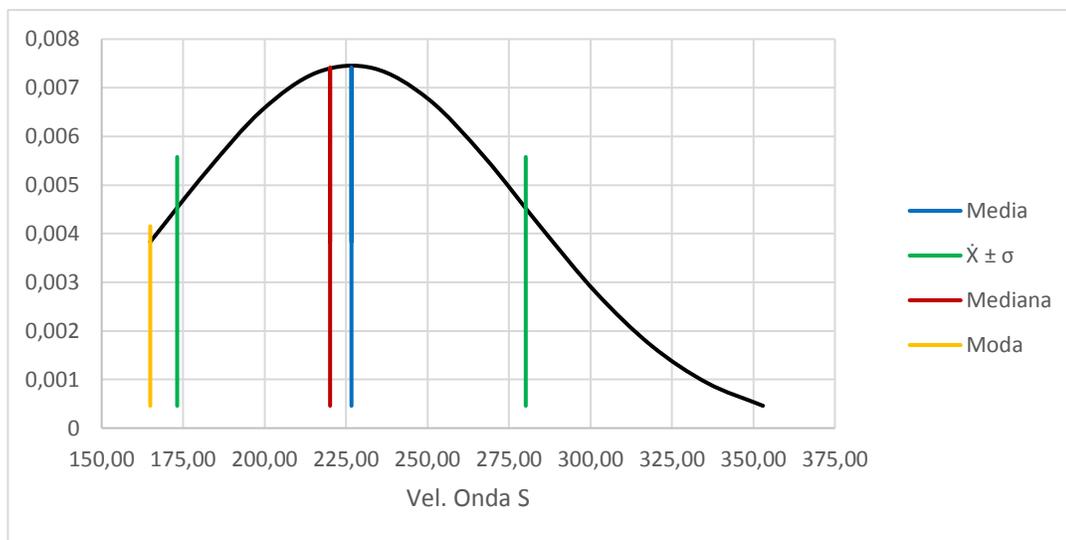


Figura 220. Distribución de los valores de velocidad de onda S.

Fuente: Autores, 2017.

Tabla 36. Medidas estadísticas de los valores de velocidad de onda S.

<i>Resumen Vs</i>	
Media	226,650
Error típico	6,533
Mediana	220,091
Moda	163,908
Desviación estándar	53,479
Varianza de la muestra	2859,971
Curtosis	0,001
Coefficiente de asimetría	0,743
Rango	205,096
Mínimo	156,362
Máximo	361,458
Suma	15185,531
Cuenta	67,000
Nivel de confianza (95,0%)	13,044

Fuente: Autores, 2017.

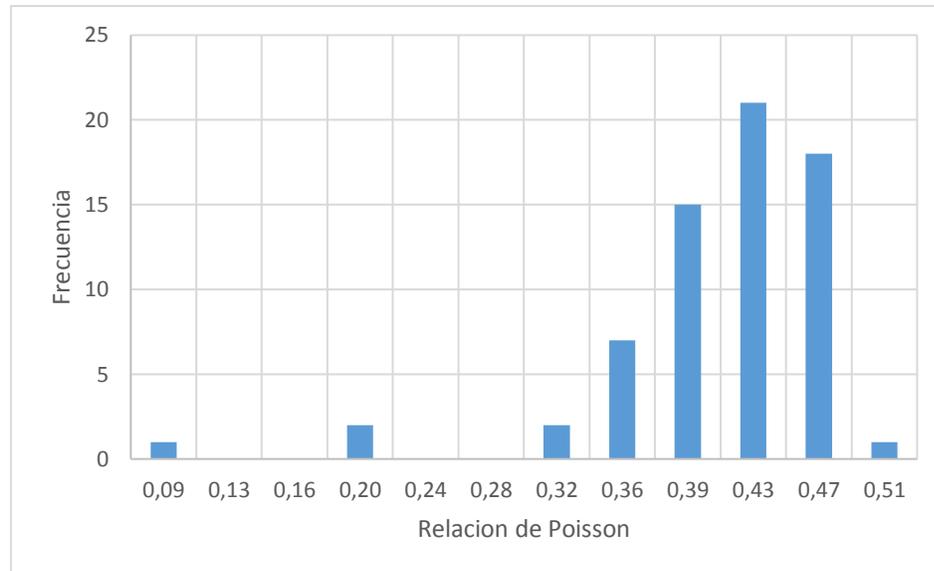


Figura 221. Histograma de los valores de coeficiente de Poisson.

Fuente: Autores, 2017.

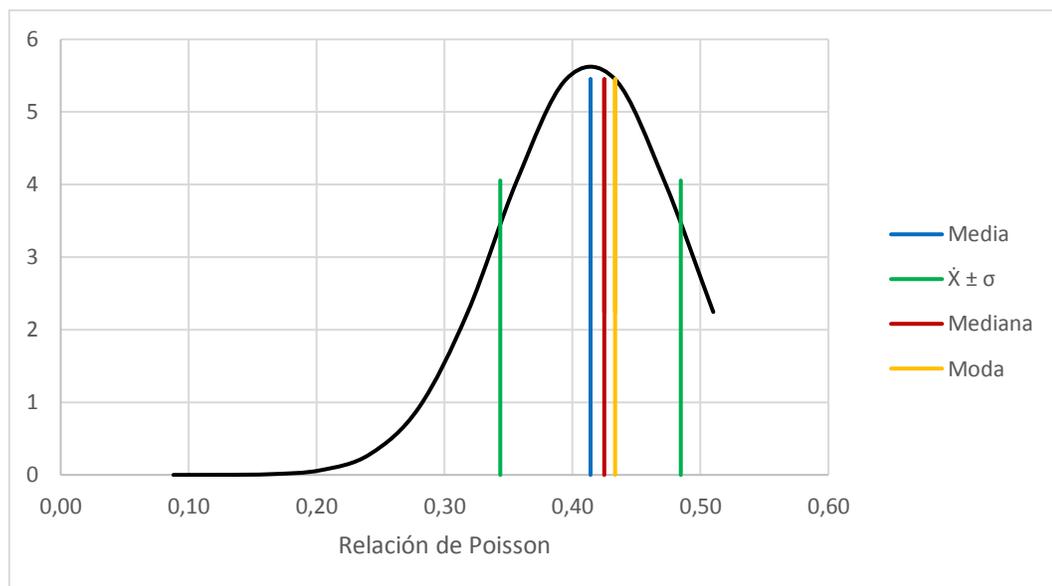


Figura 222. Distribución de los valores de coeficiente de Poisson.

Fuente: Autores, 2017.

Tabla 37. Medidas estadísticas de los valores de coeficiente de Poisson.

<i>Resumen σ</i>	
Media	0,414
Error típico	0,009
Mediana	0,425
Moda	0,433
Desviación estándar	0,071
Varianza de la muestra	0,005
Curtosis	10,002
Coefficiente de asimetría	-2,716
Rango	0,459
Mínimo	0,069
Máximo	0,528
Suma	27,745
Cuenta	67,000
Nivel de confianza (95,0%)	0,017

Fuente: Autores, 2017.

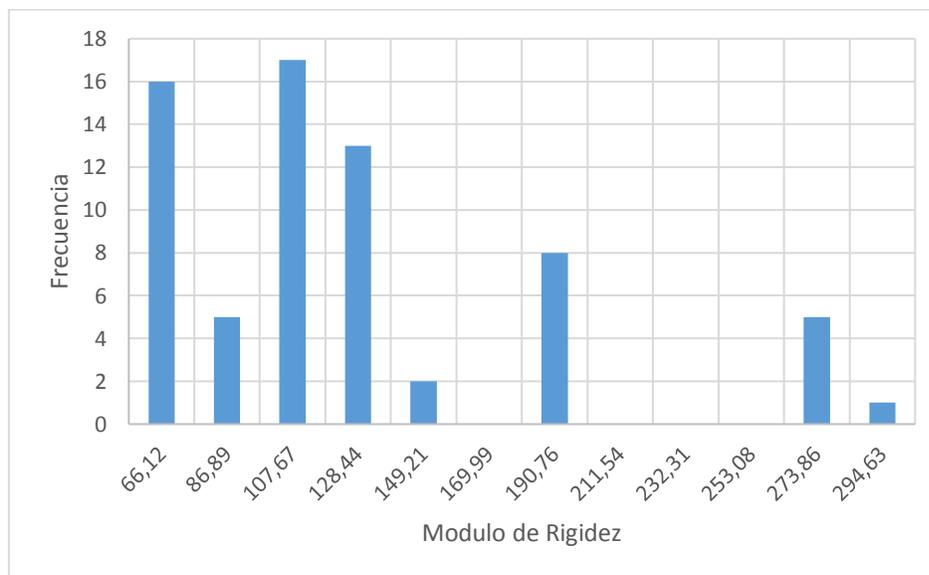


Figura 223. Histograma de los valores de módulo de rigidez.

Fuente: Autores, 2017.

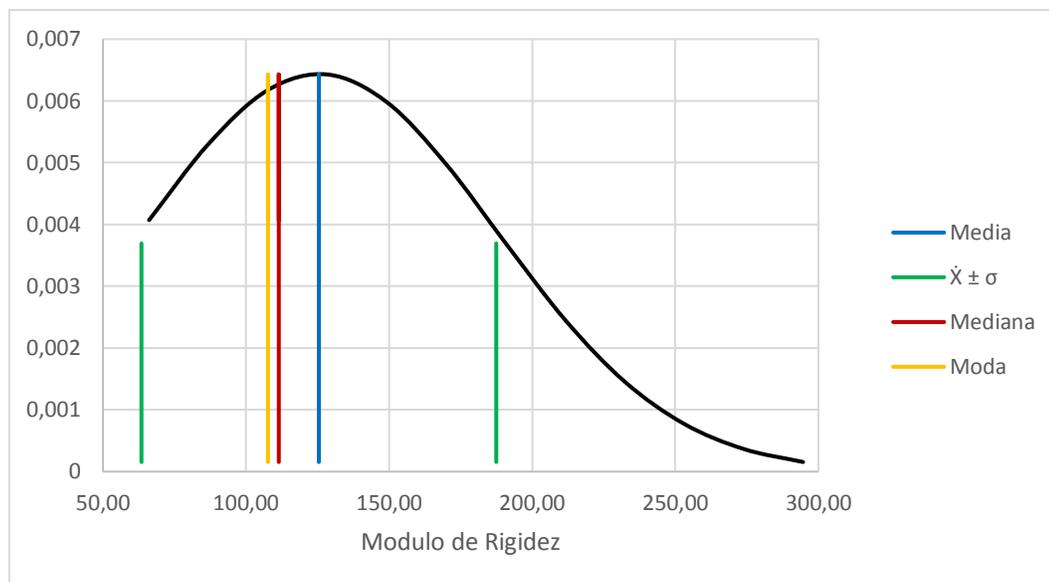


Figura 224. Distribución de los valores de módulo de rigidez.

Fuente: Autores, 2017.

Tabla 38. Medidas estadísticas de los valores de módulo de rigidez.

<i>Resumen G</i>	
Media	125,436
Error típico	7,573
Mediana	111,442
Moda	107,666
Desviación estándar	61,989
Varianza de la muestra	3842,691
Curtosis	0,924
Coefficiente de asimetría	1,215
Rango	249,286
Mínimo	55,731
Máximo	305,017
Suma	8404,183
Cuenta	67,000
Nivel de confianza (95,0%)	15,120

Fuente: Autores, 2017.

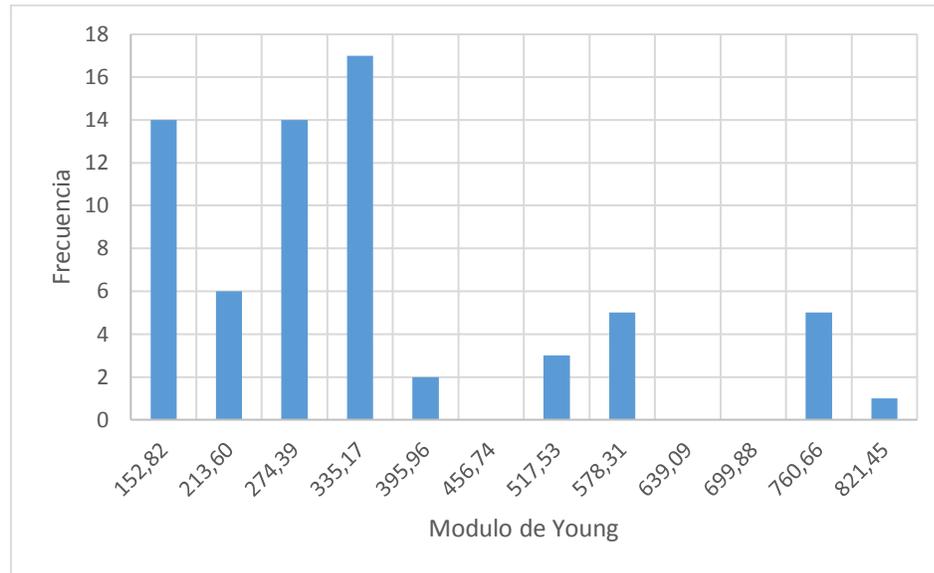


Figura 225. Histograma de los valores de módulo de Young.

Fuente: Autores, 2017.

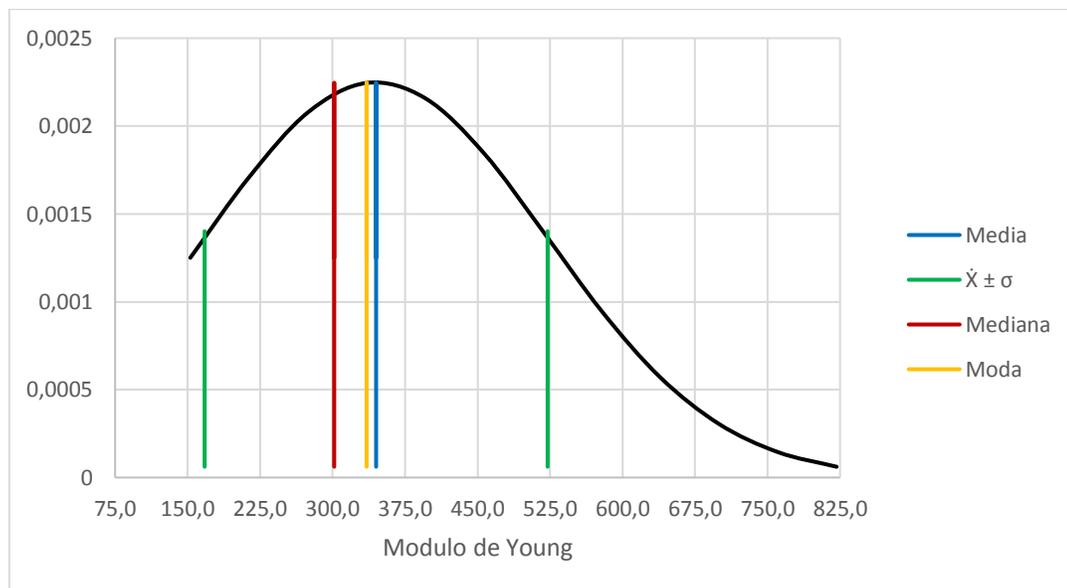


Figura 226. Distribución de los valores de módulo de Young.

Fuente: Autores, 2017.

Tabla 39. Medidas estadísticas de los valores de módulo de Young.

<i>Resumen E</i>	
Media	345,040
Error típico	21,675
Mediana	301,642
Moda	335,171
Desviación estándar	177,420
Varianza de la muestra	31477,719
Curtosis	0,817
Coefficiente de asimetría	1,215
Rango	729,416
Mínimo	122,424
Máximo	851,840
Suma	23117,700
Cuenta	67,000
Nivel de confianza (95,0%)	43,276

Fuente: Autores, 2017.

ARCILLOLITAS

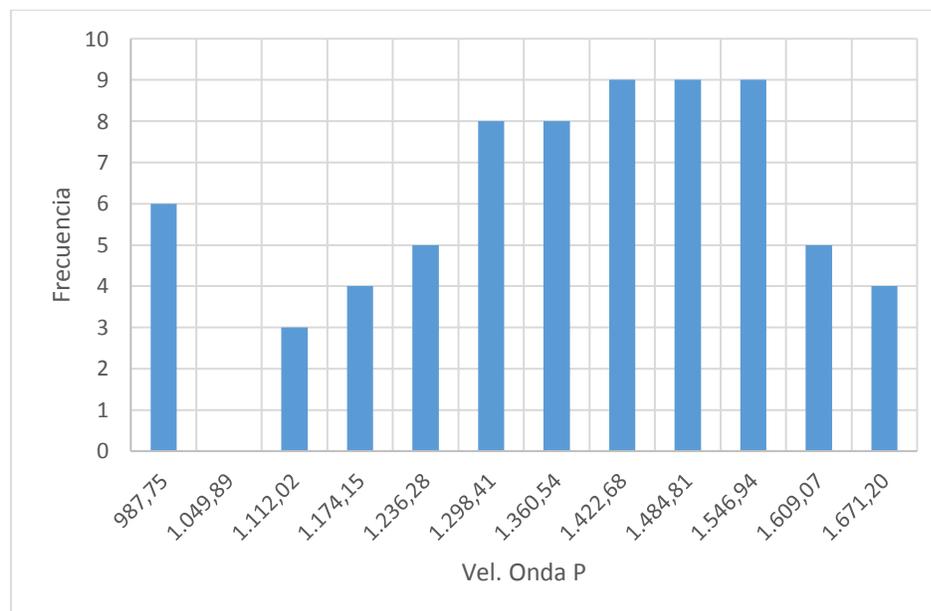


Figura 227. Histograma de los valores de velocidad de Onda P.

Fuente: Autores, 2017.

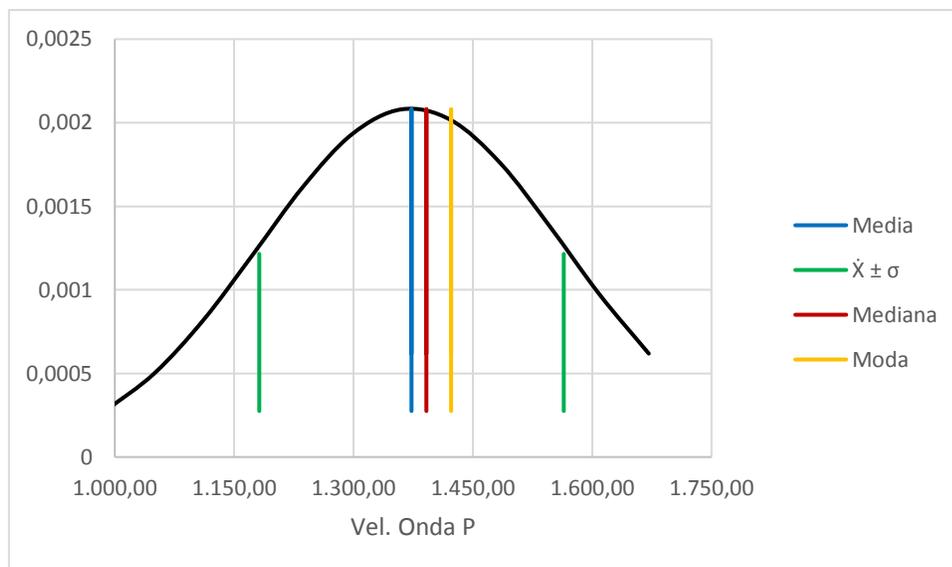


Figura 228. Distribución de los valores de velocidad de onda P.

Fuente: Autores, 2017.

Tabla 40. Medidas estadísticas de los valores de velocidad de onda P.

<i>Resumen Vp</i>	
Media	1372,937
Error típico	22,875
Mediana	1391,617
Moda	1422,676
Desviación estándar	191,388
Varianza de la muestra	36629,544
Curtosis	-0,300
Coefficiente de asimetría	-0,458
Rango	745,578
Mínimo	956,689
Máximo	1702,267
Suma	96105,562
Cuenta	70,000
Nivel de confianza (95,0%)	45,635

Fuente: Autores, 2017.

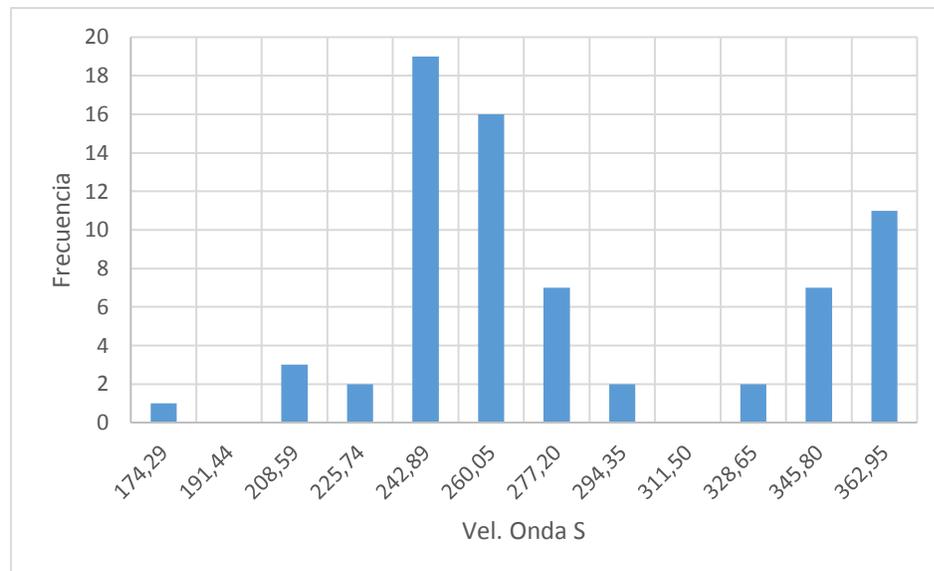


Figura 229. Histograma de los valores de velocidad de Onda S.

Fuente: Autores, 2017.

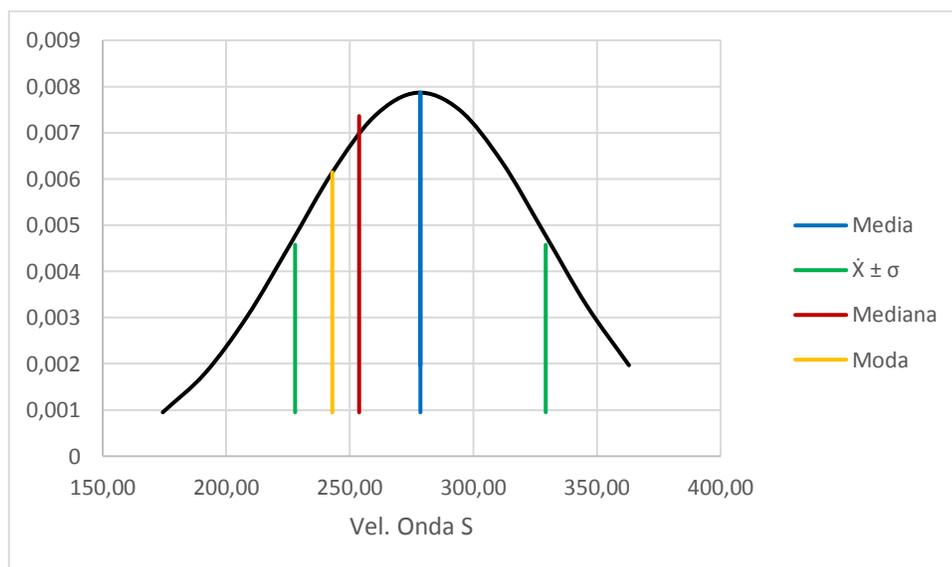


Figura 230. Distribución de los valores de velocidad de onda S.

Fuente: Autores, 2017.

Tabla 41. Medidas estadísticas de los valores de velocidad de onda S.

<i>Resumen Vs</i>	
Media	278,557
Error típico	6,060
Mediana	253,755
Moda	242,895
Desviación estándar	50,698
Varianza de la muestra	2570,299
Curtosis	-0,803
Coefficiente de asimetría	0,510
Rango	205,811
Mínimo	165,715
Máximo	371,526
Suma	19499,002
Cuenta	70,000
Nivel de confianza (95,0%)	12,089

Fuente: Autores, 2017.

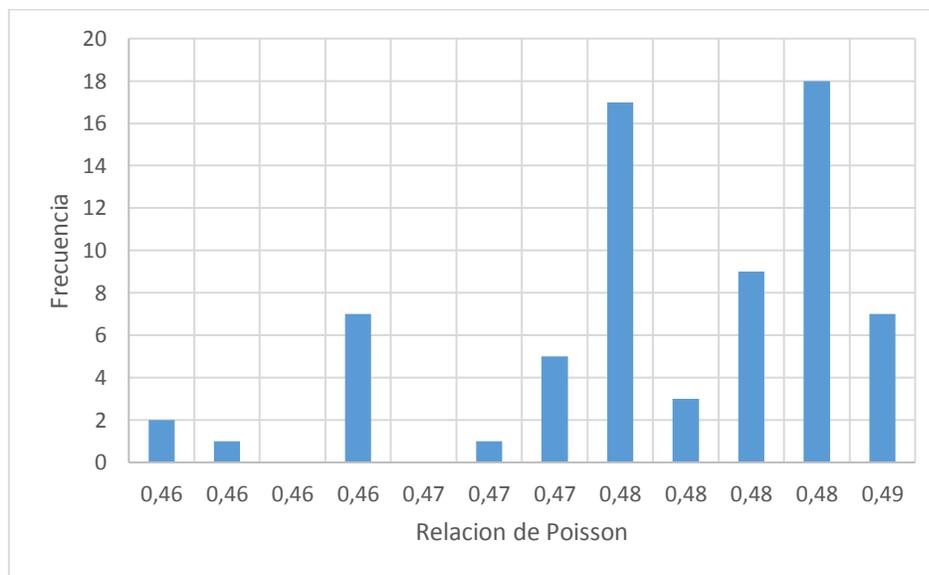


Figura 231. Histograma de los valores de coeficiente de Poisson.

Fuente: Autores, 2017.

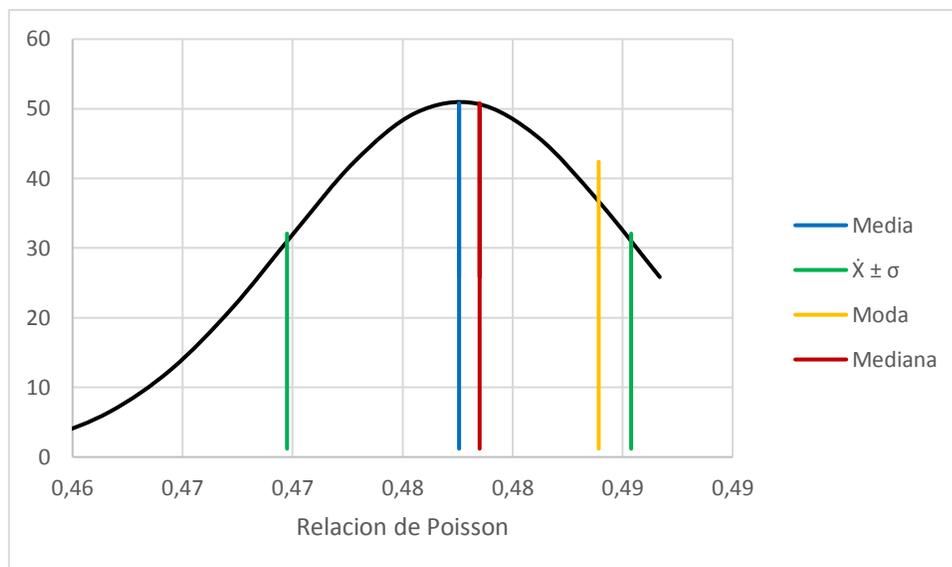


Figura 232. Distribución de los valores de coeficiente de Poisson.

Fuente: Autores, 2017.

Tabla 42. Medidas estadísticas de los valores de coeficiente de Poisson.

<i>Resumen σ</i>	
Media	0,478
Error típico	0,001
Mediana	0,478
Moda	0,484
Desviación estándar	0,008
Varianza de la muestra	0,000
Curtosis	0,767
Coficiente de asimetría	-1,101
Rango	0,032
Mínimo	0,455
Máximo	0,487
Suma	33,430
Cuenta	70,000
Nivel de confianza (95,0%)	0,002

Fuente: Autores, 2017.

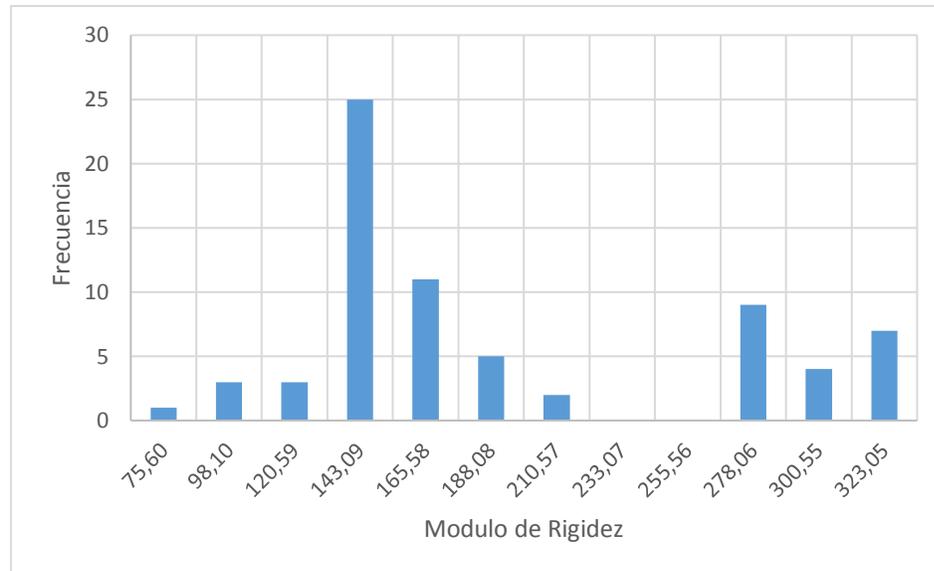


Figura 233. Histograma de los valores de módulo de rigidez.

Fuente: Autores, 2017.

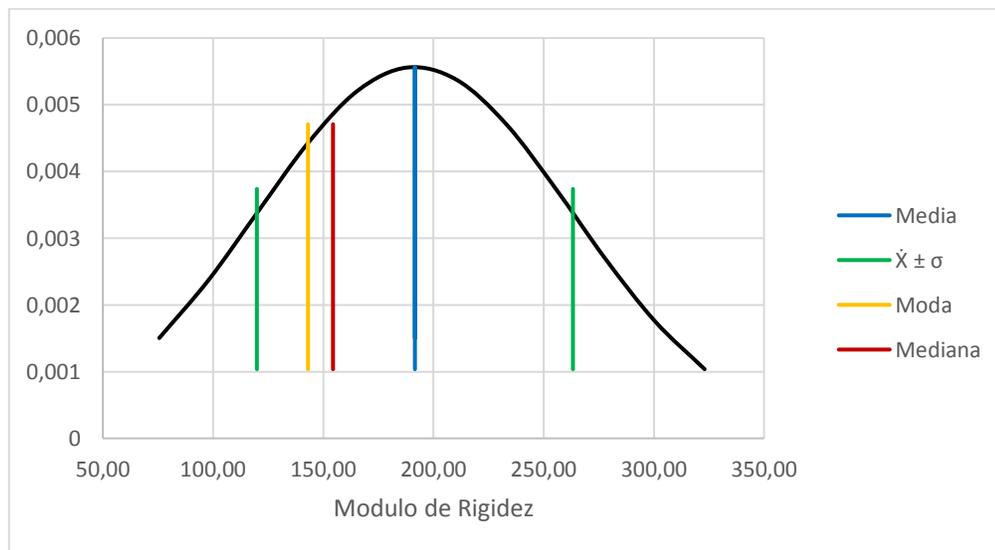


Figura 234. Distribución de los valores de módulo de rigidez.

Fuente: Autores, 2017.

Tabla 43. Medidas estadísticas de los valores de módulo de rigidez.

<i>Resumen G</i>	
Media	191,599
Error típico	8,570
Mediana	154,430
Moda	143,087
Desviación estándar	71,701
Varianza de la muestra	5141,087
Curtosis	-0,857
Coefficiente de asimetría	0,729
Rango	269,941
Mínimo	64,355
Máximo	334,295
Suma	13411,902
Cuenta	70,000
Nivel de confianza (95,0%)	17,097

Fuente: Autores, 2017.

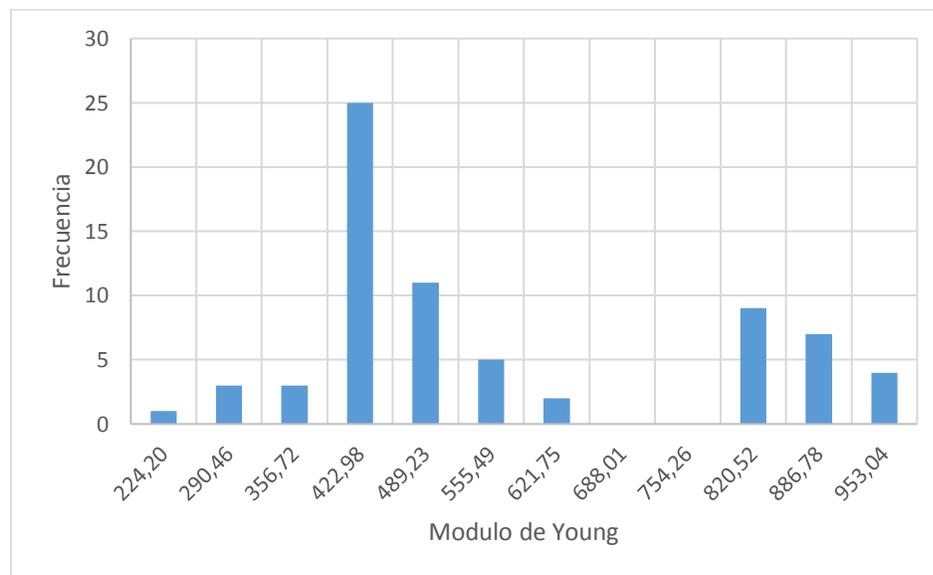


Figura 235. Histograma de los valores de módulo de Young.

Fuente: Autores, 2017.

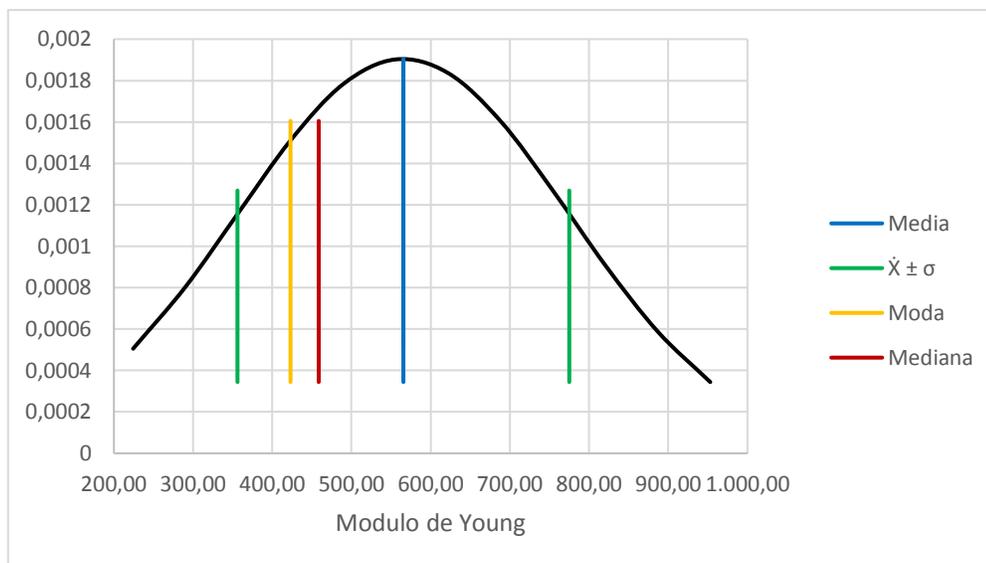


Figura 236. Distribución de los valores de módulo de Young.

Fuente: Autores, 2017.

Tabla 44. Medidas estadísticas de los valores de módulo de Young.

<i>Resumen E</i>	
Media	565,517
Error típico	25,040
Mediana	458,599
Moda	422,975
Desviación estándar	209,498
Varianza de la muestra	43889,547
Curtosis	-0,850
Coefficiente de asimetría	0,722
Rango	795,093
Mínimo	191,073
Máximo	986,166
Suma	39586,168
Cuenta	70,000
Nivel de confianza (95,0%)	49,953

Fuente: Autores, 2017.

Zona Centro-occidente

MATERIAL CONGLOMERATICO

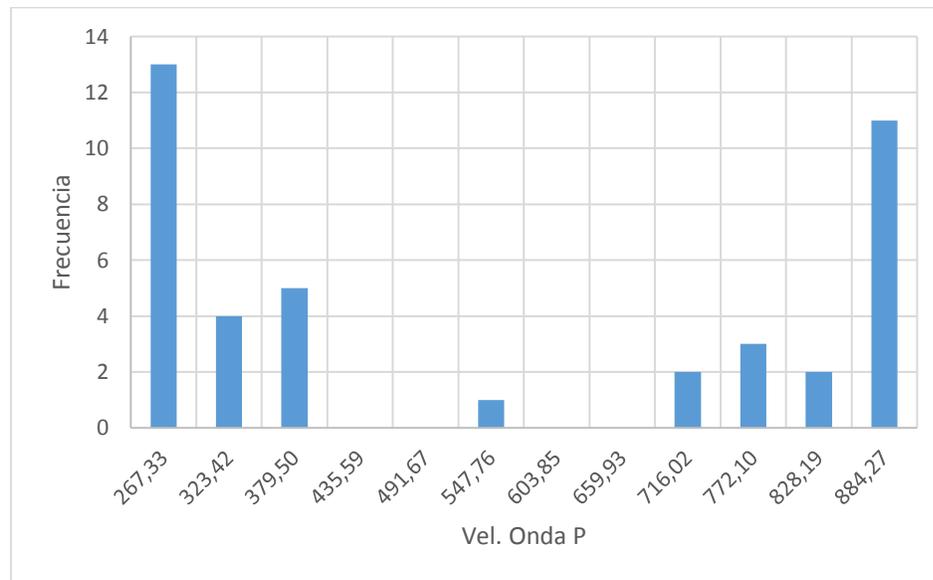


Figura 237. Histograma de los valores de velocidad de onda P.

Fuente: Autores, 2017.

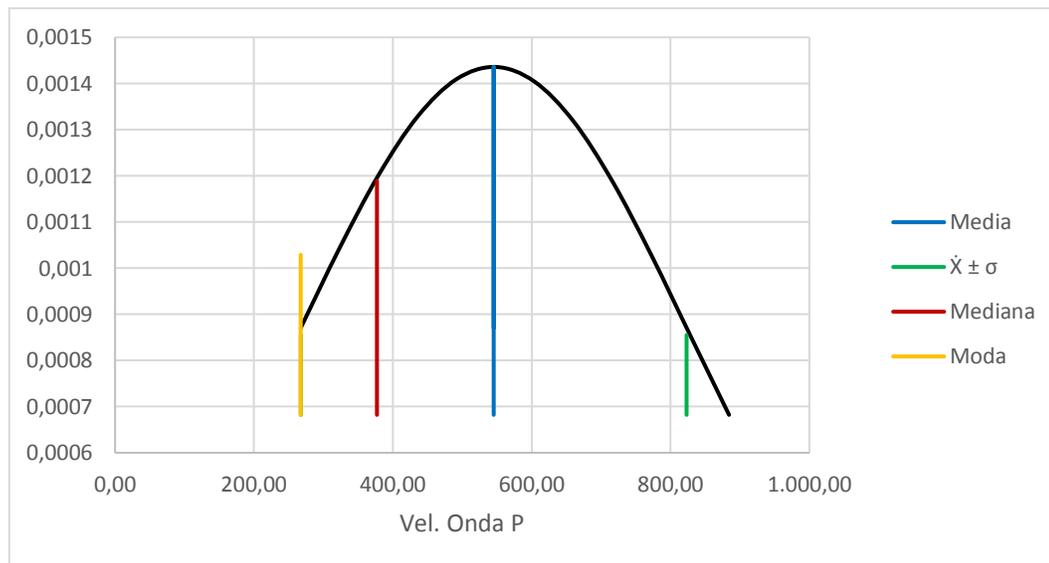


Figura 238. Distribución de los valores de velocidad de onda P.

Fuente: Autores, 2017.

Tabla 45. Medidas estadísticas de los valores de velocidad de onda P.

<i>Resumen Vp</i>	
Media	545,306
Error típico	43,391
Mediana	377,194
Moda	267,334
Desviación estándar	277,840
Varianza de la muestra	77195,014
Curtosis	-1,872
Coefficiente de asimetría	0,222
Rango	673,020
Mínimo	239,292
Máximo	912,312
Suma	22357,551
Cuenta	41,000
Nivel de confianza (95,0%)	87,697

Fuente: Autores, 2017.

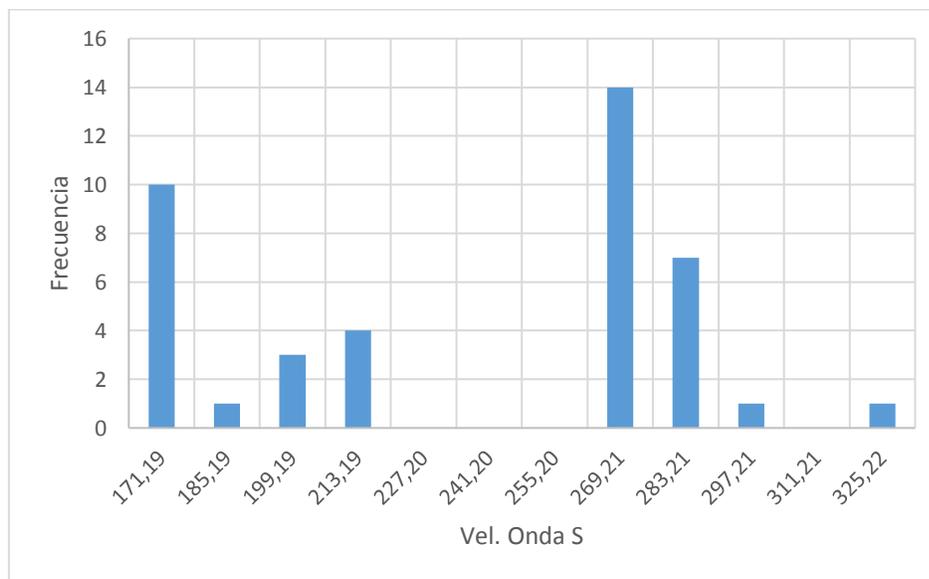


Figura 239. Histograma de los valores de velocidad de onda S.

Fuente: Autores, 2017.

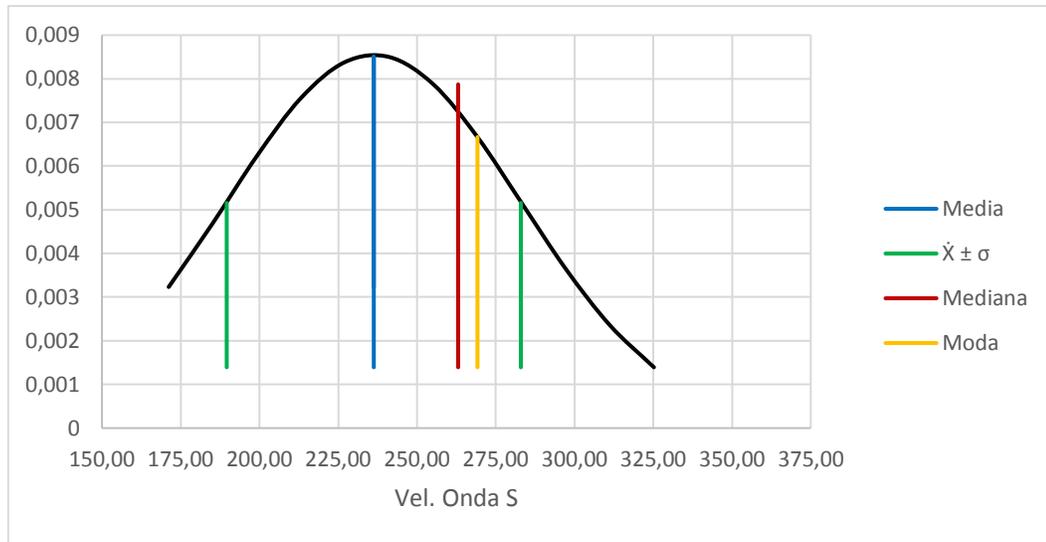


Figura 240. Distribución de los valores de velocidad de onda S.

Fuente: Autores, 2017.

Tabla 46. Medidas estadísticas de los valores de velocidad de onda S.

<i>Resumen Vs</i>	
Media	236,288
Error típico	7,290
Mediana	263,069
Moda	269,206
Desviación estándar	46,681
Varianza de la muestra	2179,110
Curtosis	-1,363
Coefficiente de asimetría	-0,185
Rango	168,033
Mínimo	164,185
Máximo	332,218
Suma	9687,820
Cuenta	41,000
Nivel de confianza (95,0%)	14,734

Fuente: Autores, 2017.

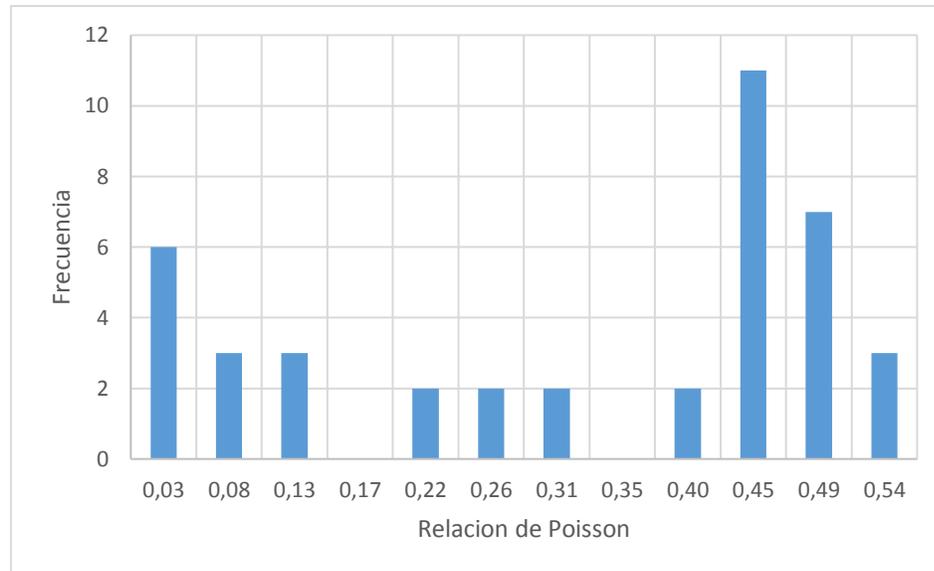


Figura 241. Histograma de los valores de coeficiente de Poisson.

Fuente: Autores, 2017.

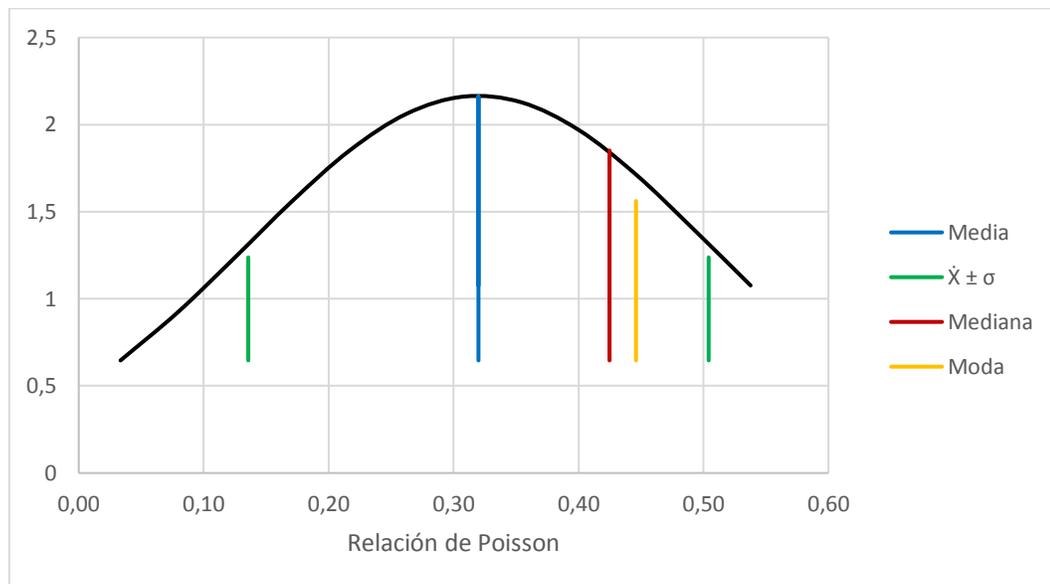


Figura 242. Distribución de los valores de coeficiente de Poisson.

Fuente: Autores, 2017.

Tabla 47. Medidas estadísticas de los valores de coeficiente de Poisson.

<i>Resumen σ</i>	
Media	0,320
Error típico	0,029
Mediana	0,425
Moda	0,446
Desviación estándar	0,184
Varianza de la muestra	0,034
Curtosis	-1,346
Coefficiente de asimetría	-0,524
Rango	0,549
Mínimo	0,011
Máximo	0,559
Suma	13,117
Cuenta	41,000
Nivel de confianza (95,0%)	0,058

Fuente: Autores, 2017.

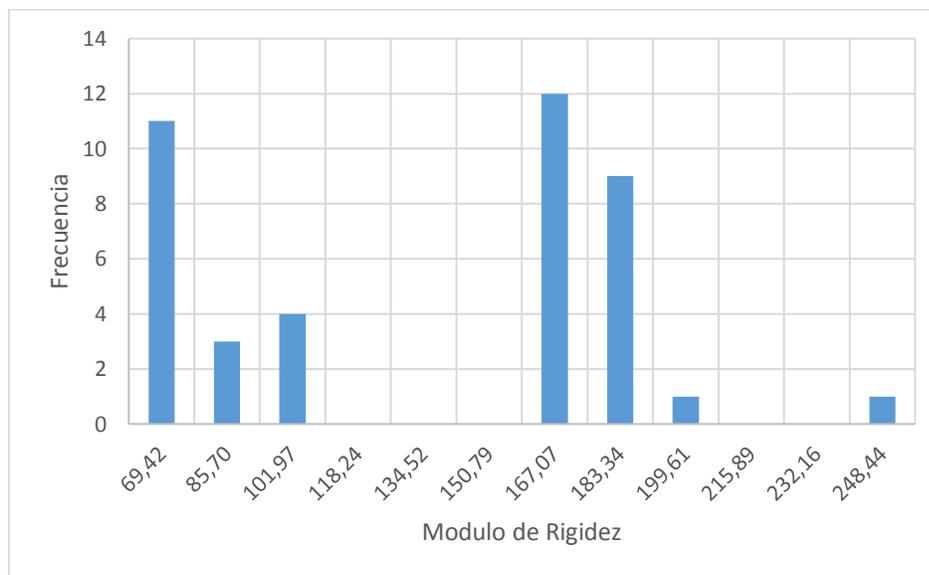


Figura 243. Histograma de los valores de módulo de rigidez.

Fuente: Autores, 2017.

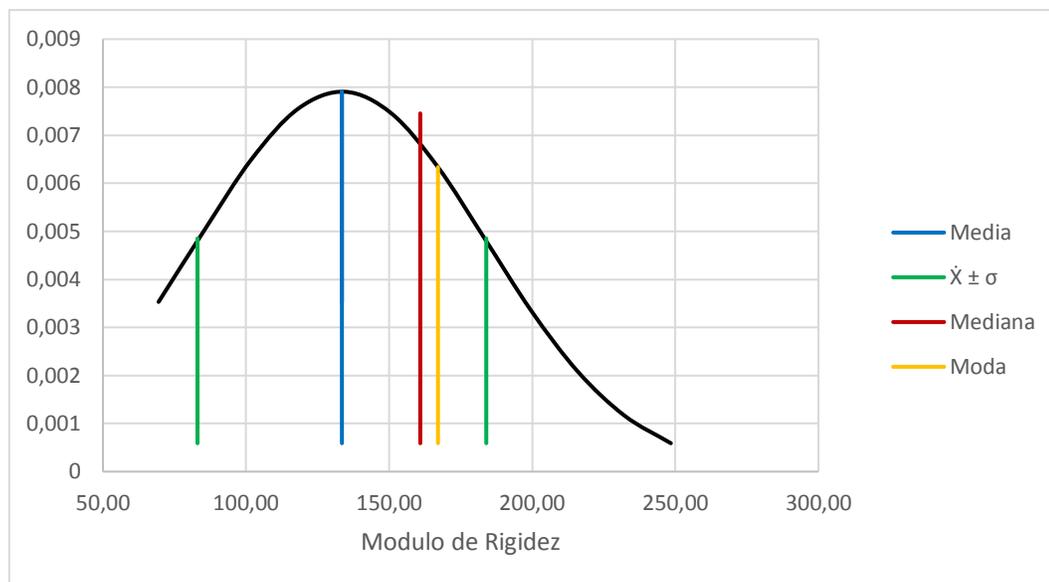


Figura 244. Distribución de los valores de módulo de rigidez.

Fuente: Autores, 2017.

Tabla 48. Medidas estadísticas de los valores de módulo de rigidez.

<i>Resumen G</i>	
Media	133,484
Error típico	7,880
Mediana	160,865
Moda	167,067
Desviación estándar	50,457
Varianza de la muestra	2545,859
Curtosis	-1,033
Coefficiente de asimetría	0,027
Rango	195,288
Mínimo	61,286
Máximo	256,573
Suma	5472,859
Cuenta	41,000
Nivel de confianza (95,0%)	15,926

Fuente: Autores, 2017.

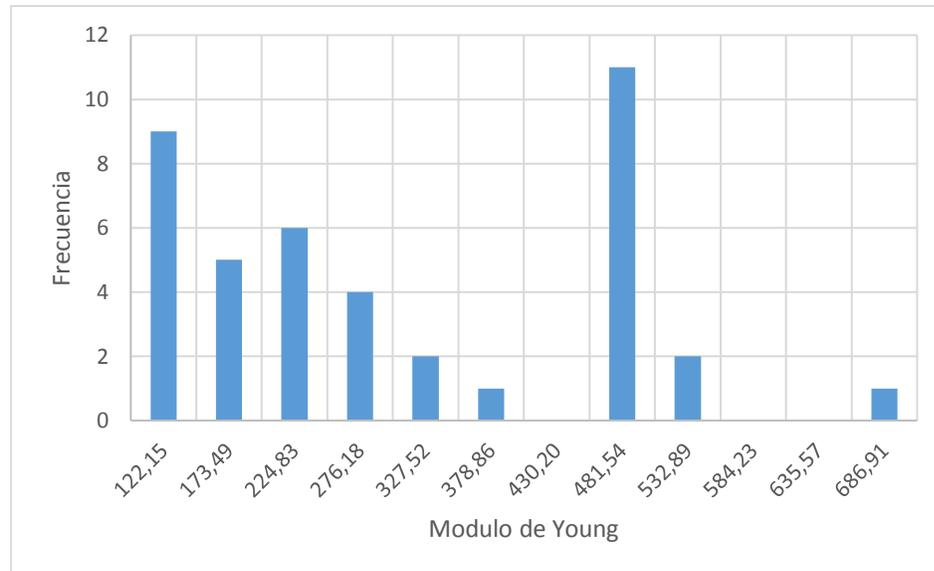


Figura 245. Histograma de los valores de módulo de Young.

Fuente: Autores, 2017.

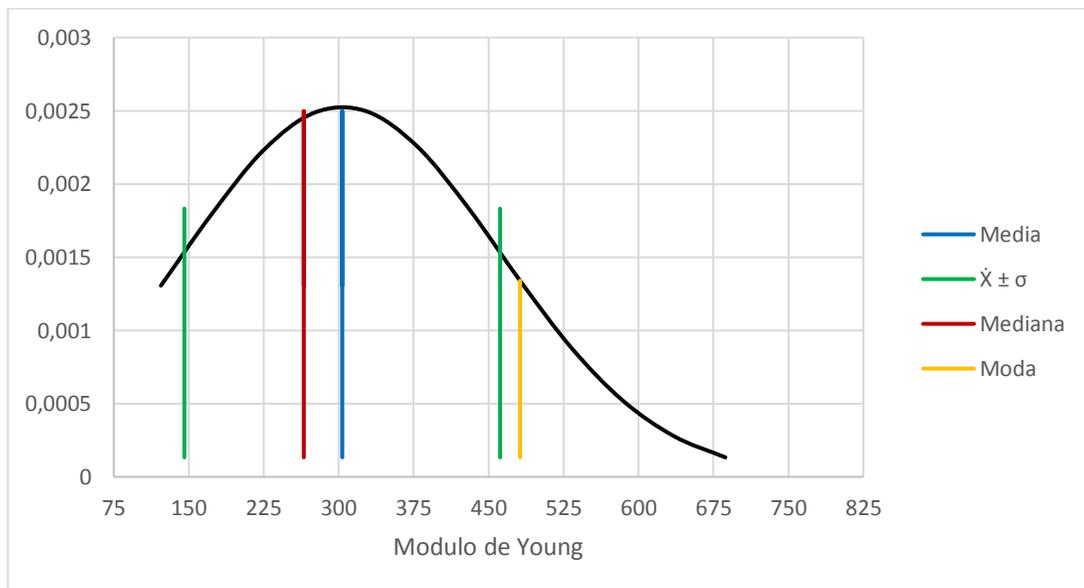


Figura 246. Distribución de los valores de módulo de Young.

Fuente: Autores, 2017.

Tabla 49. Medidas estadísticas de los valores de módulo de Young.

<i>Resumen E</i>	
Media	303,599
Error típico	24,668
Mediana	265,141
Moda	481,544
Desviación estándar	157,952
Varianza de la muestra	24948,908
Curtosis	-0,775
Coefficiente de asimetría	0,531
Rango	616,101
Mínimo	96,480
Máximo	712,581
Suma	12447,556
Cuenta	41,000
Nivel de confianza (95,0%)	49,856

Fuente: Autores, 2017.

ARCILLOLITAS

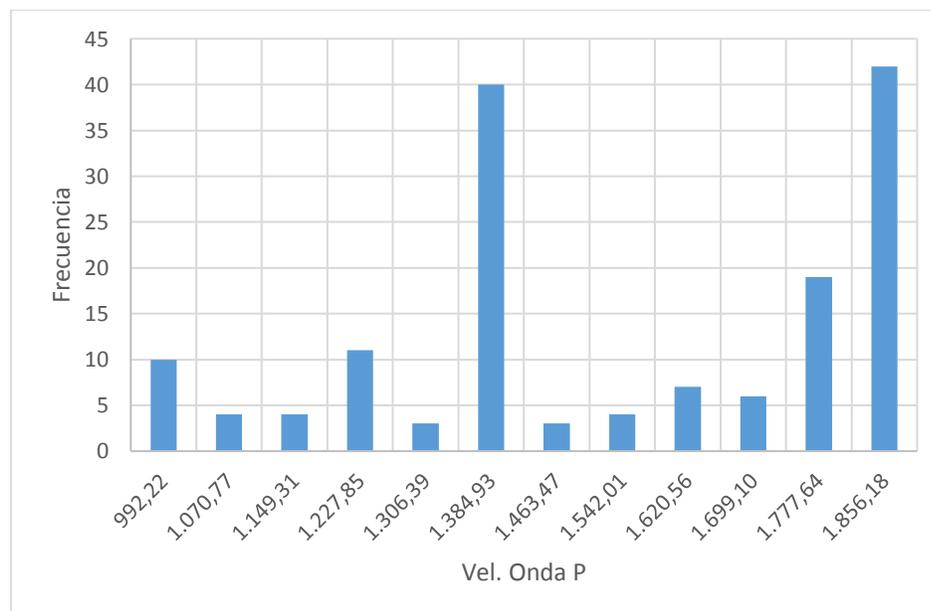


Figura 247. Histograma de los valores de velocidad de onda P.

Fuente: Autores, 2017.

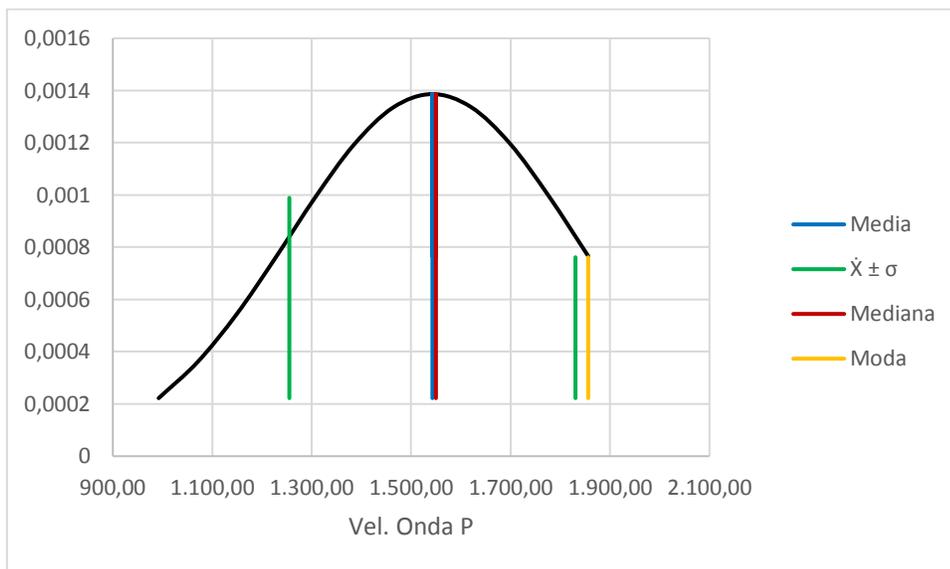


Figura 248. Distribución de los valores de velocidad de onda P.

Fuente: Autores, 2017.

Tabla 50. Medidas estadísticas de los valores de velocidad de onda P.

<i>Resumen Vp</i>	
Media	1542,759
Error típico	23,262
Mediana	1549,825
Moda	1856,18
Desviación estándar	287,732
Varianza de la muestra	82789,881
Curtosis	-1,036
Coefficiente de asimetría	-0,362
Rango	942,496
Mínimo	952,954
Máximo	1895,450
Suma	236042,176
Cuenta	153,000
Nivel de confianza (95,0%)	45,958

Fuente: Autores, 2017.

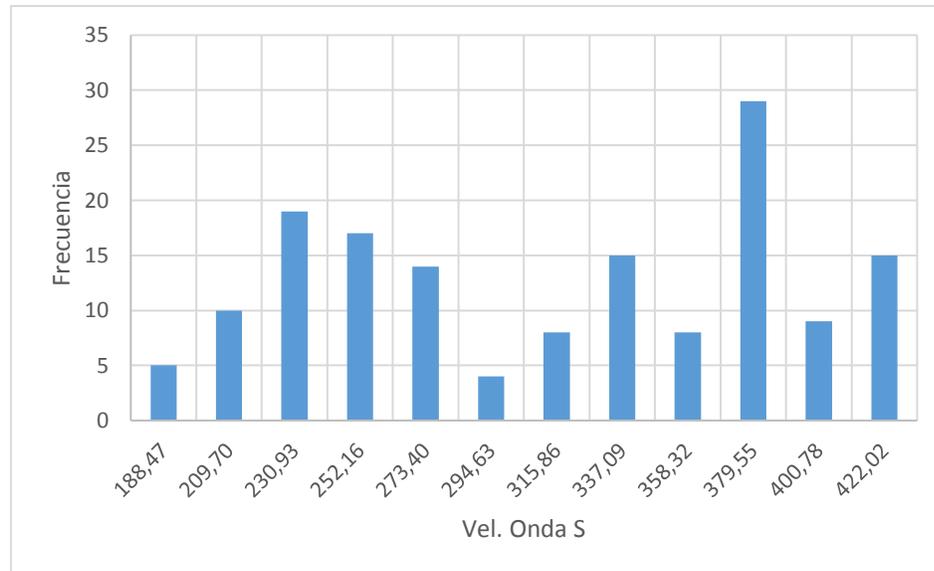


Figura 249. Histograma de los valores de velocidad de onda S.

Fuente: Autores, 2017.

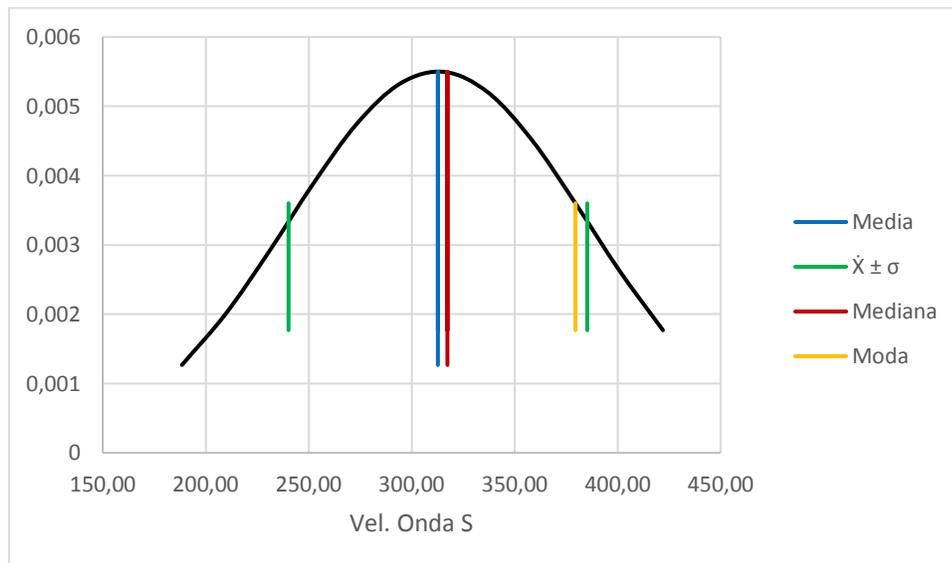


Figura 250. Distribución de los valores de velocidad de onda S.

Fuente: Autores, 2017.

Tabla 51. Medidas estadísticas de los valores de velocidad de onda S.

<i>Resumen Vs</i>	
Media	312,760
Error típico	5,864
Mediana	317,376
Moda	379,553
Desviación estándar	72,532
Varianza de la muestra	5260,910
Curtosis	-1,325
Coefficiente de asimetría	-0,073
Rango	254,775
Mínimo	177,855
Máximo	432,630
Suma	47852,217
Cuenta	153,000
Nivel de confianza (95,0%)	11,585

Fuente: Autores, 2017.

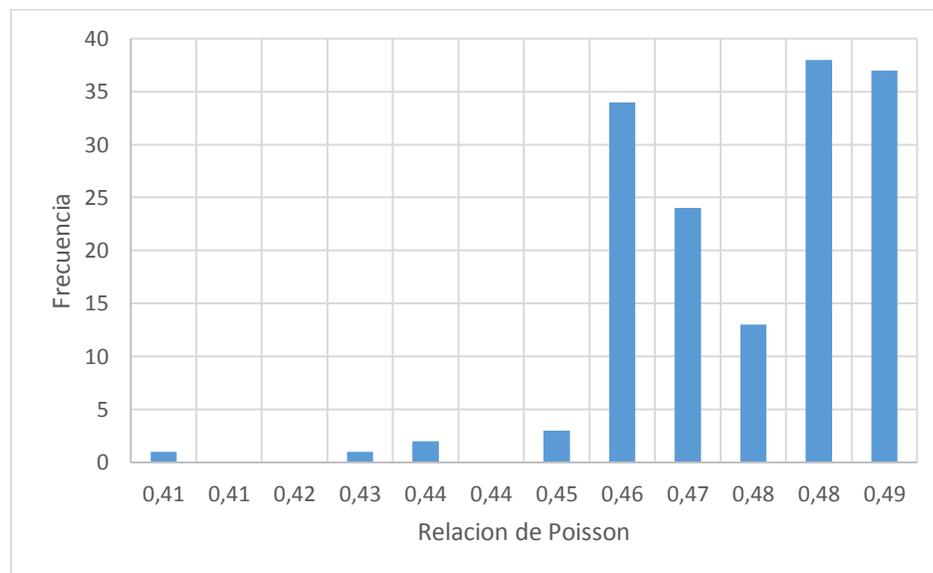


Figura 251. Histograma de los valores de coeficiente de Poisson.

Fuente: Autores, 2017.

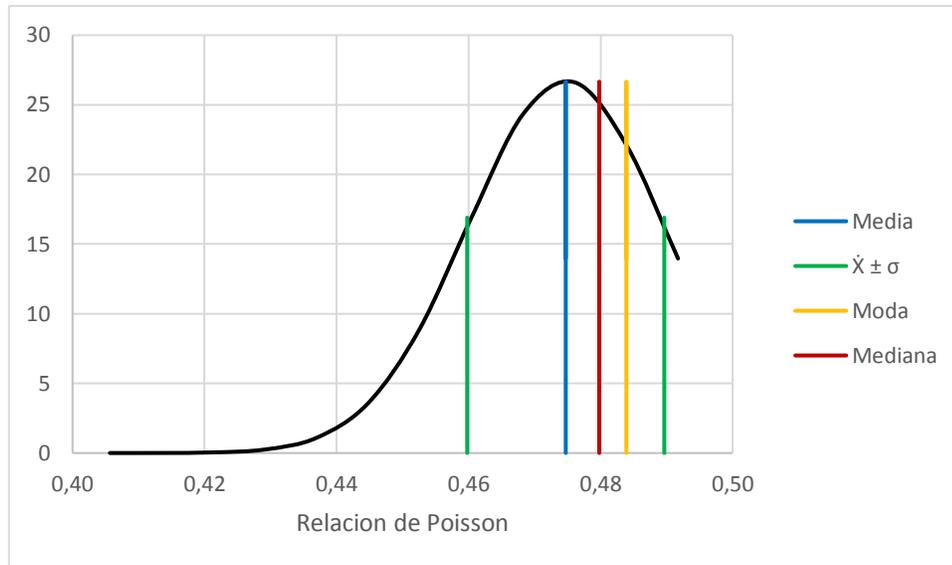


Figura 252. Distribución de los valores de coeficiente de Poisson.

Fuente: Autores, 2017.

Tabla 52. Medidas estadísticas de los valores de coeficiente de Poisson.

<i>Resumen σ</i>	
Media	0,475
Error típico	0,001
Mediana	0,480
Moda	0,484
Desviación estándar	0,015
Varianza de la muestra	0,000
Curtosis	2,832
Coficiente de asimetría	-1,169
Rango	0,093
Mínimo	0,402
Máximo	0,494
Suma	72,632
Cuenta	153,000
Nivel de confianza (95,0%)	0,002

Fuente: Autores, 2017.

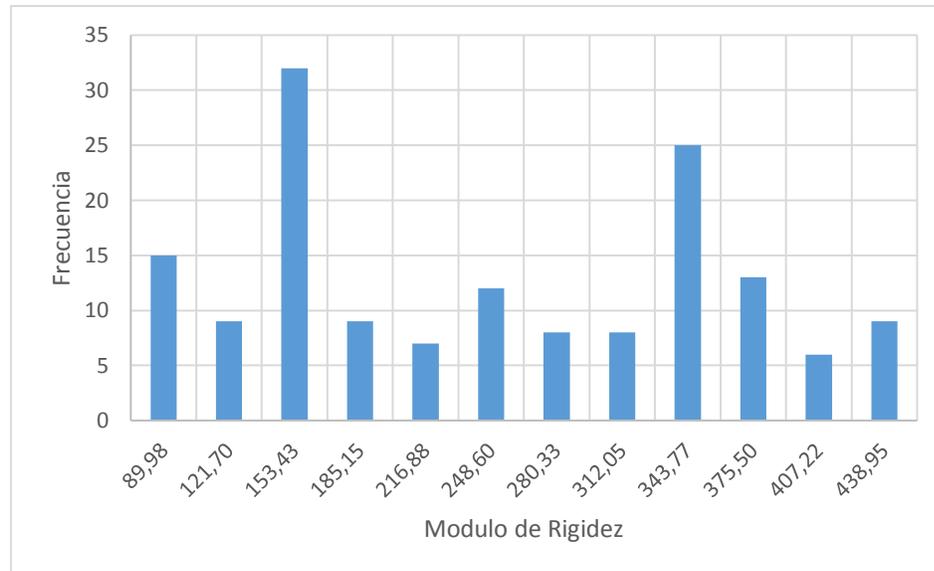


Figura 253. Histograma de los valores de módulo de rigidez.

Fuente: Autores, 2017.

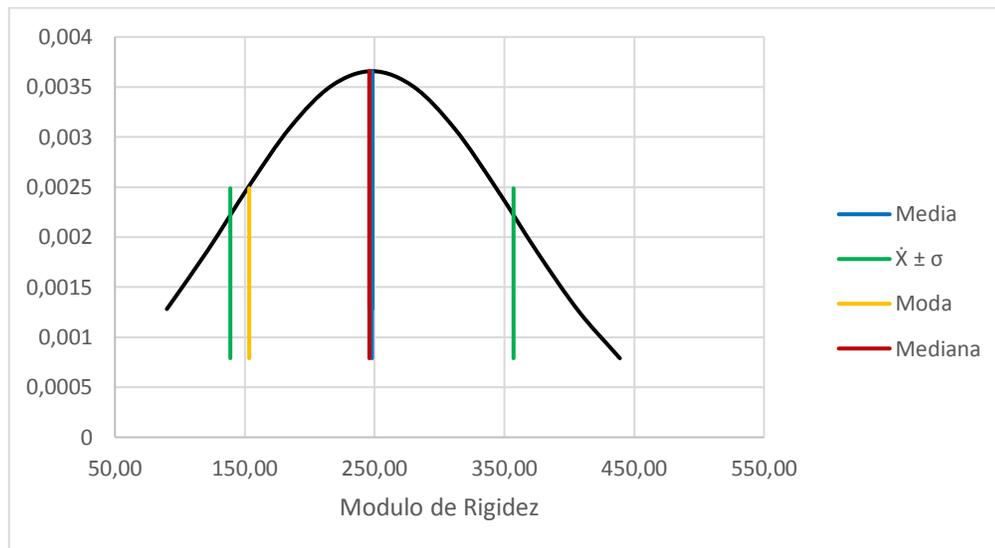


Figura 254. Distribución de los valores de módulo de rigidez.

Fuente: Autores, 2017.

Tabla 53. Medidas estadísticas de los valores de módulo de rigidez.

<i>Resumen G</i>	
Media	247,969
Error típico	8,818
Mediana	245,998
Moda	153,428
Desviación estándar	109,067
Varianza de la muestra	11895,598
Curtosis	-1,301
Coefficiente de asimetría	0,166
Rango	380,693
Mínimo	74,116
Máximo	454,809
Suma	37939,271
Cuenta	153,000
Nivel de confianza (95,0%)	17,421

Fuente: Autores, 2017.

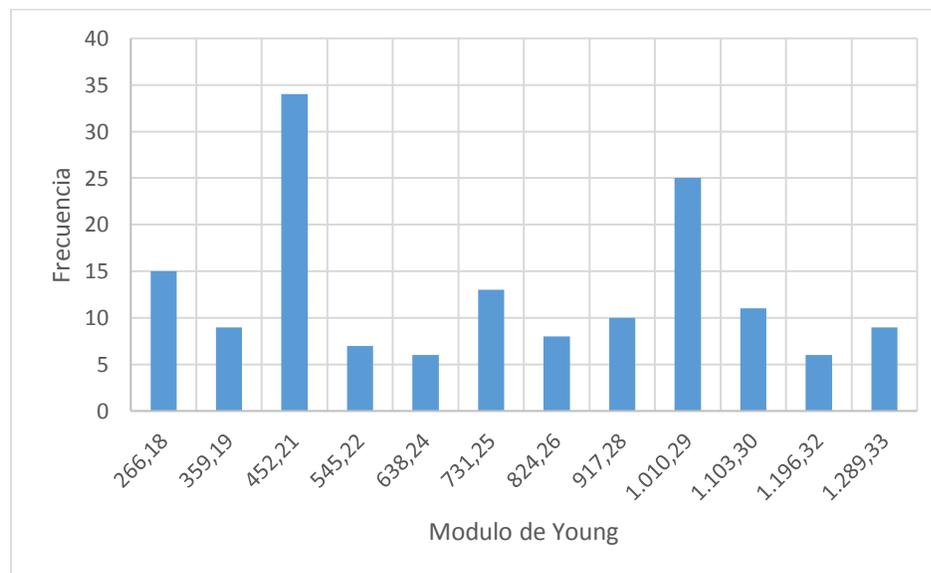


Figura 255. Histograma de los valores de módulo de Young.

Fuente: Autores, 2017.

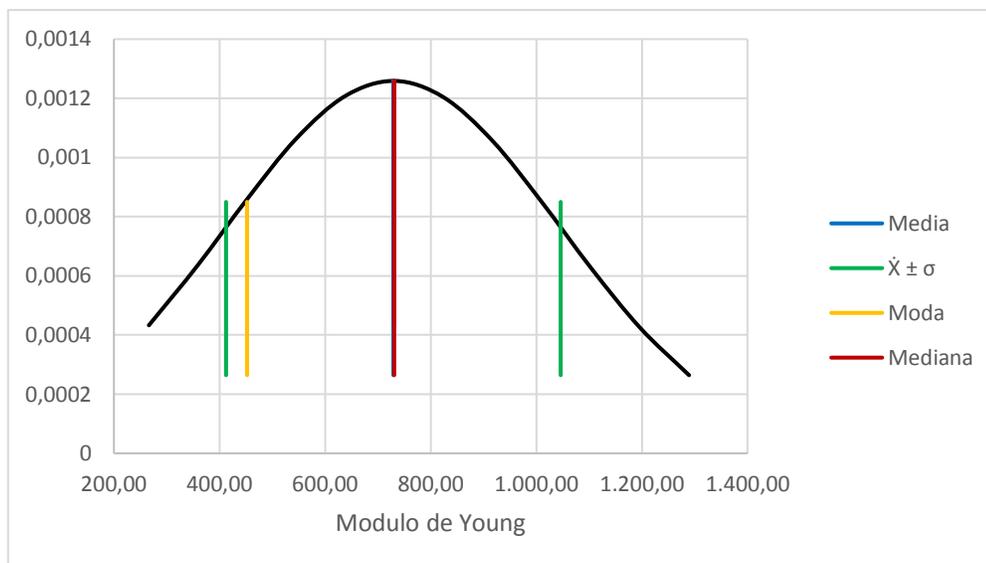


Figura 256. Distribución de los valores de módulo de Young.

Fuente: Autores, 2017.

Tabla 54. Medidas estadísticas de los valores de módulo de elasticidad.

<i>Resumen E</i>	
Media	729,305
Error típico	25,620
Mediana	730,897
Moda	452,208
Desviación estándar	316,904
Varianza de la muestra	100428,321
Curtosis	-1,294
Coefficiente de asimetría	0,160
Rango	1116,161
Mínimo	219,674
Máximo	1335,835
Suma	111583,623
Cuenta	153,000
Nivel de confianza (95,0%)	50,618

Fuente: Autores, 2017.

Apéndice G. Aplicativo para el cálculo de los parámetros dinámicos de la formación algodonala con base a las correlaciones desarrolladas.

Apéndice H. Mapas de la geología de la ciudad, con la división en zonas y representación de resultados de los parámetros dinámicos.