ESTIMACIÓN DE VELOCIDADES DE ONDA DE CORTE Y RELACIONES H/V, PARA CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA, UTILIZANDO MEDICIONES DE RUIDO AMBIENTAL. CASO DE ESTUDIO EN EL VALLE DE ABURRÁ Y ZONAS ALEDAÑAS.

Carolina Sampedro
Jorge A. Prieto
Juan D. Jaramillo

Universidad EAFIT
Escuela De Ingeniería
2019

ESTIMACIÓN DE VELOCIDADES DE ONDA DE CORTE Y RELACIONES H/V, PARA CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA, UTILIZANDO MEDICIONES DE RUIDO AMBIENTAL. CASO DE ESTUDIO EN EL VALLE DE ABURRÁ Y ZONAS ALEDAÑAS.

CAROLINA SAMPEDRO
JORGE A. PRIETO
JUAN D. JARAMILLO

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Magister en ingeniería

Asesor: JORGE ALONSO PRIETO

MEDELLÍN
UNIVERSIDAD EAFIT
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
2019

Nota de aceptación

Aprobado

Presidente del jurado

Doriam Restrepo

Medellín, 20 de octubre de 2019

Agradecimientos al *Departamento de Ingeniería Civil, University of British Columbia, Vancouver y al Sistema de Alerta Temprana de Medellín, SIATA por prestar los equipos e instalaciones necesarios para la realización de este trabajo, además agradezco especial menta a mi familia y amigos por el apoyo brindado durante todo este tiempo.*

CONTENIDO

1.1 INTRODUCCIÓN 12
1.2 OBJETIVOS 15
1.3 ESTADO DEL ARTE 16
1.3.1 Técnica de relación espectral (Spectral Ratio) H / V o método Nakamura 16
1.3.2 Metodología del SPAC 16
1.3.3 Continuous surface wave (CSW) 17
1.3.4 ReMi (Refraction Microtremors) 18
1.3.5 Multichannel analysis of surface wave (MASW) 19
1.3.6 Frequency wavenumber (f-k) 20
1.3.7 Seismic cone penetrometer (SCPT) 20
1.3.8 Standar Penetration Test (SPT) 21
1.3.9 Down Hole 21
1.3.10 Cross Hole 22
1.3.11 Resumen de métodos geofísicos 22
1.4 TRABAJO DE CAMPO 25
1.4.1 Arreglo de mediciones de microtremores o ruido ambiental 25
1.4.2 Ayurá 26
1.4.3 La Estrella 29
1.4.4 Universidad de Medellín 31
1.4.5 Obra en construcción (Ciudad del Bosque) 34
1.4.6 Seminario Mayor 35
1.4.7 Presa la Fe 37
1.5 PROCESAMIENTO 40
1.5.1 Procesamiento H/V 40
1.5.2 Procesamiento del SPAC 41
1.5.3 Comprobación del SPAC con el H/V 42
1.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS 44
1.6.1 Ayurá 44

1.6.2 La Estrella 48
1.6.3 Universidad de Medellín 51
1.6.4 Obra en construcción (Ciudad del Bosque) 55
1.6.5 Seminario Mayor 56
1.6.6 Presa la Fe 59
1.7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 61
1.8 BIBLIOGRAFÍA 62
1.9 ANEXO 1: RESULTADOS 67
1.9.1 Ayurá 67
1.9.2 La Estrella 79
1.9.3 Universidad de Medellín 98
1.9.4 Obra en construcción (Ciudad del Bosque) 110
1.9.5 Seminario Mayor 115
1.9.6 Presa la Fe 127

CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 1. Localización de los sitios de estudio 14
Figura 2. Planta Ayurá 26
Figura 3. Curvas de nivel del levantamiento Ayurá 27
Figura 4. Perfil levantamiento Ayurá 27
Figura 5. Fotografía Ayurá 1 28
Figura 6. Fotografía Ayurá 2 28
Figura 7. Fotografía Ayurá 3 28
Figura 8. Planta La Estrella 29
Figura 9. Curvas de nivel levantamiento La Estrella 30
Figura 10. Perfil levantamiento La Estrella 30
Figura 11. Fotografía La Estrella 1 31
Figura 12. Fotografía La Estrella 2 31
Figura 13. Planta Universidad de Medellín 32
Figura 14. Cuervas de nivel levantamiento Universidad de Medellín 32
Figura 15. Perfil levantamiento Universidad de Medellín 33
Figura 16. Fotografía Universidad de Medellín 33
Figura 17. Planta obra en construcción (Ciudad del bosque) 34

Figura 18. Fotografía 1 obra en construcción (Ciudad del bosque) 35
Figura 19. Planta Seminario Mayor 36
Figura 20. Fotografía Seminario Mayor 1 36
Figura 21. Fotografía Seminario Mayor 37
Figura 22. Planta Presa la Fe 38
Figura 23. Cuervas de nivel levantamiento Presa la Fe 38
Figura 24. Planta y curvas de nivel Presa la Fe 39
Figura 25. Perfil de Presa la Fe 39
Figura 26. Frecuencia Vs H/V – Ayurá 44
Figura 27. SPAC Perfil de onda Vs Ayurá 46
Figura 28. Down hole Perfil de onda Vs Ayurá. (Microzonificación,2006) 46
Figura 29. Down hole y SPAC. Perfil de velocidad de onda Vs en Ayurá. 47
Figura 30. Frecuencia Vs H/V – Ayurá 48
Figura 31. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 2.4 filtro de 0.05 Hz -25.00 Hz 49
Figura 32. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 2.4 filtro de 1.00 Hz – 25.00 Hz 49
Figura 33. SPAC Perfil de onda Vs La Estrella 50
Figura 34. Frecuencia Vs H/V – La Estrella 51
Figura 35. Frecuencia Vs H/V – Universidad de Medellín 51
Figura 36. SPAC Perfil de onda Vs UdeM 53
Figura 37. Dawn hole Perfil de onda Vs UdeM (Microzonificación,2006) 53
Figura 38. Down hole y SPAC Perfil de onda Vs UdeM 54
Figura 39. Frecuencia Vs H/V – Universidad de Medellín 54
Figura 40. Frecuencia Vs H/V – Obra en Construcción 55
Figura 41. Frecuencia Vs H/V – Seminario Mayor sensor 56
Figura 42. SPAC Perfil de onda Vs Seminario mayor 58
Figura 43. Frecuencia Vs H/V – Seminario Mayor 59
Figura 44. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 59
Figura 45. Frecuencia Vs H/V – Ayurá sensor 1.1 67
Figura 46. Frecuencia Vs H/V – Ayurá sensor 2.2 67
Figura 47. Frecuencia Vs H/V – Ayurá sensor 2.3 68
Figura 48. Frecuencia Vs H/V – Ayurá sensor 2.4 68
Figura 49. Frecuencia Vs H/V – Ayurá sensor 2.5 68
Figura 50. Frecuencia Vs H/V – Ayurá sensor 2.6 68
Figura 51. Histogramas de fase y curvas de auto correlación - Ayurá – 2.50 m 69
Figura 52. Perfil de velocidad de onda Vs – Ayurá – 2.50 m 69
Figura 53. Frecuencia Vs H/V – Ayurá sensor 1.1 70
Figura 54. Frecuencia Vs H/V – Ayurá sensor 3.2 70
Figura 55. Frecuencia Vs H/V – Ayurá sensor 3.3 71
Figura 56. Frecuencia Vs H/V – Ayurá sensor 3.4 71
Figura 57. Frecuencia Vs H/V – Ayurá sensor 3.5 71
Figura 58. Frecuencia Vs H/V – Ayurá sensor 3.6 71

Figura 59. Histogramas de fase y curvas de auto correlación - Ayurá – 5.00 m..... 72
Figura 60. Perfil de velocidad de onda Vs – Ayurá – 5.00 m 72
Figura 61. Frecuencia Vs H/V – Ayurá sensor 1.1 73
Figura 62. Frecuencia Vs H/V – Ayurá sensor 4.2 73
Figura 63. Frecuencia Vs H/V – Ayurá sensor 4.3 74
Figura 64. Frecuencia Vs H/V – Ayurá sensor 4.4 74
Figura 65. Frecuencia Vs H/V – Ayurá sensor 4.5 74
Figura 66. Frecuencia Vs H/V – Ayurá sensor 4.6 74
Figura 67. Histogramas de fase y curvas de auto correlación - Ayurá – 10.00 m .. 75
Figura 68. Perfil de velocidad de onda Vs – Ayurá – 10.00 m 75
Figura 69. Frecuencia Vs H/V – Ayurá sensor 1.1 76
Figura 70. Frecuencia Vs H/V – Ayurá sensor 5.2 76
Figura 71. Frecuencia Vs H/V – Ayurá sensor 5.3 77
Figura 72. Frecuencia Vs H/V – Ayurá sensor 5.4 77
Figura 73. Frecuencia Vs H/V – Ayurá sensor 5.5 77
Figura 74. Frecuencia Vs H/V – Ayurá sensor 5.6 77
Figura 75. Histogramas de fase y curvas de auto correlación - Ayurá – 15.00 m .. 78
Figura 76. Perfil de velocidad de onda Vs – Ayurá – 15.00 m 78
Figura 77. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 1.1 79
Figura 78. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 2.2 79
Figura 79. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 2.3 80
Figura 80. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 2.4 80
Figura 81. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 2.5 81
Figura 82. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 2.6 81
Figura 83. Histogramas de fase y curvas de auto correlación – La Estrella – 2.50 m 81
Figura 84. Perfil de velocidad de onda Vs – La Estrella – 2.50 m 81
Figura 85. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 1.1 82
Figura 86. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 3.2 82
Figura 87. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 3.3 83
Figura 88. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 3.4 83
Figura 89. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 3.5 84
Figura 90. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 3.6 84
Figura 91. Histogramas de fase y curvas de auto correlación – La Estrella – 5.00 m 84
Figura 92. Perfil de velocidad de onda Vs – La Estrella – 5.00 m 85
Figura 93. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 1.1 86
Figura 94. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 4.2 86
Figura 95. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 4.3 86
Figura 96. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 4.4 86
Figura 97. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 4.5 87
Figura 98. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 4.6 87

Figura 99. Histogramas de fase y curvas de auto correlación – La Estrella – 10.00 m 88
Figura 100. Perfil de velocidad de onda Vs – La Estrella – 10.00 m 88
Figura 101. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 1.1 89
Figura 102. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 5.2 89
Figura 103. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 5.3 89
Figura 104. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 5.3 89
Figura 105. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 5.5 90
Figura 106. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 5.6 90
Figura 107. Histogramas de fase y curvas de auto correlación – La Estrella – 15.00 m 91
Figura 108. Perfil de velocidad de onda Vs – La Estrella – 15.00 m 91
Figura 109. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 1.1 92
Figura 110. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 6.2 92
Figura 111. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 6.3 93
Figura 112. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 6.4 93
Figura 113. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 6.5 93
Figura 114. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 6.6 93
Figura 115. Histogramas de fase y curvas de auto correlación – La Estrella – 20.00 m 94
Figura 116. Perfil de velocidad de onda Vs – La Estrella – 20.00 m 94
Figura 117. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 1.1 95
Figura 118. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 7.2 95
Figura 119. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 7.3 96
Figura 120. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 7.4 96
Figura 121. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 7.5 96
Figura 122. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 7.6 96
Figura 123. Histogramas de fase y curvas de auto correlación – La Estrella – 25.00 m 97
Figura 124. Perfil de velocidad de onda Vs – La Estrella – 25.00 m 98
Figura 125. Frecuencia Vs H/V – Universidad de Medellín sensor 1.1 99
Figura 126. Frecuencia Vs H/V – Universidad de Medellín sensor 2.2 99
Figura 127. Frecuencia Vs H/V – Universidad de Medellín sensor 2.3 99
Figura 128. Frecuencia Vs H/V – Universidad de Medellín sensor 2.4 99
Figura 129. Frecuencia Vs H/V – Universidad de Medellín sensor 2.5 100
Figura 130. Frecuencia Vs H/V – Universidad de Medellín sensor 2.6 100
Figura 131. Histogramas de fase y curvas de auto correlación – Universidad de Medellín – 2.50 m 100
Figura 132. Frecuencia Vs H/V – Universidad de Medellín sensor 1.1 101
Figura 133. Frecuencia Vs H/V – Universidad de Medellín sensor 3.2 101
Figura 134. Frecuencia Vs H/V – Universidad de Medellín sensor 3.3 102
Figura 135. Frecuencia Vs H/V – Universidad de Medellín sensor 3.4 102

Figura 136. Frecuencia Vs H/V – Universidad de Medellín sensor 3.5 102
Figura 137. Frecuencia Vs H/V – Universidad de Medellín sensor 3.6 102
Figura 138. Histogramas de fase y curvas de auto correlación – Universidad de Medellín – 5.00 m 103
Figura 139. Perfil de velocidad de onda Vs – Universidad de Medellín – 5.00 m. 103
Figura 140. Frecuencia Vs H/V – Universidad de Medellín sensor 1.1 104
Figura 141. Frecuencia Vs H/V – Universidad de Medellín sensor 4.2 104
Figura 142. Frecuencia Vs H/V – Universidad de Medellín sensor 4.3 105
Figura 143. Frecuencia Vs H/V – Universidad de Medellín sensor 4.4 105
Figura 144. Frecuencia Vs H/V – Universidad de Medellín sensor 4.5 105
Figura 145. Frecuencia Vs H/V – Universidad de Medellín sensor 4.6 105
Figura 146. Histogramas de fase y curvas de auto correlación – Universidad de Medellín – 10.00 m 106
Figura 147. Perfil de velocidad de onda Vs – Universidad de Medellín – 10.00 m 106
Figura 148. Frecuencia Vs H/V – Universidad de Medellín sensor 1.1 107
Figura 149. Frecuencia Vs H/V – Universidad de Medellín sensor 5.2 107
Figura 150. Frecuencia Vs H/V – Universidad de Medellín sensor 5.3 108
Figura 151. Frecuencia Vs H/V – Universidad de Medellín sensor 5.4 108
Figura 152. Frecuencia Vs H/V – Universidad de Medellín sensor 5.5 108
Figura 153. Frecuencia Vs H/V – Universidad de Medellín sensor 5.6 108
Figura 154. Histogramas de fase y curvas de auto correlación – Universidad de Medellín – 15.00 m 109
Figura 155. Perfil de velocidad de onda Vs – Universidad de Medellín – 15.00 m 109
Figura 156. Frecuencia Vs H/V – Obra en Construcción sensor 1.1 110
Figura 157. Frecuencia Vs H/V – Obra en Construcción sensor 2.2 110
Figura 158. Frecuencia Vs H/V – Obra en Construcción sensor 2.3 111
Figura 159. Frecuencia Vs H/V – Obra en Construcción sensor 2.4 111
Figura 160. Frecuencia Vs H/V – Obra en Construcción sensor 2.5 111
Figura 161. Frecuencia Vs H/V – Obra en Construcción sensor 2.6 111
Figura 162. Histogramas de fase y curvas de auto correlación – Sitio de Construcción – 2.50 m 112
Figura 163. Frecuencia Vs H/V – Obra en Construcción sensor 1.1 113
Figura 164. Frecuencia Vs H/V – Obra en Construcción sensor 3.2 113
Figura 165. Frecuencia Vs H/V – Obra en Construcción sensor 3.3 113
Figura 166. Frecuencia Vs H/V – Obra en Construcción sensor 3.4 113
Figura 167. Frecuencia Vs H/V – Obra en Construcción sensor 3.5 114
Figura 168.. Frecuencia Vs H/V – Obra en Construcción sensor 3.6 114
Figura 169. Histogramas de fase y curvas de auto correlación – Sitio de Construcción – 5.00 m 114
Figura 170. Perfil de velocidad de onda Vs – Sitio de Construcción – 5.00 m 115

Figura 171. Frecuencia Vs H/V – Seminario Mayor sensor 1.1 116
Figura 172. Frecuencia Vs H/V – Seminario Mayor sensor 2.2 116
Figura 173. Frecuencia Vs H/V – Seminario Mayor sensor 2.3 116
Figura 174. Frecuencia Vs H/V – Seminario Mayor sensor 2.4 116
Figura 175. Frecuencia Vs H/V – Seminario Mayor sensor 2.5 117
Figura 176. Frecuencia Vs H/V – Seminario Mayor sensor 2.6 117
Figura 177. Histogramas de fase y curvas de auto correlación – Seminario Mayor – 2.50 m 117
Figura 178. Perfil de velocidad de onda Vs – Seminario Mayor – 2.50 m 118
Figura 179. Frecuencia Vs H/V – Seminario Mayor sensor 1.1 119
Figura 180. Frecuencia Vs H/V – Seminario Mayor sensor 3.2 119
Figura 181. Frecuencia Vs H/V – Seminario Mayor sensor 3.3 119
Figura 182. Frecuencia Vs H/V – Seminario Mayor sensor 3.4 119
Figura 183. Frecuencia Vs H/V – Seminario Mayor sensor 3.5 120
Figura 184. Frecuencia Vs H/V – Seminario Mayor sensor 3.6 120
Figura 185. Histogramas de fase y curvas de auto correlación – Seminario Mayor – 5.00 m 120
Figura 186. Perfil de velocidad de onda Vs – Seminario Mayor – 5.00 m 121
Figura 187. Frecuencia Vs H/V – Seminario Mayor sensor 1.1 122
Figura 188. Frecuencia Vs H/V – Seminario Mayor sensor 4.2 122
Figura 189. Frecuencia Vs H/V – Seminario Mayor sensor 4.3 122
Figura 190. Frecuencia Vs H/V – Seminario Mayor sensor 4.4 122
Figura 191. Frecuencia Vs H/V – Seminario Mayor sensor 4.5 123
Figura 192. Frecuencia Vs H/V – Seminario Mayor sensor 4.6 123
Figura 193. Histogramas de fase y curvas de auto correlación – Seminario Mayor – 10.00 m 124
Figura 194. Perfil de velocidad de onda Vs – Seminario Mayor – 10.00 m 124
Figura 195. Frecuencia Vs H/V – Seminario Mayor sensor 1.1 125
Figura 196. Frecuencia Vs H/V – Seminario Mayor sensor 5.2 125
Figura 197. Frecuencia Vs H/V – Seminario Mayor sensor 5.3 125
Figura 198. Frecuencia Vs H/V – Seminario Mayor sensor 5.4 125
Figura 199. Frecuencia Vs H/V – Seminario Mayor sensor 5.5 126
Figura 200. Frecuencia Vs H/V – Seminario Mayor sensor 5.6 126
Figura 201. Histogramas de fase y curvas de auto correlación – Seminario Mayor – 15.00 m 126
Figura 202. Perfil de velocidad de onda Vs – Seminario Mayor – 15.00 m 127
Figura 203. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 1.1 128
Figura 204. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 2.2 128
Figura 205. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 2.3 128
Figura 206. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 2.4 128
Figura 207. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 2.5 129
Figura 208. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 2.6 129

Figura 209. Histogramas de fase y curvas de auto correlación – Presa la Fe –2.00 m 129
Figura 210. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 1.1 130
Figura 211. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 3.2 130
Figura 212. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 3.3 131
Figura 213. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 3.4 131
Figura 214. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 3.5 131
Figura 215.. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 3.6 131
Figura 216. Histogramas de fase y curvas de auto correlación – Presa la Fe –5.00 m 132
Figura 217. Perfil de velocidad de onda Vs – Presa la Fe – 5.00 m 132
Figura 218. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 1.1 133
Figura 219. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 4.2 133
Figura 220. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 4.3 134
Figura 221. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 4.4 134
Figura 222. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 4.5 134
Figura 223. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 4.6 134
Figura 224. Histogramas de fase y curvas de auto correlación – Presa la Fe –10.00 m 135
Figura 225. Perfil de velocidad de onda Vs – Presa la Fe – 10.00 m 135
Figura 226. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 1.1 136
Figura 227. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 5.2 136
Figura 228. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 5.3 137
Figura 229. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 5.4 137
Figura 230. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 5.5 137
Figura 231. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 5.6 137
Figura 232. Histogramas de fase y curvas de auto correlación – Presa la Fe –15.00 m 138
Figura 233. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 1.1 139
Figura 234. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 6.2 139
Figura 235. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 6.3 139
Figura 236. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 6.4 139
Figura 237. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 6.5 140
Figura 238. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 6.6 140
Figura 239. Histogramas de fase y curvas de auto correlación – Presa la Fe –20.00 m 140

CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de métodos para la caracterización del suelo mediante ondas 22
Tabla 2. Datos de entrada para la comprobación del SPAC – Ayurá 79

Tabla 3. Datos de entrada para la comprobación del SPAC –La Estrella.....98
Table 4. Datos de entrada para la comprobación del SPAC –Universidad de Medellín
.....110
Tabla 5. Datos de entrada para la comprobación del SPAC –Seminario Mayor ..127

RESUMEN

En el presente trabajo se realizan mediciones de ruido ambiental en seis (6) sitios del Valle de Aburrá y zonas aledañas, con el fin de estimar el perfil de onda Vs y la relación H/V en zonas montañosas, empleando el uso del SPAC y la metodología de Nakamura. El proceso de la información se hace mediante el software de libre dominio Geopsy 3.1.1.

La metodología consiste en medir el ruido ambiental con seis (6) acelerógrafos dispuestos en arreglos circulares con un sensor central, configuración de pentágono. Para el estudio se tomaron muestras de 20 minutos por cada diámetro, los cuales se consideraron de 2.5, 5.0, 10.0, 15.0, 20.0 y 25.0 metros, dependiendo del espacio disponible para la realización del muestreo.

Posteriormente, se procede a realizar el procesamiento de los datos para determinar la frecuencia fundamental del suelo y la estimación del perfil de velocidades de onda. Algunos de los resultados obtenidos por la metodología SPAC se comparan con ensayos de Down hole que también se realizaron cerca a los sitios seleccionados.

El resultado obtenido por ambos métodos arrojó valores similares de velocidades de onda Vs. Además, se detectó que el método SPAC funciona adecuadamente para pendientes iguales o menores al 20% y la relación de H/V no se ve afectada por las pendientes, ni por las irregularidades geométricas evidenciadas en el terreno de estudio (presa la Fe).

En el proceso de análisis de los datos del sitio La Estrella se detectaron problemas en las señales que se registraron cerca de arbustos, teniéndose que modificar el filtro para eliminar las frecuencias espurias de vibración, generadas por el movimiento de los árboles.

ABSTRACT:

In this work, environmental noise measurements are made in six (6) sites of the Aburrá Valley and surrounding areas, in order to estimate the Vs wave profile and the H / V ratio in mountainous areas, using the SPAC and Nakamura's methodology developed using Geopsy 3.1.1 free domain software.

The methodology is based on measuring the environmental noise with six (6) accelerometers, arranged in circular arrangements with a central sensor (pentagon configuration), guaranteeing a radial equidistance. For the study, 20-minute samples were taken for each diameter, which were considered 2.5, 5.0, 10.0, 15.0, 20.0 and 25.0 meters, depending on the space available for sampling.

Subsequently, the data processing is carried out to determine the fundamental frequency of the soil and the estimation of the wave velocity. Some of the results obtained by the SPAC methodology are compared with Down hole trials that were also performed near the selected sites.

The result obtained in both tests yielded similar values of V wave velocity. In addition, it was detected that the SPAC method works properly for slopes equal to or less than 20% and the H / V ratio is not affected by the slopes, nor by the geometric irregularities evidenced in the field of study (dam La Fe).

In the process of analyzing another site (La Estrella), problems were detected in the filtering of the signals that were recorded near shrubs, having to modify the filter to eliminate these vibration frequencies, generated by them.

1.1 INTRODUCCIÓN

En Colombia la mayoría de estudios de sitio utilizados para la caracterización del suelo están basados en la prueba de penetración estándar (SPT) y en las diversas correlaciones que hay entre este ensayo y las velocidades de propagación de la onda de corte en el suelo. Los métodos de down hole o cross hole permiten realizar mediciones de la velocidad de onda de corte o velocidad de onda S (Vs) con la profundidad directamente en el sitio, pero estos ensayos pueden llegar a ser costosos. (Hunter, 2002; Rix et al, 2001).

La velocidad de onda Vs es uno de los parámetros más importantes del suelo; conocer la distribución a lo largo de un estrato es fundamental para estimar las amplificaciones de los movimientos sísmicos y las respuestas de sitio en cuencas sedimentarias (Borcherdt, 1992).

De acuerdo con Aki and Richards (1980) y Bullen (1963), la velocidad de onda de corte (Vs) de los materiales es el mejor indicador de rigidez, con éste parámetro es posible estimar adecuadamente la interacción suelo estructura (ISE). En Colombia y en la mayoría de códigos de diseño en el mundo, se requiere de éste parámetro para una correcta estimación de la ISE (Kramer, 1996; Street et al, 2001).

Los métodos utilizados para hallar la velocidad de la onda de corte, Vs, pueden ser complicados de implementar en sitios de poco espacio debido a que son correlaciones espacio-temporales. La metodología de los microtremores, implementada por Aki (1957), se vuelve muy útil para áreas urbanizadas y su bajo costo en comparación con los otros métodos geofísicos convencionales lo hacen llamativo para su implementación. Basándose en mediciones de ruido ambiental durante períodos cortos de tiempo, se puede hallar la velocidad de onda de corte en cuencas sedimentarias altamente pobladas, tanto a nivel superficial como a determinadas profundidades, (Zaineh et al 2012).

La velocidad de onda de corte Vs, se estima con base en las componentes verticales de los registros de un arreglo de sensores. A partir de las correlaciones entre estos movimientos verticales, que se suponen ocasionados exclusivamente por el paso de ondas de Rayleigh, se pueden estimar las curvas de dispersión de estas ondas (las cuales consisten en la representación gráfica de la velocidad vs frecuencia), y finalmente, a partir de un proceso de inversión, se propone una estratigrafía con un perfil de velocidades de ondas de corte que genere unas curvas de dispersión de la velocidad de las ondas de Rayleigh lo más parecidas posible a las estimadas inicialmente a partir de las correlaciones de los movimientos verticales medidos por el arreglo de sensores.

La metodología de microtremores o sísmica no invasiva o pasiva, surge como una alternativa para estimar el perfil de velocidades de onda de corte y a partir de este perfil el periodo fundamental del suelo. Debido a la relación costo beneficio y a la facilidad de implementación de este procedimiento, este método se constituye en una alternativa muy atractiva en áreas urbanas (Mahajan et al, 2012).

Por otro lado, uno de los métodos más utilizados para estimar la respuesta de sitio es la técnica de Nakamura o H/V (Nakamura, 1989), el cual relaciona las componentes horizontales y verticales de los registros obtenidos por un acelerógrafo. Esta metodología proporciona una estimación de la frecuencia fundamental del suelo (Mundepi and Mahajan, 2010; Picozzi et al, 2009; Parolai and Galiana-Merino, 2006; Parilai et al, 2001). Además, por medio de la metodología propuesta Haskell (1964), se puede calcular la función de transferencia entre los movimientos en superficie y en el basamento rocoso, y de esta inferir el periodo fundamental de vibración del perfil de suelo.

Se realizaron mediciones en seis (6) sitios del valle de Aburrá y zonas aledañas (ver Figura 1). Aunque es bien conocido que las pendientes bajas para el desarrollo de

los métodos geofísicos es un factor importante, se realizaron las mediciones en diferentes pendientes (zona montañosa), con el fin de concluir sobre los resultados obtenidos en estas. Para esto se implementa el software de libre dominio Geopsy 3.1.1 el cual contiene las metodologías SPAC y la relación espectral H/V, con las que se caracterizaran los sitios de estudio.

Figura 1. Localización de los sitios de estudio

En el documento se muestra el trabajo de campo realizado en los diferentes sitios de medición, además de una breve descripción del procesamiento de los datos obtenidos, de los resultados, de las discusiones, y de las conclusiones acerca de la información analizada.

1.2 OBJETIVOS

- Explorar sobre la aplicabilidad del método de mediciones ambientales en terrenos no planos.
- Obtener el periodo fundamental de una presa de tierra mediante exploración indirecta (medición ruido ambiental)
- Estimar el perfil Vs y el periodo fundamental del suelo en seis (6) sitios del valle de Aburrá y zonas aledañas mediante métodos indirectos.
- Verificar los resultados obtenidos con exploraciones existentes.

1.3 ESTADO DEL ARTE

1.3.1 Técnica de relación espectral (Spectral Ratio) H / V o método Nakamura

Las mediciones de vibraciones ambientales registradas en la superficie del suelo están compuestas por dos tipos de ondas: de cuerpo y de superficie; las cuales pueden ser registradas por los sensores cuando estas se reflejan a través de un cambio de impedancia del estrato; es decir, pasar de un material rígido (roca) a uno más blando (suelo) o viceversa. Este concepto aplica tanto para las vibraciones producidas por ruido ambiental, como para las vibraciones producidas por actividad sísmica. (Suarez, 2012).

Independientemente de la procedencia y tipo de onda, el método busca determinar a través de la relación de la transformada de Fourier del movimiento horizontal y vertical (H/V), la frecuencia fundamental del suelo, la cual se identifica como aquella asociada al primer pico de la relación H/V (Suarez, 2012).

1.3.2 Metodología del SPAC

El método SPAC se usa para determinar el perfil de la velocidad de la onda de corte Vs por medio de varios sensores en un arreglo geométrico simple, que por lo general, es un arreglo circular. Como requisito para que el método sea confiable debe existir un sensor central desde el cual se determinan las distancias de los demás sensores para el procesamiento de datos (Claprood et al, 2011).

El método SPAC tradicional tiene en cuenta únicamente la componente vertical de la onda. No obstante, Aki (1957) demostró que puede emplearse adicionalmente información de la componente horizontal para complementar el estudio de velocidad de onda de corte Vs.

En general, para un adecuado procesamiento de los datos se requieren que las ondas sean estacionarias: tanto espacial, como temporalmente. Para esto, se requiere que la toma de registros sea de larga duración, menores a 1 hora, con registros promedios de 20 minutos para que puedan ser tratadas estadísticamente.

Este método es atractivo para estudios de la velocidad de onda de corte en ciudades debido a que estas son una fuente constante de microtremores, tanto de fuentes definidas coomo no definidas, además, el método no es invasivo, es más preciso que otros métodos y requiere menor cantidad de sensores para obtener la misma precisión (Claprood et al, 2011).

El método se basa en dos supuestos: que el registro se compone principalmente de ondas superficiales de Rayleigh generando un campo difuso, es decir, viajando en todas las direcciones, y que es el modo fundamental de la onda de Rayleigh el que se mide en la componente vertical. Para la metodología, se realiza una medición simultanea de sensores en la configuración circular, que permite calcular la correlación espacial, que depende de la frecuencia y la velocidad de la onda, y de ésta estimar la curva de dispersión de la onda superficial de Rayleigh, que está relacionada con el perfil de velocidades del sitio. Por último, se realiza la inversión de la curva de dispersión para construir el perfil de velocidad de onda de corte en el sitio(Lozano, 2013).

En el artículo de Aki (1957) se presentan las ecuaciones del método de forma detallada y en la tesis magistral de Lozano (2013) se encuentran de forma resumida.

1.3.3 Continuous surface wave (CSW)

Este método se emplea para determinar la velocidad de onda de corte Vs en un estrato isotrópico en el cual se dispone un arreglo lineal de geófonos de baja

frecuencia (2Hz) con un vibrador que emite una excitación continua con frecuencias discretas conocidas.

Los datos son leídos en el dominio del tiempo, que a su vez son convertidos al dominio de la frecuencia mediante la transformada rápida de Fourier para determinar así la fase de cada señal, con la que se determina la longitud de onda, la cual depende de la distancia entre geófonos y la fase de cada señal.

Un estudio realizado por Richart et al (1970) demostró que hay una relación directa entre la velocidad de fase de la onda Rayleigh y la velocidad de la onda de corte, y que es una constante C la cual depende del módulo de Poisson.

El método CSW se ve limitado debido a que la profundidad de medición está condicionada por el espaciamiento de los geófonos, ya que la longitud de onda dividida la profundidad del estrato es una constante que normalmente se asume como 3.0.

1.3.4 ReMi (Refraction Microtremors)

El método llamado ReMi (refracción de microtremores) es utilizado para encontrar el perfil de velocidad de la onda de corte, mediante un arreglo unidireccional de geófonos separados una distancia conocida y asumiendo que el ruido ambiental registrado (no necesariamente un microtremor) viene de todas las direcciones, generando un campo difuso (Galiana-Merino et al, 2012).

El método es aplicado para ondas de superficie detectadas a través de la mínima velocidad aparente, registrada para cada frecuencia. Realizando la transformada p-tau (Louie, 2001) y con esta la representación de lentitud frecuencia (p-f) se separan estas velocidades para luego construir la curva velocidad- frecuencia (curva de

dispersión) y con la inversión de ésta, encontrar el perfil de velocidad de onda de corte en los primeros 30.0 m (Galiana-Merino et al, 2012).

El método no es aplicable para campos que no sean difusos, es decir, un campo no difuso es el registro de velocidades generadas por una fuente puntual siendo esta inducida o natural.

1.3.5 Multichannel analysis of surface wave (MASW)

El análisis multicanal de onda de superficie (MASW) evalúa la velocidad de la onda de corte (Vs), analizando los modos fundamentales de la onda de Rayleigh. Las ondas son generadas mediante impactos y registradas por medio de geófonos normalmente dispuestos de manera lineal (Park et al. 1999).

El ensayo geofísico se debe localizar en una zona plana, debe de contener como mínimo 12 geófonos, el arreglo debe tener una longitud mínima de 1.5 veces la profundidad de investigación, espaciados a una distancia conocida y separados de la fuente emisora. El método permite determinar y eliminar los modos no fundamentales de la onda superficial, al igual que el ruido registrado en la señal (Louie 2001).

El perfil de velocidades de la onda de corte se estima a través de la inversión de la curva de dispersión de la onda superficial, registrada mediante multicanales de banda ancha, los cuales detectan los registros de alta frecuencia de la onda de Rayleigh.

Es de tener en cuenta que en la cercanía de maquinaria de perforación y tránsito pesado, se genera una mala calidad de los datos, que son una limitante del ensayo.

1.3.6 Frequency wavenumber (f-k)

Este método es empleado para la obtención del perfil de velocidad de onda de corte Vs. El cual, en conjunto con un arreglo de mediciones de ruido ambiental, conforman una alternativa económica y no destructiva para la obtención del perfil Vs (Tokeshi, 2006).

De las mediciones del ruido ambiental se obtienen las curvas de dispersión de las ondas de Rayleigh las cuales son dominantes y se pueden representar a través de la variación de la velocidad de propagación con la frecuencia, conocida generalmente como velocidad de fase.

La velocidad de fase es estimada con base en el espectro de potencia P(k_x, k_y, f), el cual está relacionado con el vector de onda *k* y su respectiva frecuencia *f* para un arreglo determinado de sensores. La velocidad de fase es obtenida para los picos de potencia en el espacio del número de onda (Huang, 2015)

Dentro del método f-k existen diversas metodologías para la obtención del espectro de potencia P($\vec{k}, f$), tal como son: CVFK, CVFK2, CAPON, MUSIC, entre otros (Ohrnberger, 2004).

1.3.7 Seismic cone penetrometer (SCPT)

Este método consiste en incorporar un geófono a un cono de penetración estándar, con el cual se mide la velocidad de onda de corte Vs y por ende, se obtiene el módulo de cortante G, los cuales están relacionados a través del peso específico del suelo ρ (Robertson, 1986).

El geófono se posiciona de manera que se detecte la componente horizontal de la onda de corte; la cual es inducida superficialmente por un martillo. Este método no

es apropiado para suelos sobreconsolidados, porque se han encontrado grandes potenciales de error en mediciones en estos tipos de suelo.

El costo de este método es generalmente alto debido al tiempo requerido en la elaboración del ensayo y el costo del mismo (se requiere tener una o más perforaciones profundas) haciendo que el método sea impráctico para proyectos de riesgo bajo (Holmsgaard, R, 2016).

1.3.8 Standar Penetration Test (SPT)

El ensayo de penetración estándar (SPT) se utiliza para realizar reconocimiento geotécnico. Es uno de los ensayos más utilizados en el medio y consiste en medir el número de golpes necesario para penetrar el suelo a una profundidad determinada. Para lo anterior se utiliza una pesa que golpea un varillaje unido a un tomamuestras con el que se extraen muestras alteradas. La pesa golpea el varillaje con una caída libre determinada. El número de golpes obtenidos en el proceso se usan en varias correlaciones para caracterizar geotécnicamente el suelo. entre estas correlaciones se puede hallar la correlación entre el número de golpes del SPT, N, y la velocidad de la onda de corte Vs.

En los artículos de Sykora and Koester (1988) y Dikmen (2009) se presentan algunas correlaciones para la obtención del perfil de onda, pero es de aclarar que el método en general presenta bastante incertidumbre ya que la realización del ensayo depende de muchos factores (Sykora and Koester 1988).

1.3.9 Down Hole

El ensayo consiste en introducir un geófono en un pozo el cual registra los tiempos de viaje de las ondas de cuerpo y de superficie generadas en la parte superior del terreno por un martillo que golpea una placa. Realizando este procedimiento a lo

largo del pozo es posible calcular el perfil de velocidades y con esto encontrar los diferentes niveles o estratos caracterizando el perfil de suelo. Las desventajas del método es que no registra las alteraciones del suelo generadas por la realización del pozo y genera inconvenientes en presencia de agua, al igual que si el golpe de generación de la onda es excesivo o insuficiente (Stokoe 2012).

1.3.10 Cross Hole

Este método geofísico utiliza como mínimo dos pozos, uno de ellos con la fuente emisora y el otro con el geófono. Tanto la fuente emisora como el geófono deben estar situados a la misma profundidad. Repitiendo este procedimiento a lo largo de la exploración se logra caracterizar el suelo que se encuentra entre el emisor y el receptor. Se recomienda realizar el ensayo en más de dos pozos para caracterizar apropiadamente el suelo y evitar incertidumbres en el proceso. Dependiendo de la fuente emisora se logra obtener mejor resolución en ondas de cuerpo o de superficie (Stokoe 2012).

1.3.11 Resumen de métodos geofísicos

Tabla 1. Resumen de métodos para la caracterización del suelo mediante ondas

Nombre del método	Ventajas	Desventajas	Autores Citados
H/V	• Se utiliza con registros de mediciones ambientales • Se utiliza con registros de actividad sísmica • Cálculo de la frecuencia fundamental del suelo. • Método no invasivo	• No da información del perfil de velocidades	• (Suarez, 2012). • (Nakamura, 2000).

SPAC	• Arreglo geométrico simple • Método no invasivo • Más preciso que otros métodos • Menor cantidad de sensores • Permite estimar el perfil de velocidad de la onda de corte Vs • Método no invasivo	• Requiere una onda estacionaria, tanto temporal como espacialmente • Requiere registros de larga duración	• (Claprood et al, 2011). • (Aki, 1957)
CSW	• Permite estimar el perfil de velocidad de la onda de corte Vs • Arreglo lineal de geófonos • Método no invasivo	• Condicionado a la separación de geófonos	• (Richart et al, 1970) • (Moxhay et al, 2001).
ReMi	• Permite estimar el perfil de velocidad de la onda de corte Vs • Arreglo unidimensional de geófonos • método no invasivo	• Ondas inducidas mediante impactos • no es aplicable para fuentes puntuales	• (Galiana-Merino et al, 2012) • (Louie,2001)
MASW	• Permite estimar el perfil de velocidad de la onda de corte Vs • Arreglo lineal • Método no invasivo	• Ondas inducidas mediante impactos • Zona plana • Mínimo 12 geófonos • Profundidad de exploración depende de la longitud del arreglo	• (Park et al. 1999). • (Louie 2001).

f-k	• Permite estimar el perfil de velocidad de la onda de corte Vs • Medición de ruido ambiental • Método no invasivo	• Método es complejo para el procesamiento de la información	• (Tokeshi, 2006) • (Huang, 2015) • (Ohrnberger, 2004)
SCPT	• Medición continua y directa del suelo	• Método invasivo • No es apropiado para suelos sobre consolidados	• (Robertson, 1986) • (Holmsgaard, R, 2016)
SPT	• Extracción de muestras • Correlación para hallar Vs	• Método invasivo • Presenta muchas incertidumbres	• (Sykora and Koester 1988) • Dikmen (2009)
Down hole	• Medición directa en el suelo • Descripción del suelo de forma continua	• Requiere al menos una perforación para realizar el ensayo • No es efectivo en presencia de agua	• (Stokoe 2012)
Cross hole	• Medición directa en el suelo • Descripción del suelo de manera continua	• Requiere al menos dos perforaciones para realizar el ensayo. •	• (Stokoe 2012)

1.4 TRABAJO DE CAMPO

1.4.1 Arreglo de mediciones de microtremores o ruido ambiental

Se realizó la medición de vibraciones ambientales en seis (6) lugares seleccionados en el valle de Aburrá (Departamento de Antioquia, Colombia): Ayurá, La Estrella, Universidad de Medellín, obra en construcción, seminario mayor y Presa la fe (ver Figura 1). Para éstas mediciones se utilizaron seis (6) sensores marca *Tromino* facilitados por el EERF de The University of British Columbia (UBC). En cada sitio se usó un arreglo circular colocando los equipos en configuración de pentágono, garantizando así una equidistancia radial. Se tomaron muestras de 20 minutos por cada diámetro, los cuales se consideraron de 2.5, 5.0, 10.0, 15.0, 20.0 y 25.0 metros, dependiendo del espacio disponible para el muestreo.

Los ensayos tradicionales de caracterización geotécnica mediante ruido ambiental se realizan en superficies planas, en este caso algunos de los sitios seleccionados presentaban desniveles topográficos, por lo que se realizó una nivelación (medición) del terreno para tener en cuenta su topografía en el análisis.

Los sitios se eligieron buscando tener tanto registros de aceleraciones de sismos, como características geotécnicas de los suelos subyacentes para su posterior comparación.

Cinco (5) de estos sitios se tomaron en el área aledaña a estaciones acelerográficas de la región y el último en una obra de construcción (Ciudad del Bosque) donde anteriormente se realizaron ensayos de geofísica.

1.4.2 Ayurá

1.4.2.1 Localización

Ayurá se ecuentra Localizada en el municipio de Envigado en la planta de tratamiento Ayurá, con coordenadas 6°10'00.1"N, 75°33'58.2"W y a una altura sobre el nivel del mar de 1784 m.

1.4.2.2 Topografía

La Figura 2 muestra la planta con la dirección norte instrumental del arreglo de los sensores Ayurá.

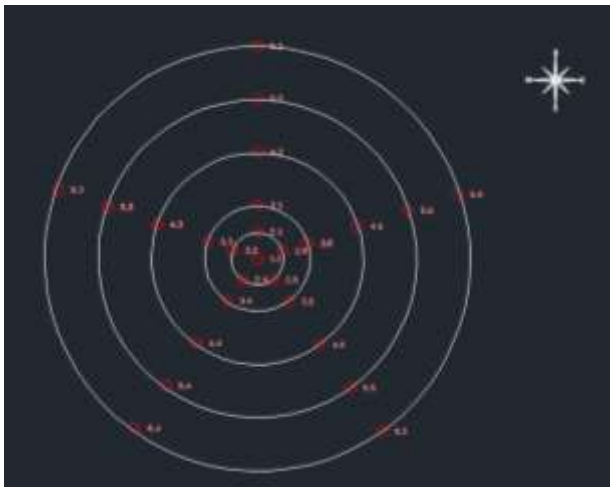


Figura 2. Planta Ayurá

La Figura 3 muestra las curvas de nivel del arreglo de los sensores en Ayurá.

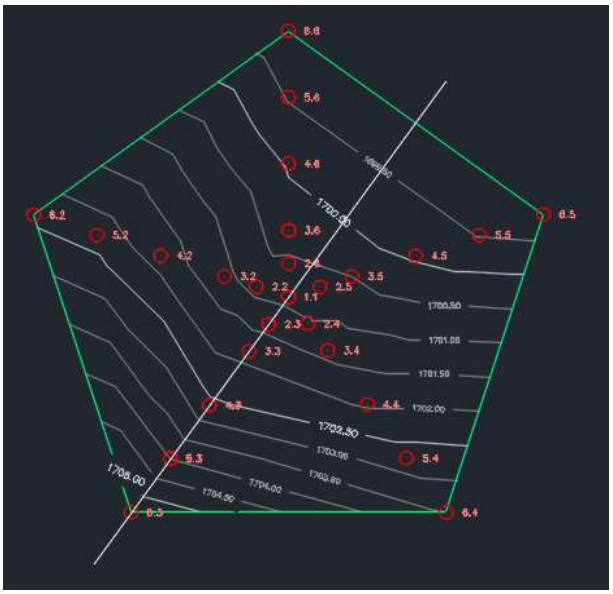


Figura 3. Curvas de nivel del levantamiento Ayurá

La Figura 4 muestra el perfil del levantamiento en Ayurá.

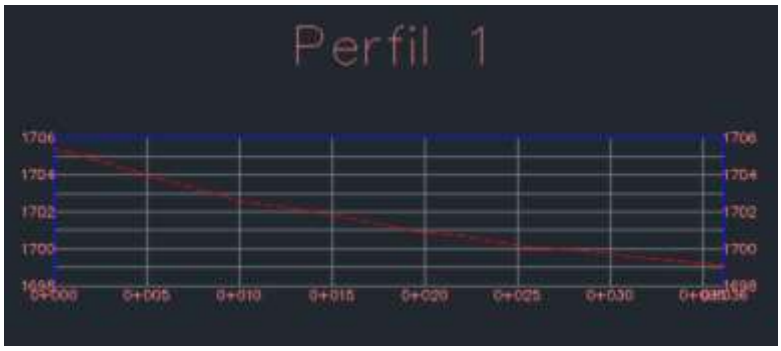


Figura 4. Perfil levantamiento Ayurá

1.4.2.3 Registro fotográfico

La Figura 5 muestra la distribución de los sensores en el área.

Figura 5. Fotografía Ayurá 1

La Figura 6 muestra la estación acelerográfica Ayurá.

Figura 6. Fotografía Ayurá 2

La Figura 7 muestra la ejecución del levantamiento topográfico.

Figura 7. Fotografía Ayurá 3

1.4.3 La Estrella

1.4.3.1 Localización

La Estrella se ecuentra localizada en el municipio de la Estrella en el tanque de EPM, coordenadas 6°9'32,58"N, 75°38'54,48”W y a una altura sobre el nivel del mar de 1699 m.

1.4.3.2 Topografía

La Figura 8 muestra la planta con la dirección norte instrumental del arreglo de los sensores en La Estrella.

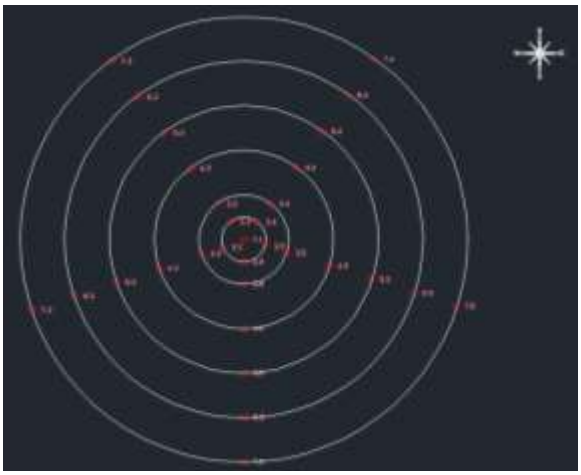


Figura 8. Planta La Estrella

La Figura 9 muestra las curvas de nivel del arreglo de los sensores en La Estrella.

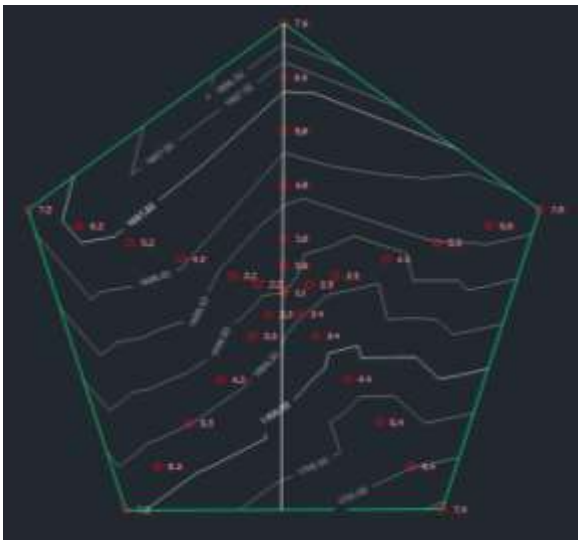


Figura 9. Curvas de nivel levantamiento La Estrella

La Figura 10 muestra el perfil 1 del arreglo de los sensores en La Estrella.

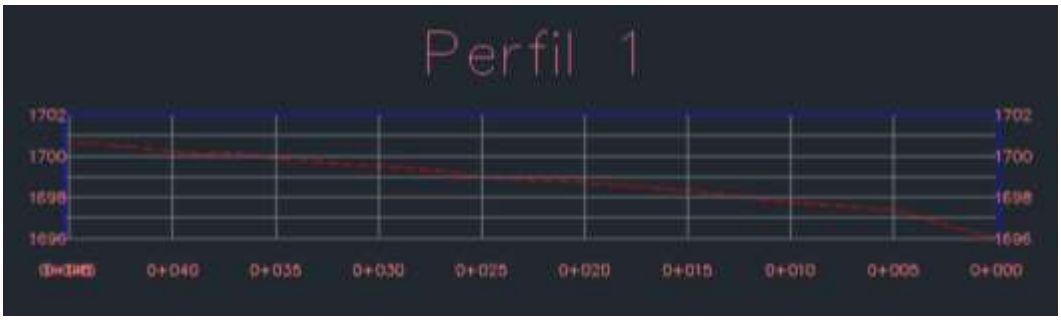


Figura 10. Perfil levantamiento La Estrella

1.4.3.3 Registro fotográfico

La Figura 11 muestra la distribución de los sensores en el área.

Figura 11. Fotografía La Estrella 1

La Figura 12 muestra la estación acelerográfica La Estrella

Figura 12. Fotografía La Estrella 2

1.4.4 Universidad de Medellín

1.4.4.1 Localización

La Universidad de Medellin se ecuentra localizada en la ciudad de Medellin, coordenadas 6°13'53,88"N, 75°36'46,56W y a una altura sobre el nivel del mar de 1599 m.

1.4.4.2 Topografía

La Figura 13 muestra la planta con la dirección norte instrumental del arreglo de los sensores en la Universidad de Medellín.

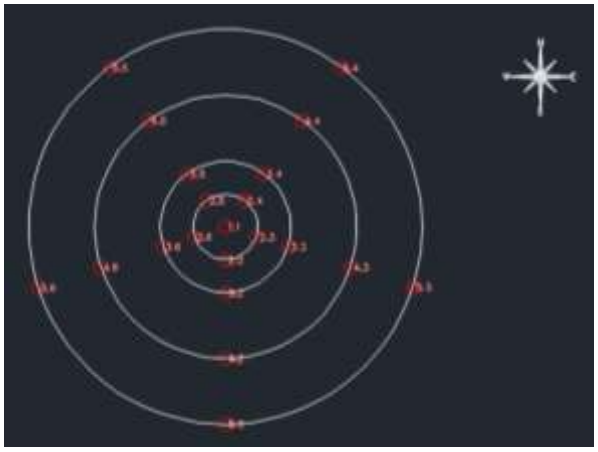


Figura 13. Planta Universidad de Medellín

La Figura 14 muestra las curvas de nivel del arreglo de los sensores en La Universidad de Medellín.

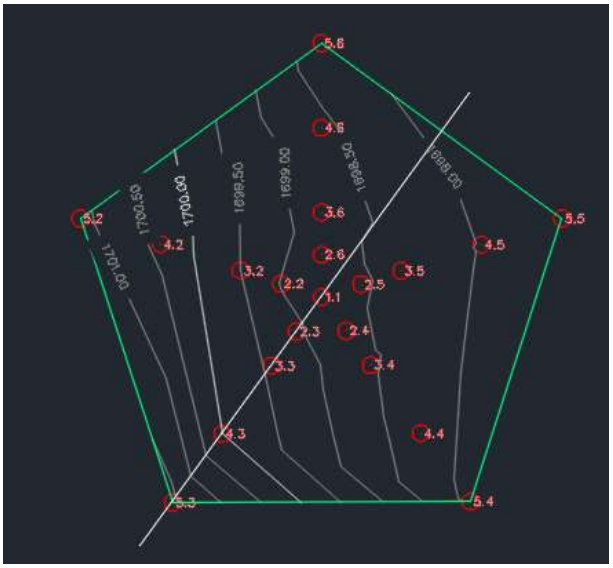


Figura 14. Cuervas de nivel levantamiento Universidad de Medellín

La Figura 15 muestra el perfil 1 del arreglo de los sensores en Universidad de Medellín

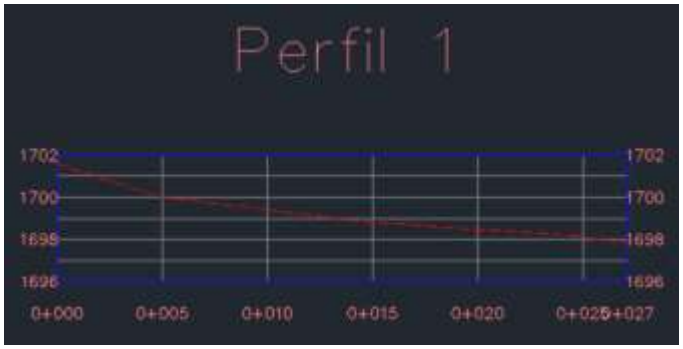


Figura 15. Perfil levantamiento Universidad de Medellín

1.4.4.3 Registro fotográfico

La Figura 16 muestra la distribución de los sensores en el área y la estación acelerográfica.

Figura 16. Fotografía Universidad de Medellín

1.4.5 Obra en construcción (Ciudad del Bosque)

1.4.5.1 Localización

La obra en construcción (Ciudad del bosque) se encuentra en la ciudad de Sabaneta, coordenadas aproximadas 6°9'12.60"N, 75°36'14.52”W y a una altura sobre el nivel del mar de 1637 m.

1.4.5.2 Topografía

La Figura 17 muestra la planta con la dirección norte instrumental del arreglo de los sensores en la obra en construcción Ciudad del bosque.

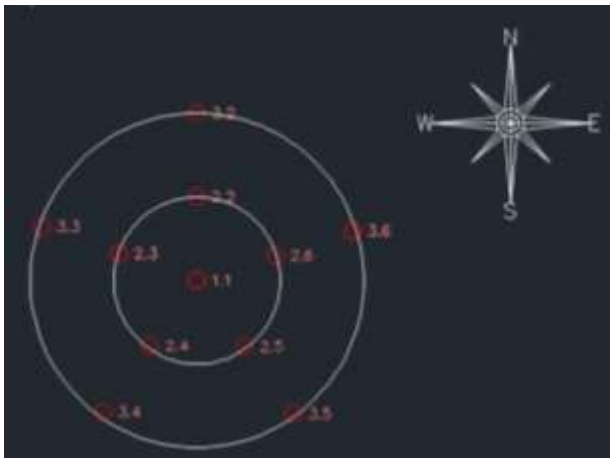


Figura 17. Planta obra en construcción (Ciudad del bosque)

1.4.5.3 Registro fotográfico

La Figura 18 muestra la distribución del arreglo circular en el área

Figura 18. Fotografía 1 obra en construcción (Ciudad del bosque)

1.4.6 Seminario Mayor

1.4.6.1 Localización

Seminario Mayor se ecuentra localizada en la ciudad de Medellin sector las Palmas, coordenadas 6º13'21,24"N, 75º33'20,28”W y a una altura sobre el nivel del mar de 1819 m.

1.4.6.2 Topografía

La Figura 19 muestra la planta con la dirección norte instrumental del arreglo de los sensores en Seminario Mayor

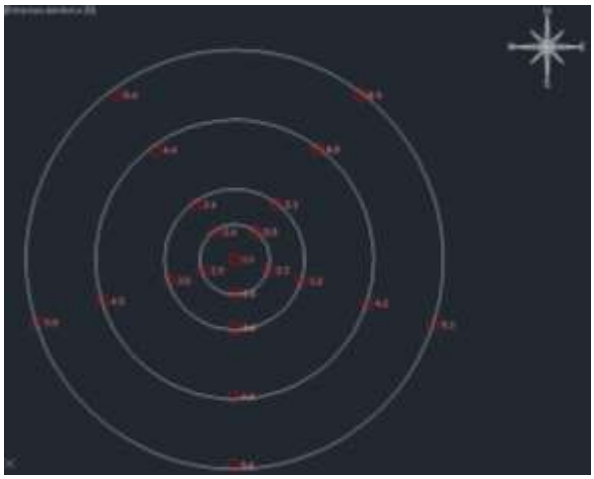


Figura 19. Planta Seminario Mayor

En este caso no fue necesario el uso de nivel óptico pues el terreno es plano

1.4.6.3 Registro fotográfico

La Figura 20 muestra la distribución de los sensores en el área.

Figura 20. Fotografía Seminario Mayor 1

La Figura 21 muestra la estación acelerográfica Seminario Mayor

Figura 21. Fotografía Seminario Mayor

1.4.7 Presa la Fe

1.4.7.1 Localización

La Presa la Fe se ecuentra localizada en el municipio el Retiro, al oriente del valle de aburrá, coordenadas 6° 5'46.25"N, 75°29'24.23"W y a una altura sobre el nivel del mar de 2150 m.

1.4.7.2 Topografía

La Figura 22 muestra la planta con la dirección norte instrumental del arreglo de los sensores en la Presa la Fe.

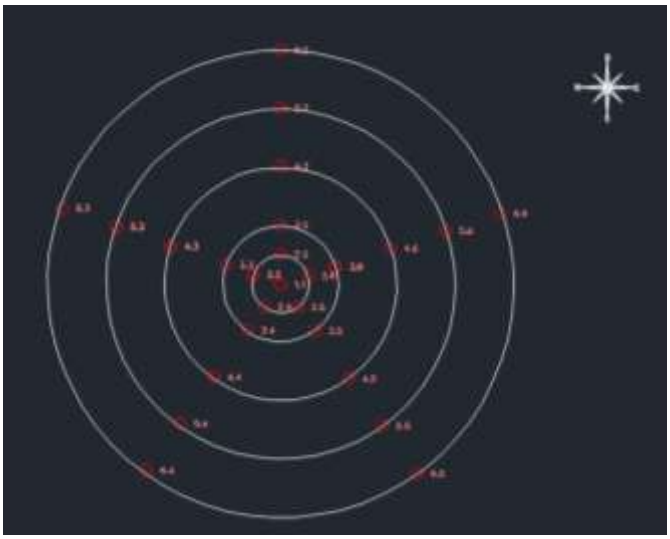


Figura 22. Planta Presa la Fe

La Figura 23 y Figura 24 muestra las curvas de nivel del arreglo de los sensores en La presa.

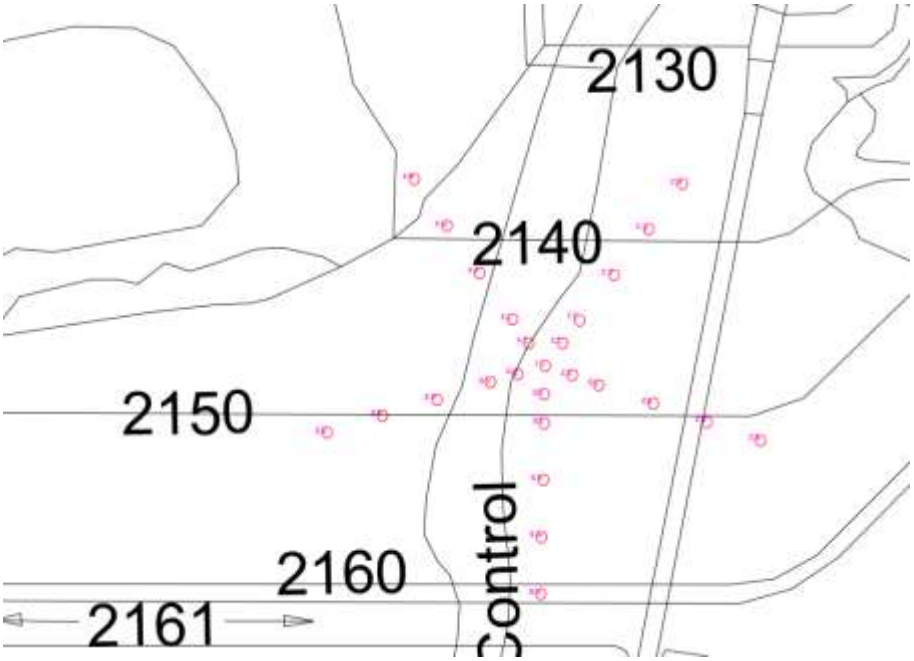


Figura 23. Cuervas de nivel levantamiento Presa la Fe

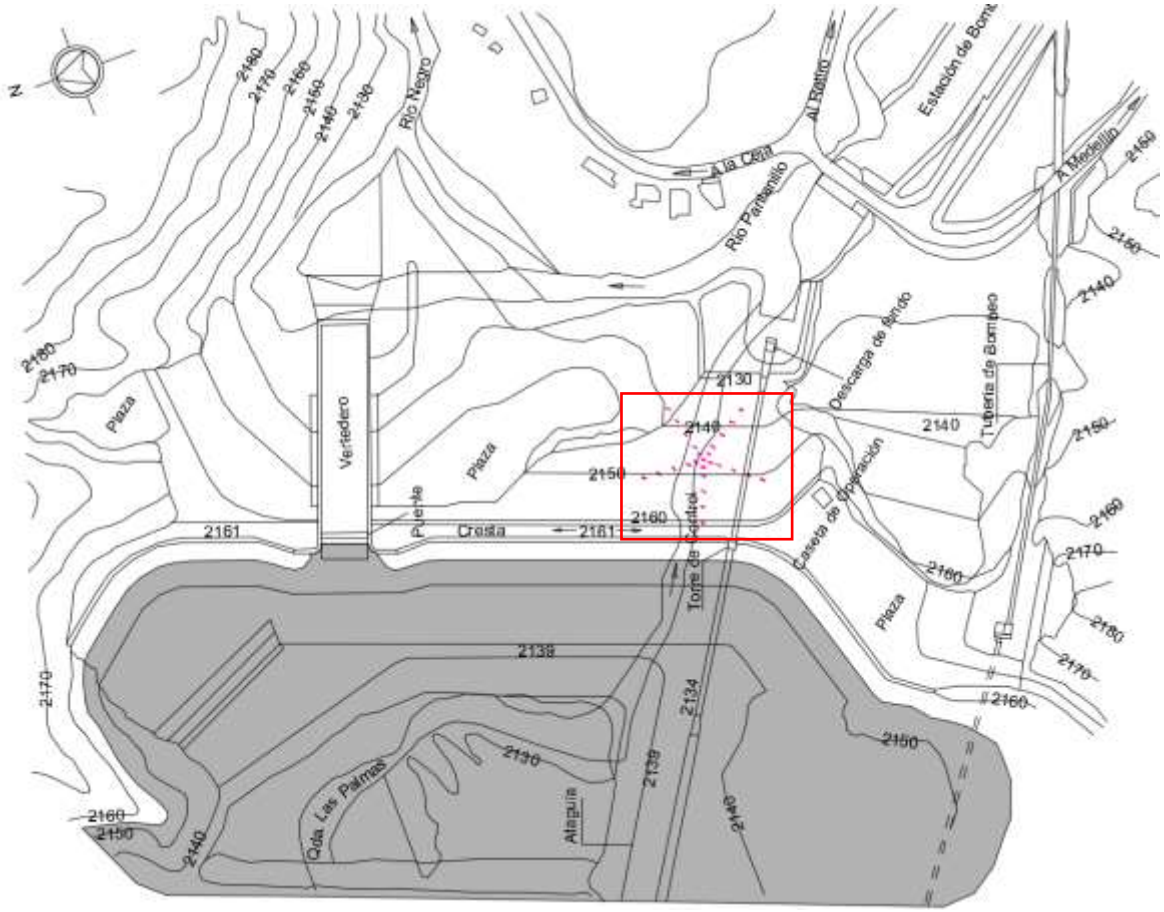


Figura 24. Planta y curvas de nivel Presa la Fe

La Figura 25 muestra el perfil de la presa la Fe en donde se evidencia la pendiente en la cual se realizó la medición.

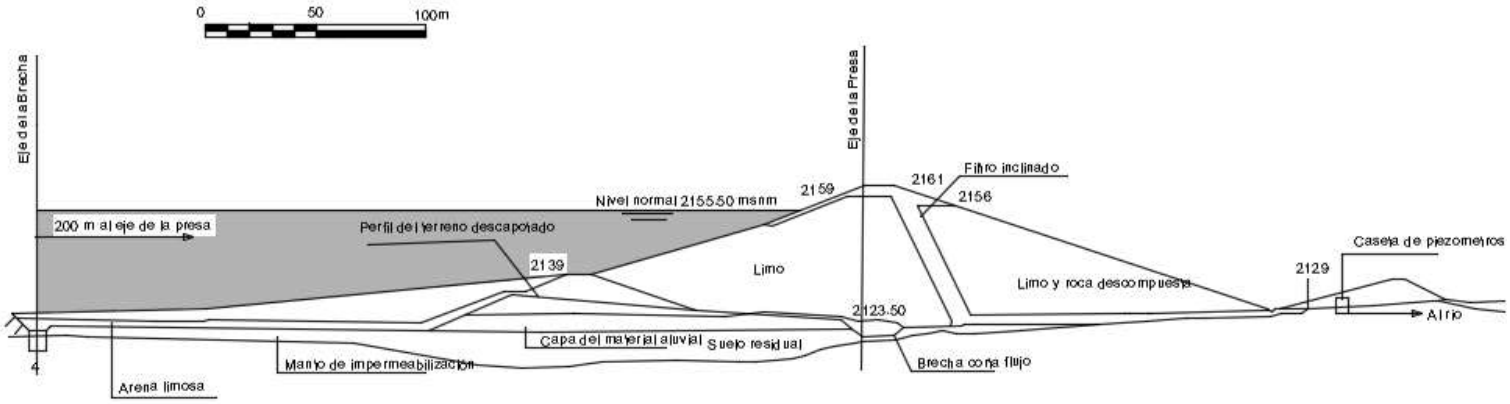


Figura 25. Perfil de Presa la Fe

1.5 PROCESAMIENTO

Las señales registradas en los diferentes sitios fueron procesadas en el software de libre dominio Geopsy 3.1.1, con el que se obtuvieron el periodo fundamental de la estructura del suelo y los perfiles de velocidad de onda Vs; esto se logra empleando la metodología del H/V y SPAC, respectivamente. Se resume a continuación el procedimiento empleado para el procesamiento de los datos:

1.5.1 Procesamiento H/V

Las señales registradas deben ser discretizadas en intervalos de tiempo denominados ventanas, las cuales sirven para promediar los espectros de Fourier de las dos componentes. Por otro lado, de la señal se eliminan los tramos que tienen algún nivel de ruido anómalo respecto al ruido "difuso" del resto de la señal. Los pasos empleados para el procesamiento H/V son:

1. Se introdujeron las componentes horizontales (N,E) y verticales (Z) de las señales registradas en los diferentes sitios.

2. En la herramienta H/V se seleccionó la duración exacta de las ventanas de análisis, la cual fue de 25.0 s permitiendo un traslapo del 5.0% entre ventanas.

3. Se estableció el rango de frecuencias que filtrarán las ventanas de la señal, tomado entre 0.05 Hz y 25.00 Hz condicionado a la sensibilidad de los equipos de medición y los valores de frecuencias en los cuales puede vibrar un suelo.

4. Se seleccionó el porcentaje mínimo de las frecuencias determinadas en el paso 3 que debe tener cada ventana. Para el presente procesamiento se seleccionó un porcentaje del 45%.

5. Posteriormente, las ventanas seleccionadas por el software que cumplen los criterios anteriores son graficadas en la respectiva señal para cada uno de los sensores.

6. Luego de ejecutado el análisis, se grafican las curvas de frecuencias vs H/V en donde se resalta la frecuencia fundamental de la estructura del suelo, la cual se identifica por ser el primer pico en el comportamiento de H/V de acuerdo con lo expuesto en el numeral 1.2.1.

1.5.2 Procesamiento del SPAC

Al ejecutar la herramienta del SPAC, se mostrarán dos ventanas: la primera muestra pares de geófonos normalizados en una geometría circular a partir de las coordenadas X, Y de los sensores y en la segunda ventana se muestran las herramientas de filtrado de las señales de igual manera como se realiza en el procesamiento de H/V.

Para el adecuado procesamiento de las señales, se deben seleccionar anillos los cuales son una herramienta para agrupar la geometría circular normalizada y obtener con estos las curvas de autocorrelación cruzada.

Los pasos empleados para el procesamiento del SPAC son:

1. Se introdujeron únicamente las componentes verticales (Z) de las señales registradas en los diferentes sitios.

2. Se seleccionaron los diámetros externos e internos de los anillos. Inicialmente se determinan como una estimación basada en la localización de los sensores, pero luego se refinan con la herramienta de optimización del SPAC.

3. Se seleccionó la duración exacta de las ventanas de análisis, la cual fue de 25.0 s permitiendo un traslapo del 5.0% entre ventanas.

4. Se estableció el rango de frecuencias que filtrarán las ventanas de la señal, el cual depende de la curva de autocorrelación cruzada, ya que esta debe comenzar en un pico de frecuencia.

5. Se seleccionó el porcentaje mínimo de las frecuencias determinadas en el paso 4 que debe tener cada ventana, para el presente procesamiento se seleccionó un porcentaje del 45%.

6. Se realiza el análisis del SPAC y el resultado obtenido se importa en el complemento *spac2disp* en el que se selecciona, en el histograma de fase, el rango en el que sólo se presente el primer modo de vibración y la curva sea creciente.

7. Se importa al complemento *dinver* la selección obtenida en el paso 6, en donde se especifican la densidad del suelo, la relación de Poisson y la profundidad a la cual se desea la obtención de la inversión del perfil de onda Vs. La profundidad seleccionada para todos los casos fue 30.0 m.

8. Se ejecuta el complemento *dinver* y se obtiene el perfil de la velocidad de onda Vs.

Para una explicación más detallada de los procesamientos de los datos se recomienda leer los tutoriales que ofrece el programa.

1.5.3 Comprobación del SPAC con el H/V

Luego del procesamiento del SPAC y la selección de los estratos, se requiere comprobar si los estratos seleccionados si poseen la frecuencia fundamental hallada en el procesamiento H/V encontrado directamente de la señal. Para esta comprobación se utiliza el programa *HASKEL*, el cual a partir de la geometría del perfil, del perfil de velocidades de la onda de cortante Vs, y del perfil de pesos específicos de los materiales, calcula la función de transferencia del perfil, y de este se identifica la frecuencia fundamental como la frecuencia más baja asociada a una amplificación de la función de transferencia.

En dicho programa *BETA (m/s)* corresponde a la velocidad de onda de corte, RO (t/m^3) es el peso específico del material, *H (m)* corresponde a la altura del estrato medida desde la superficie y *CSI (%)* es el amortiguamiento.

1.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Todos los resultados de los procesamientos de los datos se presentan en el ANEXO 1: RESULTADOS

1.6.1 Ayurá

1.6.1.1 H/V

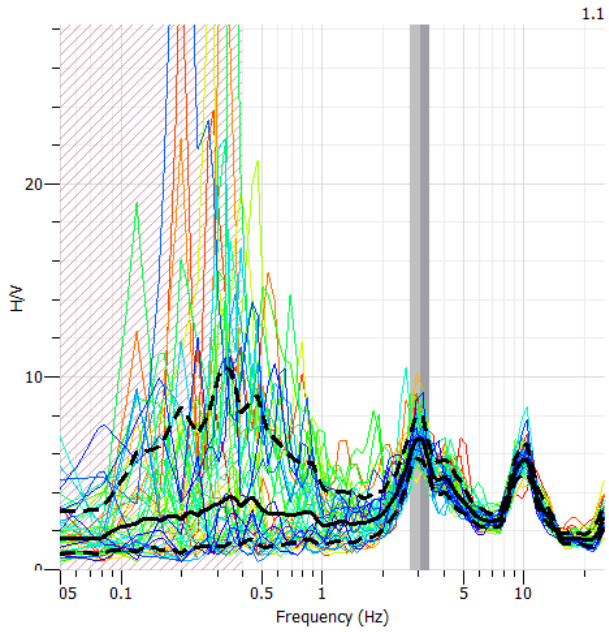


Figura 26. Frecuencia Vs H/V – Ayurá

Para cada uno de los señores se halló el espectro de la relación de H/V (ver ANEXO 1: RESULTADOS) mostrando como resultado las frecuencias fundamentales del suelo, las cuales se encuentran entre 2.98 Hz y 3.10 Hz para un promedio de 3.05 Hz dando como resultado un periodo de 0.33 s. Además, cabe anotar que se excluyen los resultados anómalos encontrados en dicho sitio.

En la Figura 26 se muestra un ejemplo de los resultados obtenidos de los cuales encontramos la frecuencia fundamental en el primer pico dominante de la gráfica,

cada uno de los colores mostrados en esta figura son los espectros para cada una de las ventanas procesadas, la línea negra continua muestra la media de los datos y las líneas negras punteadas muestran la desviación estándar de los datos.

1.6.1.2 SPAC

Para esta estación contamos con información de un Down hole (Microzonificación,2006) realizado cerca de la zona de estudio, con la información de este ensayo se pretende validar la el procesamiento de los datos por la metodología del SPAC.

Se obtuvieron los resultados para cada uno de los arreglos de sensores, (ver ANEXO 1: RESULTADOS) en la Figura 27 mostrando en color azul lo obtenido en el procesamiento de los datos para cada uno de los arreglos y en color rojo se muestra la selección del perfil estratigráfico promedio. Para dicho sitio se puede concluir que se encuentran tres estratos que se distribuyen así: hasta los 4.70 m se encuentra un estrato que posee una velocidad de onda de corte de aproximadamente 160.00 m/s; desde 4.70 m y hasta los 11.00 m se encuentra una velocidad de onda de 270.00 m/s, y finalmente, se encuentra desde los 11.00 m hasta una profundidad indefinida una velocidad de onda aproximada de 500.00 m/s.

En la Figura 28 se muestran los resultados del ensayo Down hole y en la Figura 29 se muestra el perfil de onda Vs el cual incluye los resultados del Down hole y del SPAC evidenciando que el Down hole solo presenta dos (2) estratos y el SPAC presenta tres (3) estratos. La velocidad del primer estrato para ambos ensayos es de 160.00 m/s y el último estrato para el SPAC es de 500.0m/s y para el Down hole es de 530 m/s. El estrato intermedio para el SPAC presenta una velocidad de 270.00 m/s.

También es notorio que el perfil muestra una pendiente no plana y los resultados son muestran concordancia entre ambos ensayos.

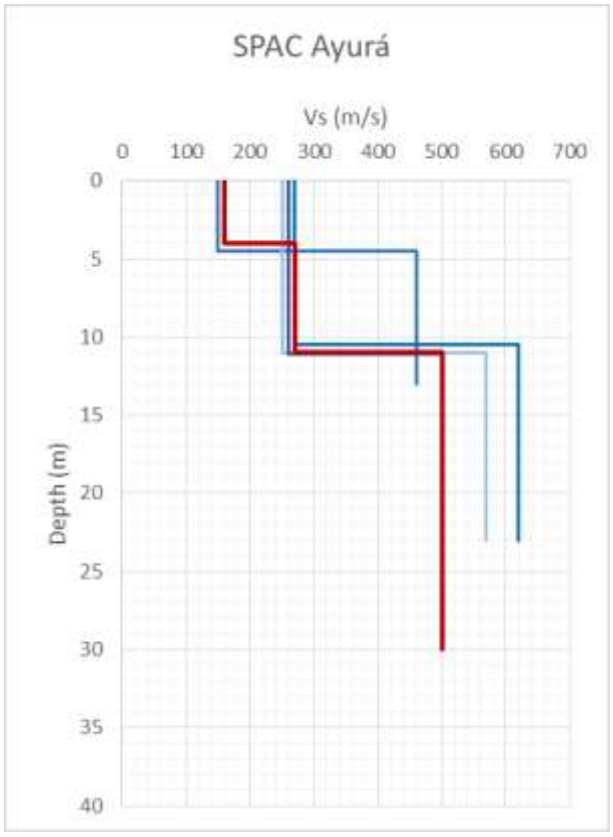


Figura 27. SPAC Perfil de onda Vs Ayurá

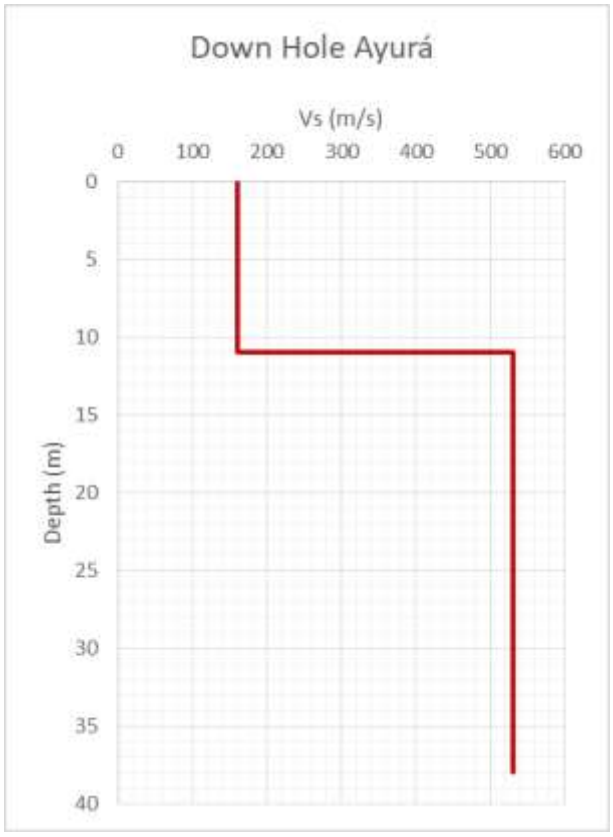


Figura 28. Down hole Perfil de onda Vs Ayurá. (Microzonificación,2006)

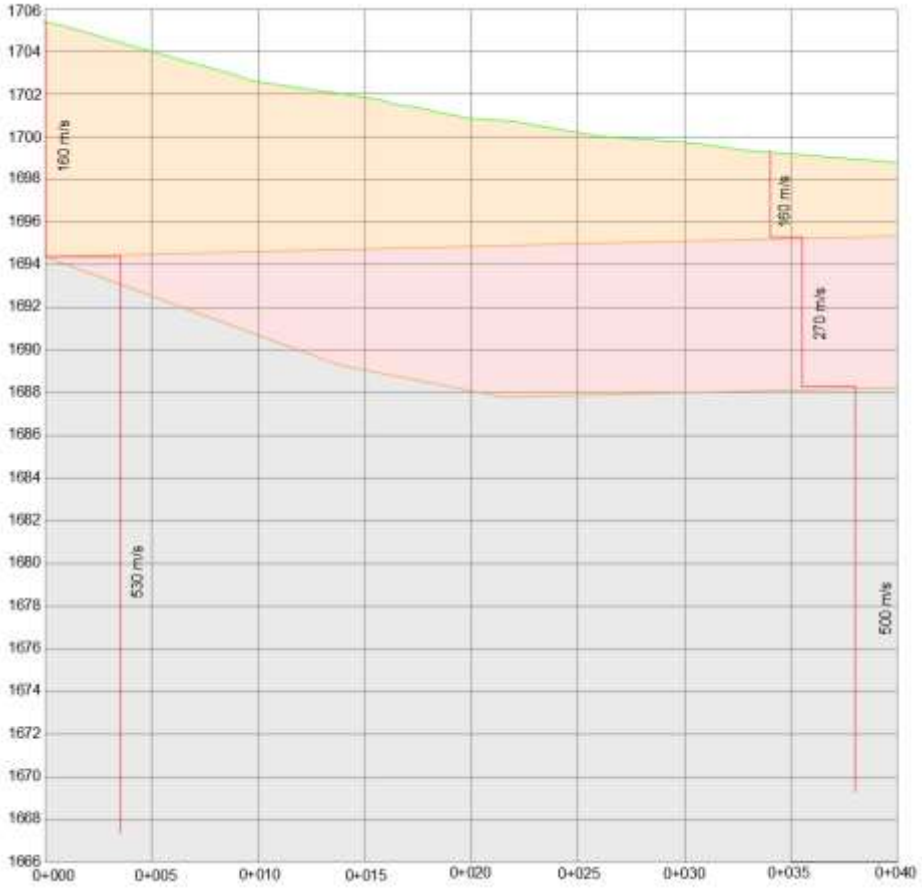


Figura 29. Down hole y SPAC. Perfil de velocidad de onda Vs en Ayurá.

De acuerdo con el perfil del SPAC se obtiene un Vs30= 331 m/s correspondiente a un tipo de suelo D (AASHTO, 2007; ACI, 2019; EUROCODE-8, 2003).

1.6.1.3 Comprobación del SPAC con el H/V

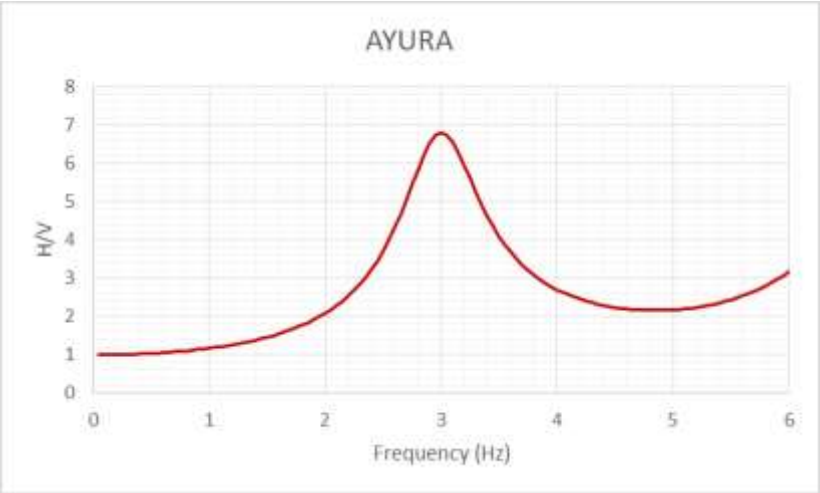


Figura 30. Frecuencia Vs H/V – Ayurá

Se logra identificar que la selección de los estratos es adecuado debido a que la frecuencia fundamental hallada por medio de la comprobación (ver Figura 30) es de 3.10 Hz, similar a la frecuencia fundamental promedio hallada por la metodología de H/V la cual es de 3.05 Hz.

1.6.2 La Estrella

1.6.2.1 H/V

Para este sitio el filtro de 0.05 Hz – 25.00 Hz no arroja resultados coherentes en frecuencias menores a 1.00 Hz debido a la presencia de arbustos (ver Figura 11) cerca a los sensores, por ende fue necesario filtrar nuevamente cambiando el rango a 1.00 Hz – 25.00 Hz (Baker, 1997).En la Figura 31 y Figura 32 se muestra la diferencia en el periodo fundamental con los diferentes filtros aplicados

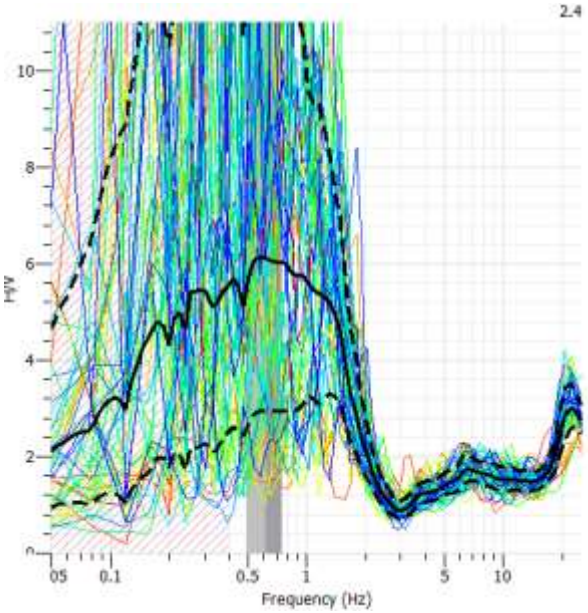


Figura 31. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 2.4 filtro de 0.05 Hz - 25.00 Hz

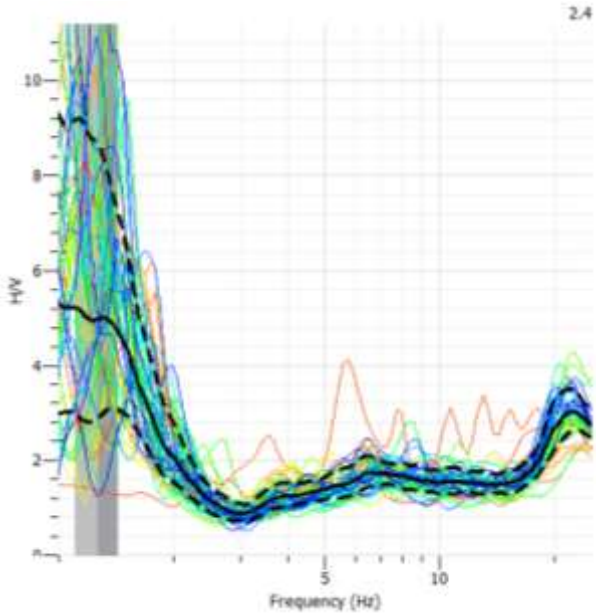


Figura 32. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 2.4 filtro de 1.00 Hz – 25.00 Hz

Del procesamiento de cada uno de los sensores (ver ANEXO 1: RESULTADOS) se puede concluir que la frecuencia fundamental del suelo se encuentra entre 1.32 Hz y 1.60 Hz, para un promedio de 1.50 Hz dando como resultado un periodo de 0.66 s. Además, cabe anotar que se excluyen los resultados anómalos encontrados en dicho sitio.

1.6.2.2 SPAC

Se procesaron cada uno de los arreglos (ver ANEXO 1: RESULTADOS) y se obtiene como resumen la Figura 33 mostrando en color azul lo obtenido del procesamiento de cada uno de los arreglos, y en color rojo se muestra la selección del perfil estratigráfico promedio. Para dicho sitio se pueden identificar tres estratos que se distribuyen de la siguiente manera: hasta los 8.00 m se encuentra un estrato que posee una velocidad de onda de corte de aproximadamente 260.00 m/s; desde 8.00

m y hasta los 15.50 m se encuentra una velocidad de onda de 420.00 m/s, y finalmente, se encuentra desde los 15.50 m hasta una profundidad indefinida, una velocidad de onda aproximada de 580.00 m/s.

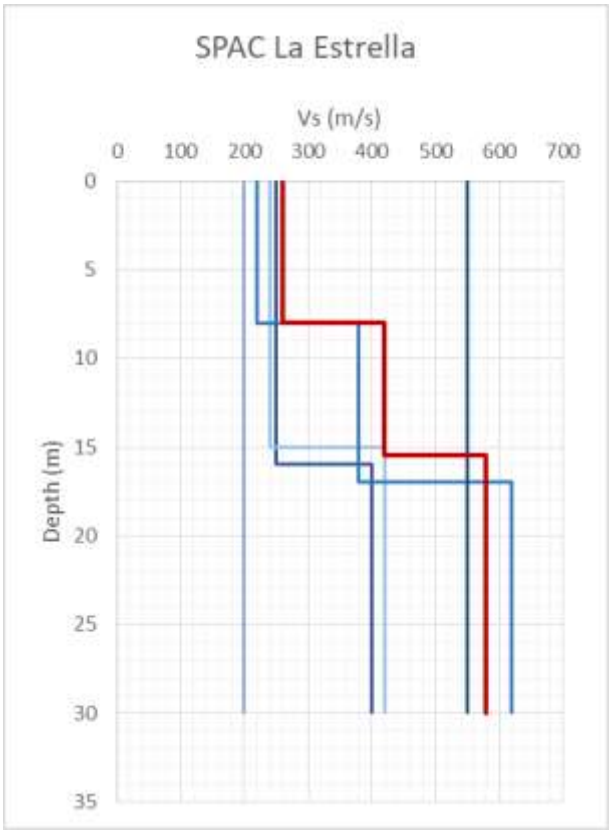


Figura 33. SPAC Perfil de onda Vs La Estrella

De acuerdo con el perfil del SPAC se obtiene un Vs30= 407 m/s correspondiente a un tipo de suelo C (AASHTO, 2007; ACI, 2019; EUROCODE-8, 2003).

1.6.2.3 Comprobación del SPAC con el H/V

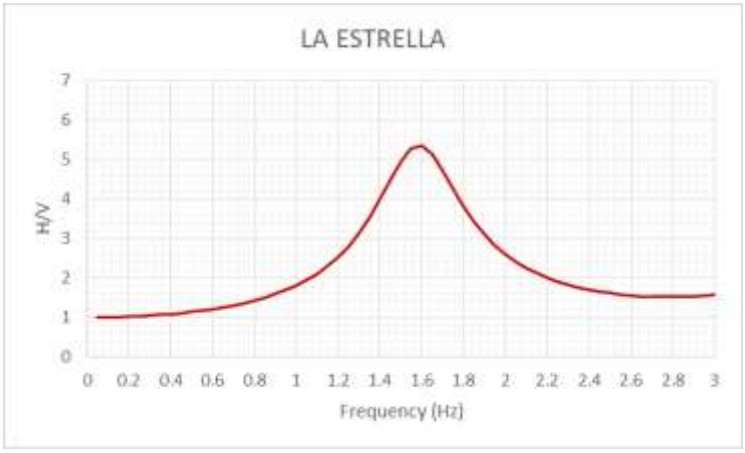


Figura 34. Frecuencia Vs H/V – La Estrella

Se logra identificar que la selección de los estratos es adecuado debido a que la frecuencia fundamental hallada por medio de la comprobación (ver Figura 34) es de 1.55 Hz similar a la frecuencia fundamental promedio hallada por la metodología de H/V la cual es de 1.50 Hz. Además, cabe anotar que se excluyen los resultados anómalos encontrados en dicho sitio.

1.6.3 Universidad de Medellín

1.6.3.1 H/V

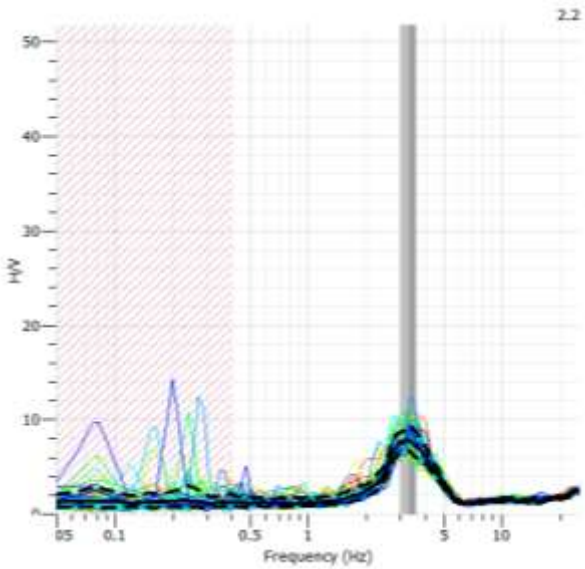


Figura 35. Frecuencia Vs H/V – Universidad de Medellín

Para cada uno de los señores se halló el espectro de la relación de H/V (ver ANEXO 1: RESULTADOS) mostrando como resultado las frecuencias fundamentales del suelo, las cuales se encuentran entre 3.27 Hz y 3.40 Hz para un promedio de 3.34 Hz dando como resultado un periodo de 0.30 s. Además, cabe anotar que se excluyen los resultados anómalos encontrados en dicho sitio.

En la Figura 35 se muestra un ejemplo de los resultados obtenidos de los cuales encontramos la frecuencia fundamental en el primer pico dominante de la gráfica.

1.6.3.2 SPAC

Para esta estación contamos con información de un Down hole (Microzonificación,2006) realizado cerca de la zona de estudio, con la información de este ensayo se pretende validar la el procesamiento de los datos por la metodología del SPAC.

Se obtuvieron los resultados para cada uno de los arreglos de sensores, (ver ANEXO 1: RESULTADOS) en la Figura 36 mostrando en color azul lo obtenido para cada uno de los arreglos, y en color rojo se muestra la selección del perfil estratigráfico promedio. Para dicho sitio se puede concluir que se encuentran dos estratos, los cuales se distribuyen de la siguiente manera: hasta los 13.00 m se encuentra un estrato que posee una velocidad de onda de corte de aproximadamente 200.00 m/s, luego hay un cambio de estrato, hasta una profundidad indefinida con una velocidad de onda de 510.00m/s mostrando un aumento en la velocidad.

En la Figura 37 se muestran los resultados del ensayo Down hole (Microzonificación,2006) realizado cerca de la zona de estudio, y en la Figura 38 se muestra el perfil de onda Vs que incluye los resultados del Down hole y el SPAC,

evidenciando que el Down hole presenta dos estratos al igual que el SPAC. Para el primer y último estrato ambos ensayos obtienen una velocidad de onda de corte similar.

También es notorio que el perfil muestra una pendiente no plana y los resultados son muestran concordancia entre ambos ensayos.

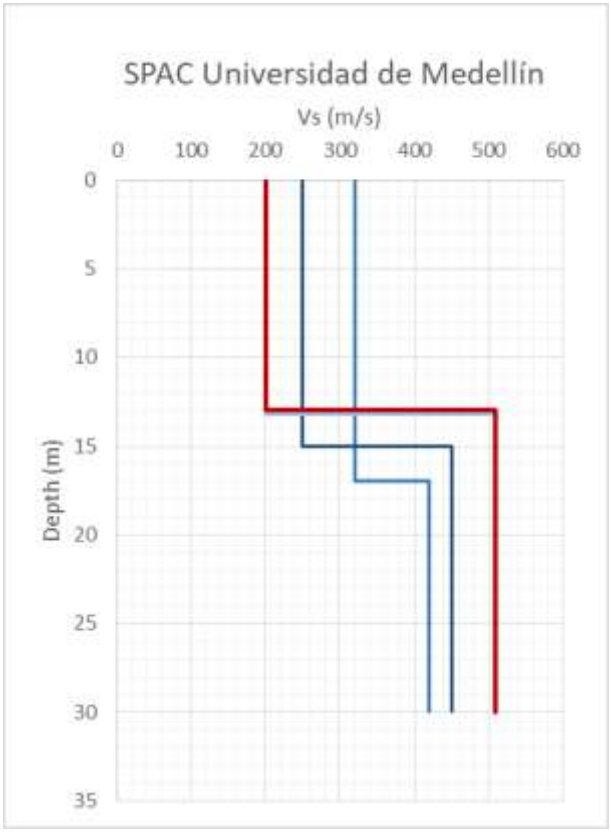


Figura 36. SPAC Perfil de onda Vs UdeM

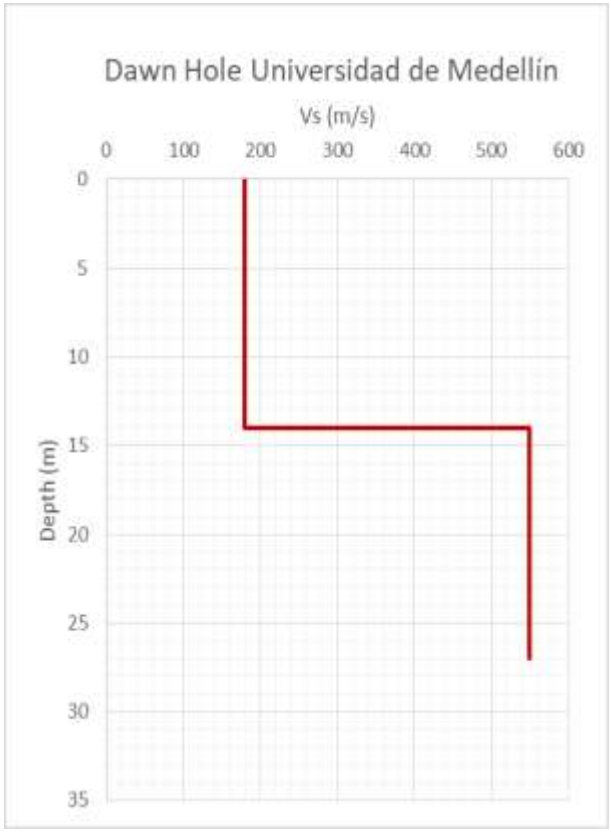


Figura 37. Dawn hole Perfil de onda Vs UdeM (Microzonificación,2006)

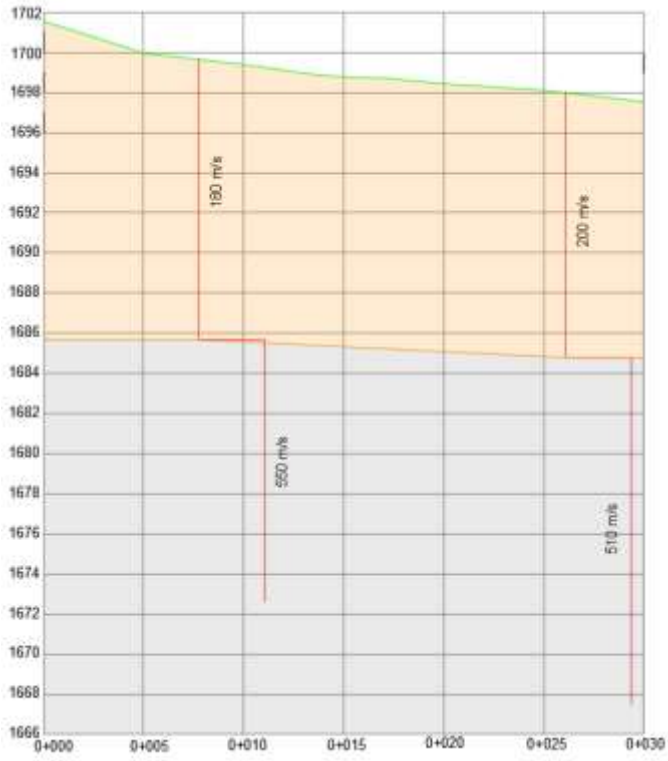


Figura 38. Down hole y SPAC Perfil de onda Vs UdeM

De acuerdo con el perfil del SPAC se obtiene un Vs30= 305 m/s correspondiente a un tipo de suelo D (AASHTO, 2007; ACI, 2019; EUROCODE-8, 2003)

1.6.3.3 Comprobación del SPAC con el H/V

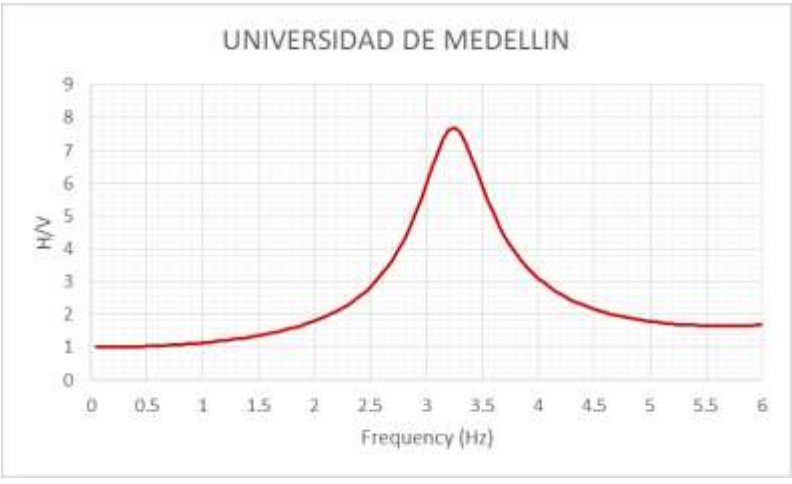


Figura 39. Frecuencia Vs H/V – Universidad de Medellín

Se logra identificar que la selección de los estratos es adecuado debido a que la frecuencia fundamental hallada por medio de la comprobación (ver Figura 39) es de 3.30 Hz similar a la frecuencia fundamental promedio hallada por la metodología de H/V la cual es de 3.34 Hz.

1.6.4 Obra en construcción (Ciudad del Bosque)

1.6.4.1 H/V

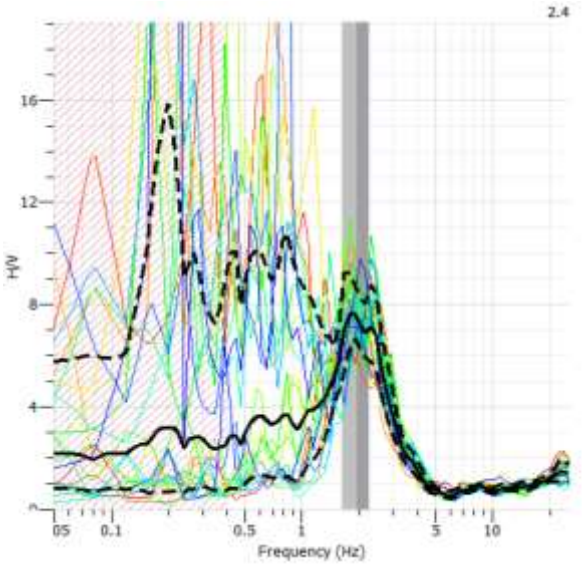


Figura 40. Frecuencia Vs H/V – Obra en Construcción

Para cada uno de los señores se halló el espectro de la relación de H/V (ver ANEXO 1: RESULTADOS) mostrando como resultado las frecuencias fundamentales del suelo, las cuales se encuentra entre 2.03 Hz y 2.07 Hz para un promedio de 2.05 Hz dando como resultado un periodo de 0.49 s. En este sitio la dispersión de los datos fue alta debido a la maquinaria allí encontrada.

En la Figura 40 se muestra un ejemplo de los resultados obtenidos de los cuales encontramos la frecuencia fundamental en el primer pico dominante de la gráfica.

1.6.4.2 SPAC

En el sitio de construcción se encontraba maquinaria en funcionamiento generando un campo no difuso, requisito para la utilización del método, por ende debido a las condiciones de sitio y a las vibraciones causadas por la maquinaria de construcción, no fue posible obtener una inversión que caracterizara adecuadamente los estratos de acuerdo al perfil de ondas Vs.

1.6.4.3 Comprobación del SPAC con el H/V

Debido a que en este sitio no se logró tener una inversión que caracterizara el suelo, no se puede realizar dicha comprobación.

1.6.5 Seminario Mayor

1.6.5.1 H/V

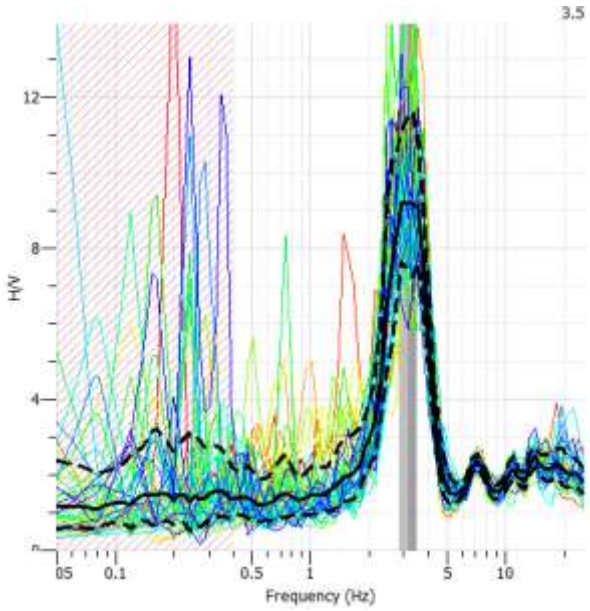


Figura 41. Frecuencia Vs H/V – Seminario Mayor sensor

Para cada uno de los señores se halló el espectro de la relación de H/V (ver ANEXO 1: RESULTADOS) mostrando como resultado las frecuencias fundamentales del suelo, las cuales se encuentra entre 2.76 Hz y 3.27 Hz para un promedio de 3.09 Hz dando como resultado un periodo de 0.32 s. En este sitio no se excluye ningún dato.

En la Figura 41 se muestra un ejemplo de los resultados obtenidos de los cuales encontramos la frecuencia fundamental en el primer pico dominante de la gráfica.

1.6.5.2 SPAC

Se procesaron cada uno de los arreglos (ver ANEXO 1: RESULTADOS) y se obtiene como resumen la Figura 42 mostrando en color azul lo obtenido para las figuras, y en color rojo se muestra la selección del perfil estratigráfico. Para dicho sitio se logra concluir que se encuentran tres estratos que se distribuyen de la siguiente manera: hasta los 17.00 m se encuentra un estrato que posee una velocidad de onda de corte de aproximadamente 200.00 m/s, de los 17.00 m hasta 23.00 m con una velocidad de onda de 420.00 m/s y de los 23.00 m a una profundidad indefinida se posee una velocidad de onda de 1500.00 m/s mostrando un aumento de velocidad con la profundidad.

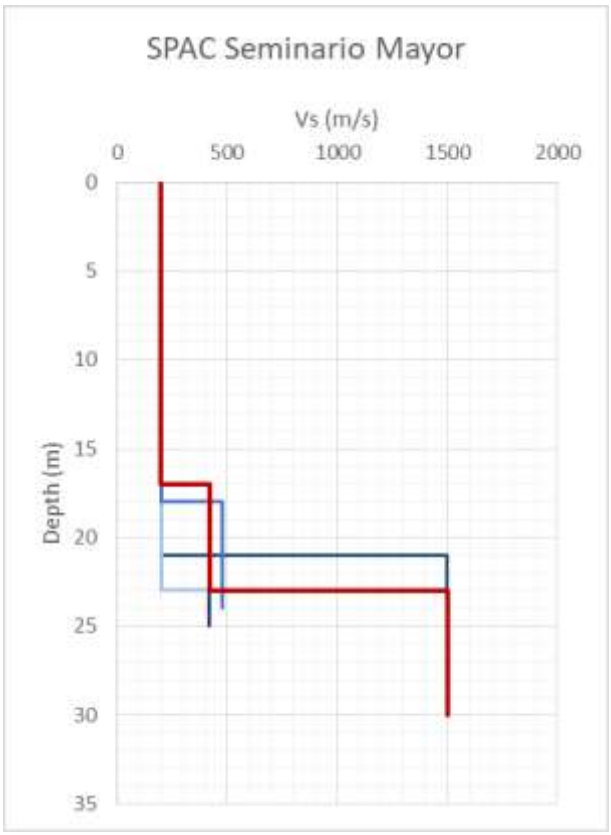


Figura 42. SPAC Perfil de onda Vs Seminario mayor

De acuerdo con el perfil del SPAC se obtiene un Vs30= 289 m/s correspondiente a un tipo de suelo D (AASHTO, 2007; ACI, 2019; EUROCODE-8, 2003)

1.6.5.3 Comprobación del SPAC con el H/V

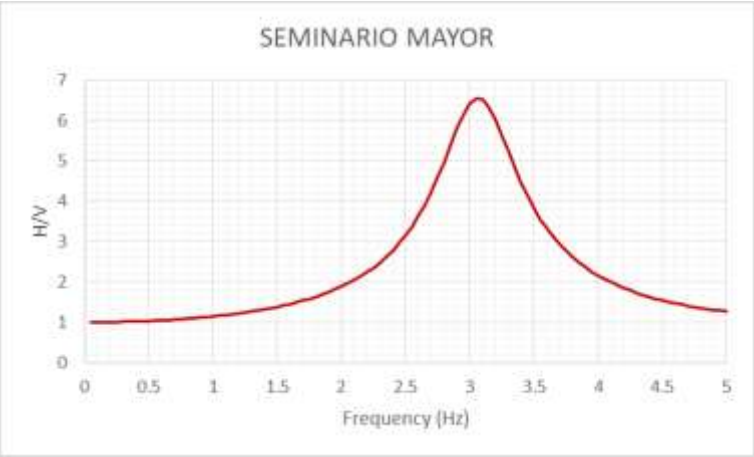


Figura 43. Frecuencia Vs H/V – Seminario Mayor

Se logra identificar que la selección de los estratos es adecuado debido a que la frecuencia fundamental hallada por medio de la comprobación (ver Figura 43) es de 3.05 Hz similar a la frecuencia fundamental promedio hallada por la metodología de H/V la cual es de 3.09 Hz.

1.6.6 Presa la Fe

1.6.6.1 H/V

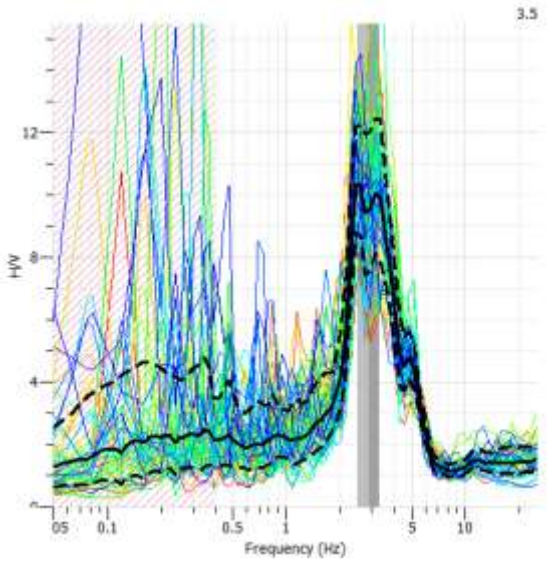


Figura 44. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor

Para cada uno de los señores se halló el espectro de la relación de H/V (ver ANEXO 1: RESULTADOS) mostrando como resultado las frecuencias fundamentales del suelo, las cuales se encuentra entre 3.05 Hz y 2.63 Hz para un promedio de 2.83 Hz dando como resultado un periodo de 0.35 s. Es de resaltar que aunque en el sitio se encuentran pendientes altas e irregularidades geométricas, de la relación H/V fue posible obtener periodos razonables (Miquel and Verret, 2019), además se observa una frecuencia constante en todos los sensores independiente mente de la ubicación de este en la presa

1.6.6.2 SPAC

En el sitio se realizaron mediciones con pendientes altas (ver Figura 25), y aunque en algunos arreglos se logró obtener el perfil de onda Vs pero los resultados obtenidos no son suficientes para determinar un perfil general de la presa; no fue posible obtener una inversión que caracterizara adecuadamente los estratos.

1.6.6.3 Comprobación del SPAC con el H/V

Debido a que en este sitio no se logró tener una inversión que caracterizara el suelo no se puede realizar dicha comprobación.

1.7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Pensamos que es posible realizar mediciones de ruido ambiental en terrenos no planos y obtener resultados consistentes al procesar estas mediciones

Es posible hallar periodos fundamentales en presas de tierra mediante el registro de mediciones ambientales.

Se recomienda complementar con la relación H/V para encontrar el periodo fundamental del suelo y con esta información adicional identificar adecuadamente el perfil de velocidad de onda Vs que tenga un periodo fundamental coincidente con el que se lee de la relación H/V.

Se recomienda que el ensayo se realice en lugares en donde no se estén ejecutando trabajos de construcción en ese preciso momento, debido a que se generan ruidos y la señal no es apropiada para realizar la inversión.

Se recomienda que los sensores no se instalen cerca de arbustos o postes debido a que estos alteran los resultados. De no poderse evitar la instalación de sensores cerca de arbustos se deberá tener en cuenta en el procesamiento de la señal, específicamente en el filtrado de las frecuencias en las que vibran dichos elementos (0.1 Hz a 1 Hz) ya que estos son fuentes puntuales y no alcanzan a generar un campo difuso como lo requiere el método.

Los métodos son económicos y rápidos de implementar lo que disminuye costos en el momento de la ejecución de algún proyecto.

Para la interpretación de H/V se recomienda interpretar los datos obtenidos sensor por sensor y no por arreglo de sensores.

1.8 BIBLIOGRAFÍA

- AASHTO. (2007). LRFD Bridge Design Specifications, 4th Ed., American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.
- ACI Committee, & International Organization for Standardization. (2019). Building code requirements for structural concrete (ACI 318-19) and commentary. American Concrete Institute.
- Aki, K., & Richards, P. G. (1980). Quantitative Seismology, Theory and Methods, Vol. 1 WH Freeman & Co. *New York*.
- Aki, K. (1957). Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, *35*, 415-456.
- Baker, C. J. (1997). Measurements of the natural frequencies of trees. Journal of Experimental Botany, 48(5), 1125-1132.
- Borcherdt, R. D. (1992, November). Simplified site classes and empirical amplification factors for site-dependent code provisions. In *Proc. NCEER, SEAOC, BSSC Workshop on Site Response during Earthquakes and Seismic Code Provisions* (pp. 18-20). University of Southern California, Los Angeles, California.Bullen, (1963). An Introduction to the Theory of Seismology, 3rd edn.
- Claprood, M., Asten, M. W., & Kristek, J. (2011). Using the SPAC microtremor method to identify 2D effects and evaluate 1D shear-wave velocity profile in valleys. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *101*(2), 826-847.
- Dikmen, Ü. (2009). Statistical correlations of shear wave velocity and penetration resistance for soils. *Journal of Geophysics and Engineering*, *6*(1), 61-72.
- EUROCODE-8. (2003). Design of structures for earthquake resistance. Brussels.
- Galiana-Merino, J. J., Ortiz-Zamora, F., & Rosa-Herranz, J. L. (2012). Automatic picking in the refraction microtremor (ReMi) technique using morphology and color processing. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *42*, 95-104.

- Haskell, N. A. (1964). Total energy and energy spectral density of elastic wave radiation from propagating faults. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *54*(6A), 1811-1841.
- Holmsgaard, R., Ibsen, L. B., & Nielsen, B. N. (2016). Interpretation of Seismic Cone Penetration Testing in Silty Soil. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, *21*(15), 4759-4779.
- Huang, H. C., Wu, C. F., Lee, F. M., & Hwang, R. D. (2015). S-wave velocity structures of the Taipei Basin, Taiwan, using microtremor array measurements. *Journal of Asian Earth Sciences*, *101*, 1-13.
- Hunter, J. A. M., Crow, H. L., Arsenault, J. L., Atukorala, U., Best, M. E., Campos, D., ... & Dutrisac, H. (2015). *Shear wave velocity measurement guidelines for Canadian seismic site characterization in soil and rock*. Natural Resources Canada.
- Hunter, J. A., Benjumea, B., Harris, J. B., Miller, R. D., Pullan, S. E., Burns, R. A., & Good, R. L. (2002). Surface and downhole shear wave seismic methods for thick soil site investigations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *22*(9-12), 931-941.
- Kramer, S. (1996). Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice-Hall, Inc. *New Jersey*, 348-422.
- Louie, J. N. (2001). Faster, better: shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *91*(2), 347-364.
- Lozano, C. F. (2013) Uso de registros de microtemblores para la determinación de modelos de velocidad de ondas de corte y respuesta dinámica del suelo en la ciudad de Cúcuta, Colombia (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia).
- Lunne, T., Powell, J. J., & Robertson, P. K. (2002). *Cone penetration testing in geotechnical practice*. CRC Press.

- Mahajan, A. K., Mundepi, A. K., Chauhan, N., Jasrotia, A. S., Rai, N., & Gachhayat, T. K. (2012). Active seismic and passive microtremor HVSR for assessing site effects in Jammu city, NW Himalaya, India—A case study. *Journal of Applied Geophysics*, *77*, 51-62.
- Matthews, M. C., Hope, V. S., & Clayton, C. R. I. (1996). The use of surface waves in the determination of ground stiffness profiles. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts* (Vol. 8, No. 33, pp. 360A-361A).
- Menzies, B., Saxena, K. R., & Sharma, V. M. (2000). Near-surface site characterisation by ground stiffness profiling using surface wave geophysics. *dalam Instrumentation in Geotechnical Engineering, Oxford & IBH Publishing Co. Pvt. Ltd, hal*, 43-71.
- Microzonificación, C. (2006). Microzonificación sísmica detallada de los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado. Capítulo 4 para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 745.
- Miquel, B., & Verret, D. (2019). The use of ambient vibration instrumentation for dams at Hydro-Québec. 1–8.
- Moxhay, A. L., Tinsley, R. D., & Sutton, J. A. (2001). Monitoring of soil stiffness during ground improvement using seismic surface waves. *Ground engineering*, *34*(1), 34-38.
- Mundepi, A. K., & Mahajan, A. K. (2010). Site response evolution and sediment mapping using horizontal to vertical spectral ratios (HVSR) of ground ambient noise in Jammu City, NW India. *Journal of the Geological Society of India*, *75*(6), 799-806.
- Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports*, *30*(1).
- Nakamura, Y. (2000). Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications: Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering. *Auckland, New Zealand, paper*, (2656).

- Ohrnberger, M., Schissele, E., Cornou, C., Bonnefoy-Claudet, S., Wathelet, M., Savvaidis, A., & Jongmans, D. (2004, August). Frequency wavenumber and spatial autocorrelation methods for dispersion curve determination from ambient vibration recordings. In *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering* (Vol. 946). Canada: Vancouver.
- Park, C. B., Miller, R. D., & Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, *64*(3), 800-808.
- Parolai, S., & Galiana-Merino, J. J. (2006). Effect of transient seismic noise on estimates of H/V spectral ratios. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *96*(1), 228-236.
- Parolai, S., Bormann, P., & Milkereit, C. (2001). Assessment of the natural frequency of the sedimentary cover in the Cologne area (Germany) using noise measurements. *Journal of Earthquake Engineering*, *5*(04), 541-564.
- Picozzi, M., Strollo, A., Parolai, S., Durukal, E., Özel, O., Karabulut, S., ... & Erdik, M. (2009). Site characterization by seismic noise in Istanbul, Turkey. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *29*(3), 469-482.
- Richart, H. Woods (1970), Vibrations of soils and foundations.
- Rix, G. J., Lai, C. G., Orozco, M. C., Hebeler, G. L., & Roma, V. (2001). Recent advances in surface wave methods for geotechnical site characterization. In *PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL ME CHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING* (Vol. 1, pp. 499-502). aa balkema publishers.
- Robertson, P. K., Campanella, R. G., Gillespie, D., & Rice, A. (1986). Seismic CPT to measure in situ shear wave velocity. *Journal of Geotechnical Engineering*, *112*(8), 791-803.
- Stokoe, K. H., & Santamarina, J. C. (2012). Seismic Measurements and Geotechnical Engineering In 47th Terzaghi Lecture Vancouver Geotechnical Society.

- Street, R., Woolery, E. W., Wang, Z., & Harris, J. B. (2001). NEHRP soil classifications for estimating site-dependent seismic coefficients in the Upper Mississippi Embayment. *Engineering Geology*, *62*(1-3), 123-135.
- Suárez, L. E., Pando, M. A., & Ritta, R. J. (2012). Ambient Vibration Measurements for Estimation of Site Fundamental Periods–Case History of the City of Mayagüez, Puerto Rico. *WCEE. Lizbon*.Tokeshi.
- Sykora, D. W. and Koester, J. P. (1988) review of exiting correlations between dynamic shear resistance and standard penetration in soils. Proceedinds, Earthquake Engineering and Soil dynamics II-Recent advances in Ground Motion evaluation, ASCE Geotechnical Engineering Division Park City, Utah.
- Tokeshi, J. C., Karkee, M. B., & Sugimura, Y. (2006). Reliability of Rayleigh wave dispersion curve obtained from f–k spectral analysis of microtremor array measurement. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *26*(2-4), 163-174.
- Zaineh, H. E., Yamanaka, H., Dakkak, R., Khalil, A., & Daoud, M. (2012). Estimation of shallow S-wave velocity structure in Damascus city, Syria, using microtremor exploration. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *39*, 88-99.

1.9 ANEXO 1: RESULTADOS

Los resultados del procesamiento de las señales se muestran a continuación:

1.9.1 Ayurá

1.9.1.1 Arreglo 2.50 m

1.9.1.1.1 H/V

F0 3.07+/-0.33 Hz

A0 6.72

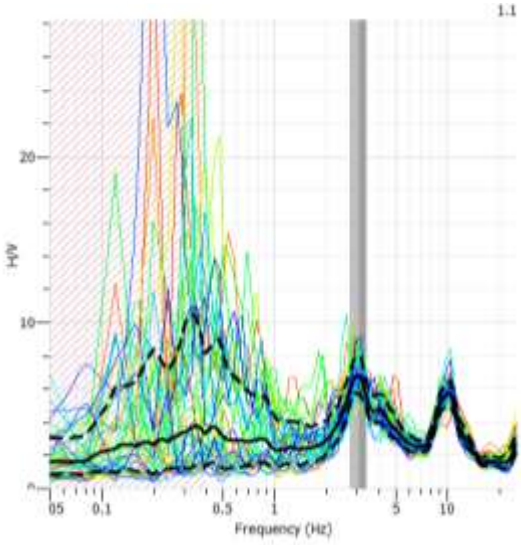


Figura 45. Frecuencia Vs H/V – Ayurá sensor 1.1

F0 3.05+/-0.42 Hz

A0 6.65

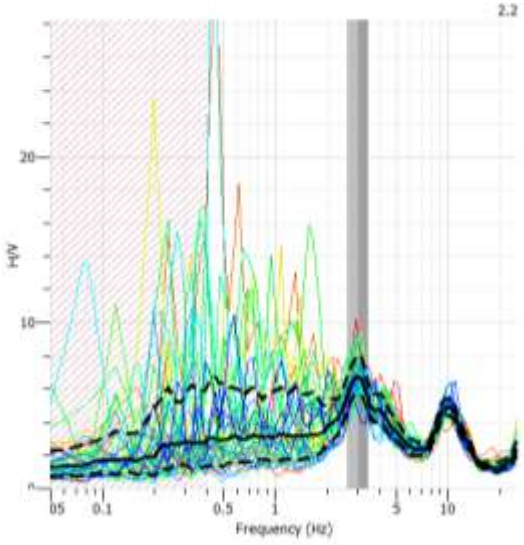


Figura 46. Frecuencia Vs H/V – Ayurá sensor 2.2

F0 3.03+/-0.21 Hz

A0 7.30

F0 0.32+/-0.06 Hz

A0 6.95

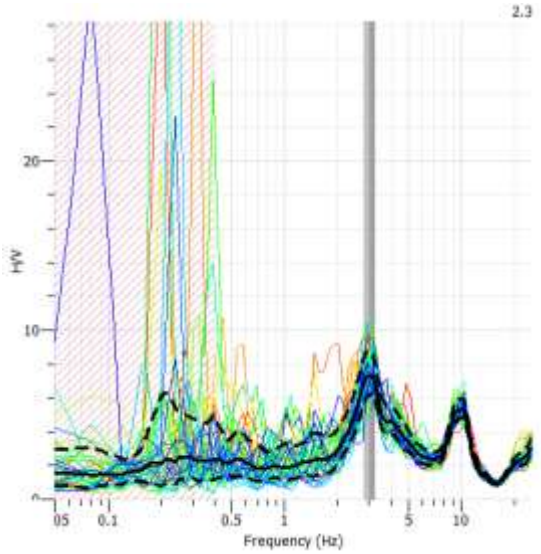


Figura 47. Frecuencia Vs H/V – Ayurá sensor 2.3

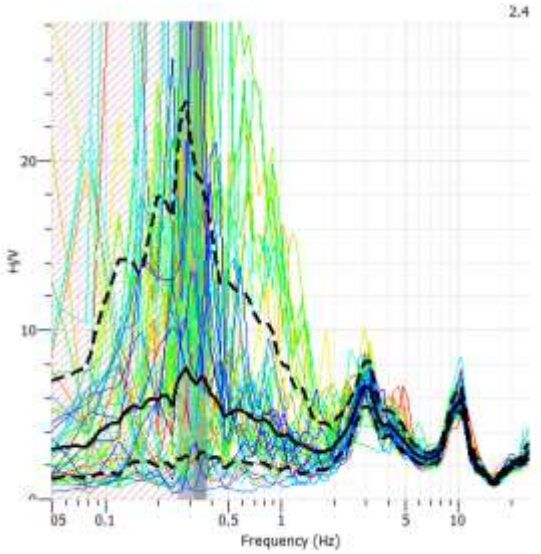


Figura 48. Frecuencia Vs H/V – Ayurá sensor 2.4

F0 3.04+/-0.31 Hz

A0 7.28

F0 3.12+/-0.40 Hz

A0 5.28

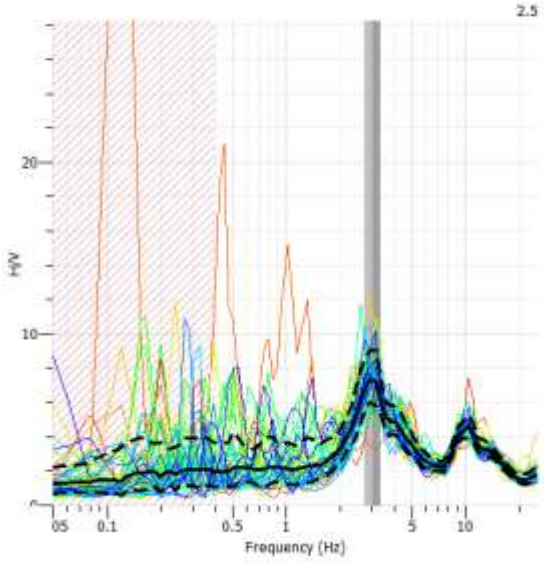


Figura 49. Frecuencia Vs H/V – Ayurá sensor 2.5

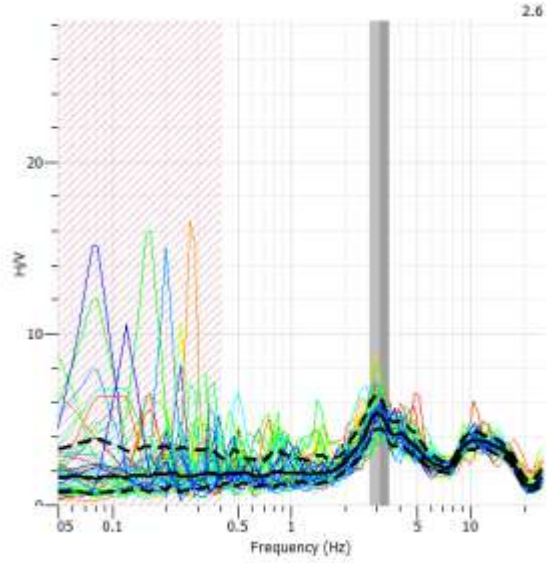


Figura 50. Frecuencia Vs H/V – Ayurá sensor 2.6

1.9.1.1.2 SPAC

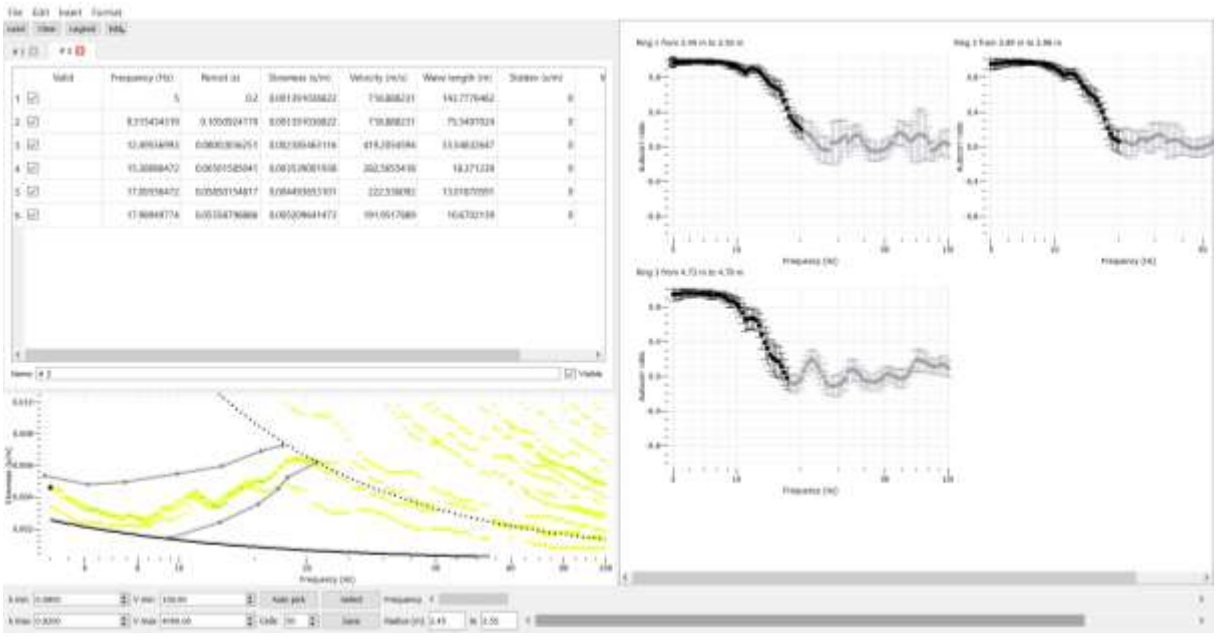


Figura 51. Histogramas de fase y curvas de auto correlación - Ayurá – 2.50 m

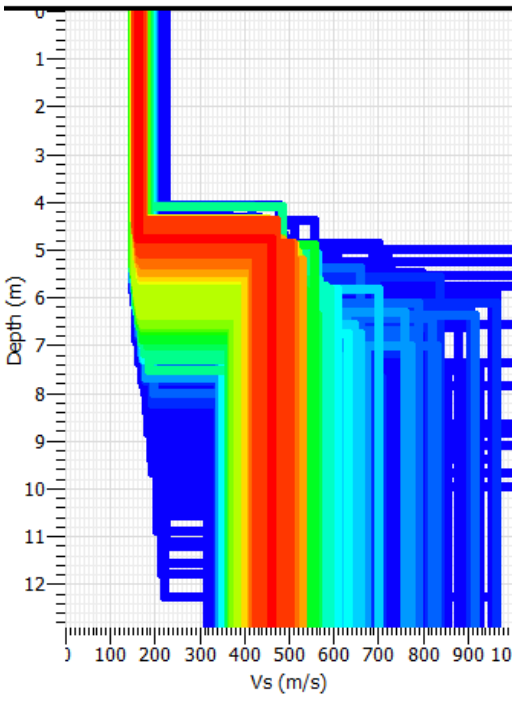


Figura 52. Perfil de velocidad de onda Vs – Ayurá – 2.50 m

1.9.1.2 Arreglo 5.00 m

1.9.1.2.1 H/V

F0 3.12+/-0.29 Hz

A0 6.73

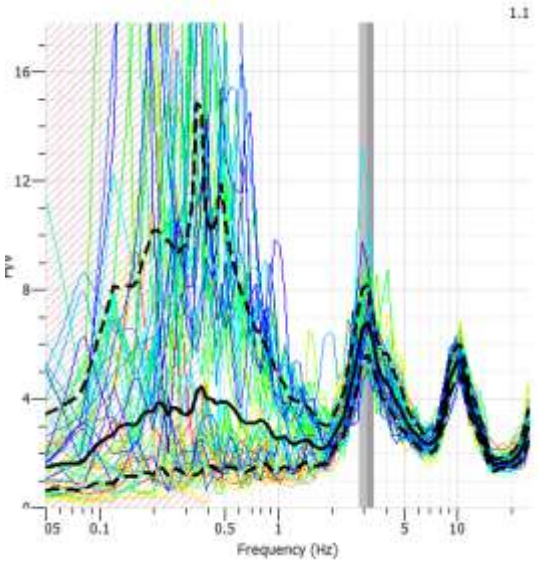


Figura 53. Frecuencia Vs H/V – Ayurá sensor 1.1

F0 3.10+/-0.24 Hz

A0 6.86

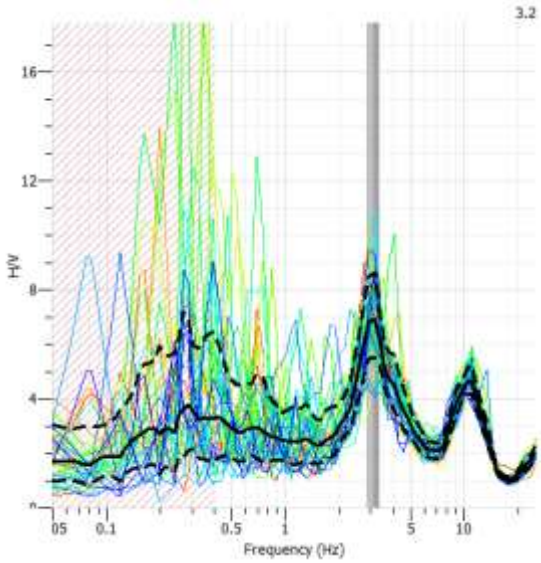


Figura 54. Frecuencia Vs H/V – Ayurá sensor 3.2

F0 3.03+/-0.24 Hz

A0 7.41

F0 3.09+/-0.25 Hz

A0 6.53

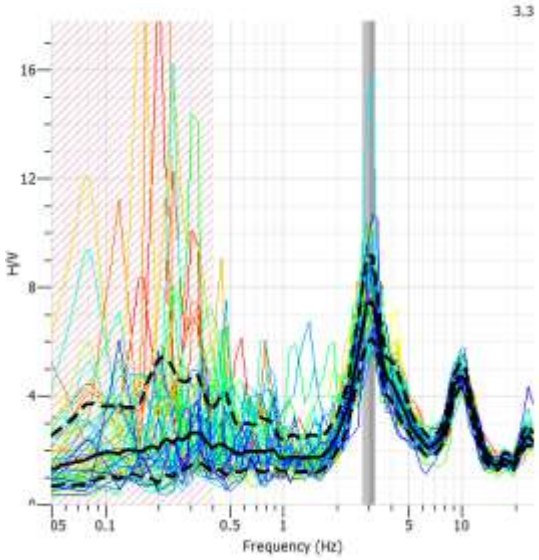


Figura 55. Frecuencia Vs H/V – Ayurá sensor 3.3

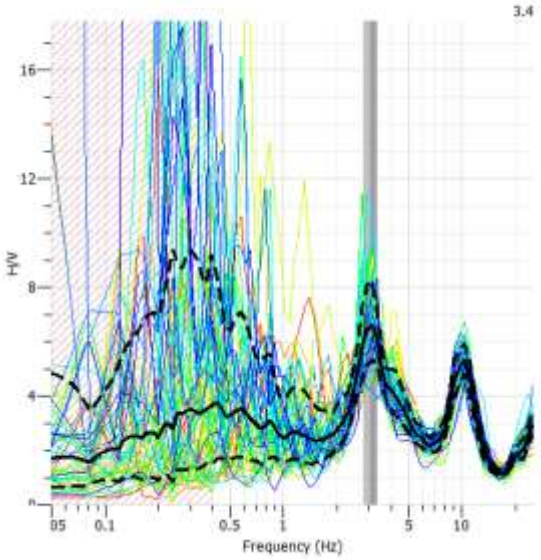


Figura 56. Frecuencia Vs H/V – Ayurá sensor 3.4

F0 3.07+/-0.24

A0 7.42

F0 3.17+/-0.37

A0 5.71

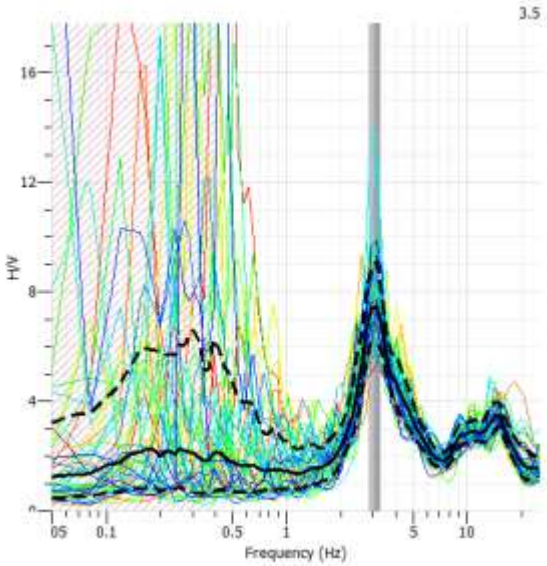


Figura 57. Frecuencia Vs H/V – Ayurá sensor 3.5

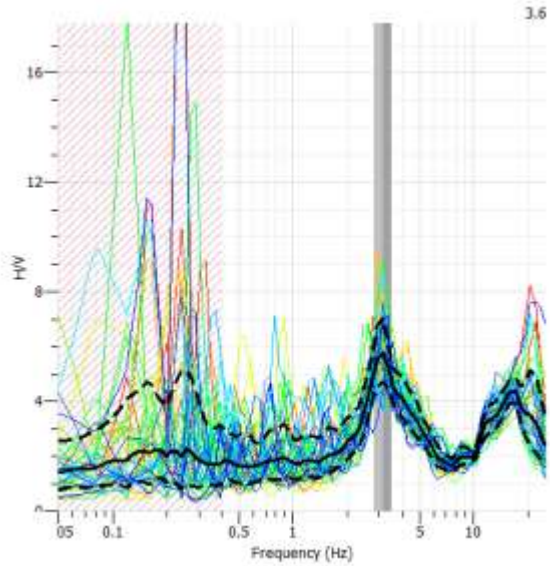


Figura 58. Frecuencia Vs H/V – Ayurá sensor 3.6

1.9.1.2.2 SPAC

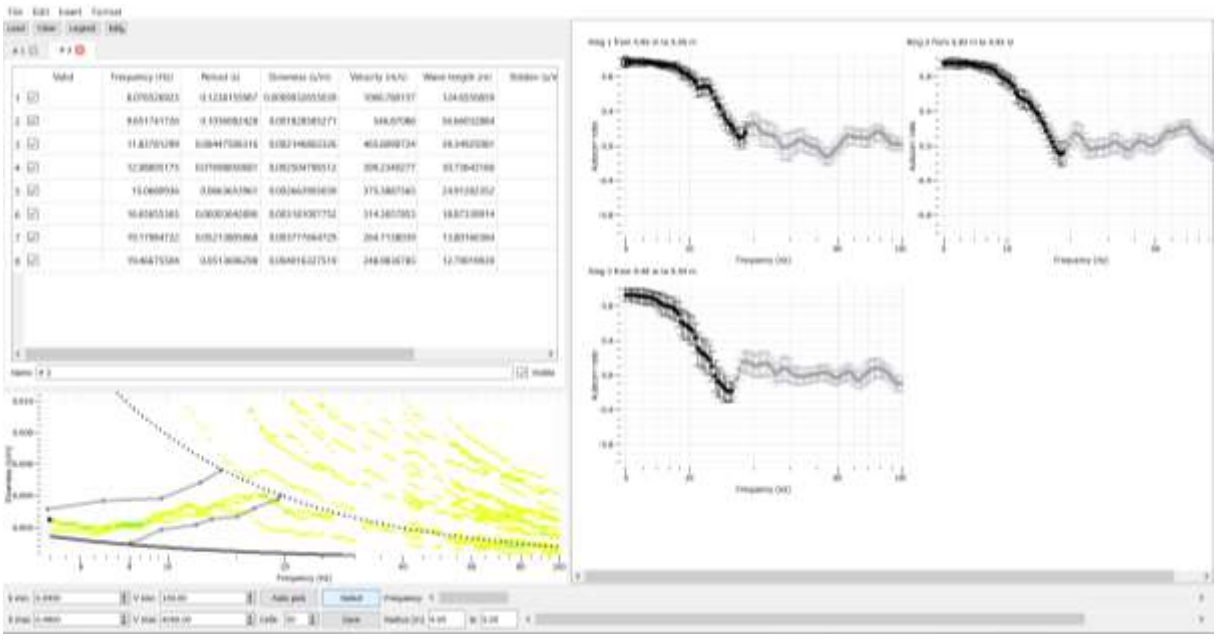


Figura 59. Histogramas de fase y curvas de auto correlación - Ayurá – 5.00 m

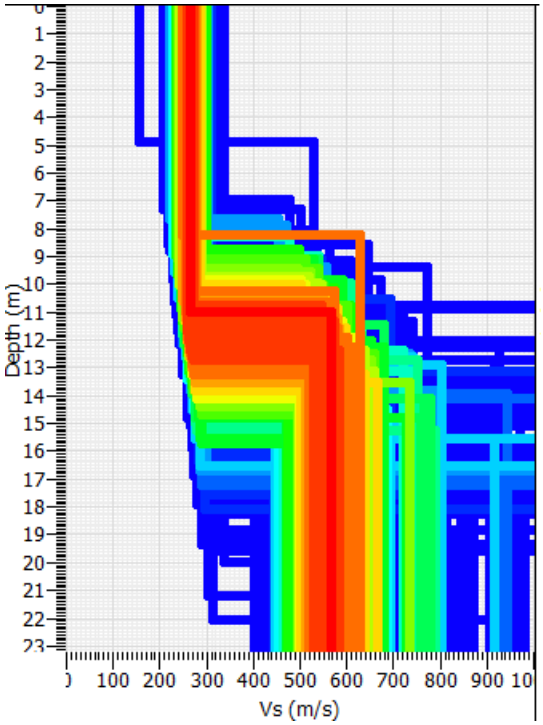


Figura 60. Perfil de velocidad de onda Vs – Ayurá – 5.00 m

1.9.1.3 Arreglo 10.00 m

1.9.1.3.1 H/V

F0 3.01+/-0.30 HZ

A0 6.76

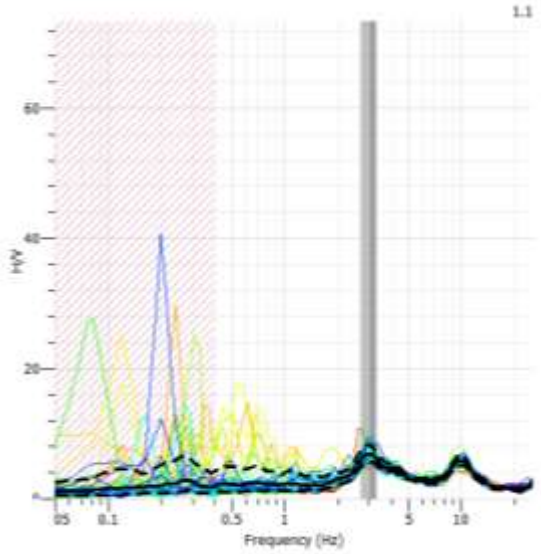


Figura 61. Frecuencia Vs H/V – Ayurá sensor 1.1

F0 2.81+/-0.33 Hz

A0 7.56

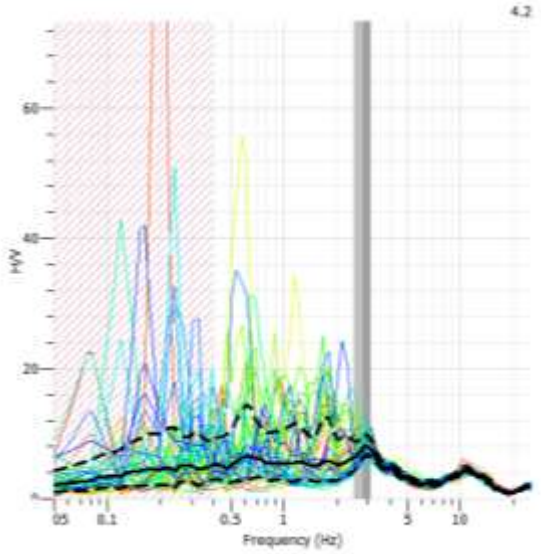


Figura 62. Frecuencia Vs H/V – Ayurá sensor 4.2

F0 3.02+/-0.24 Hz

A0 7.15

F0 0.22+/-0.04 Hz

A0 15.42

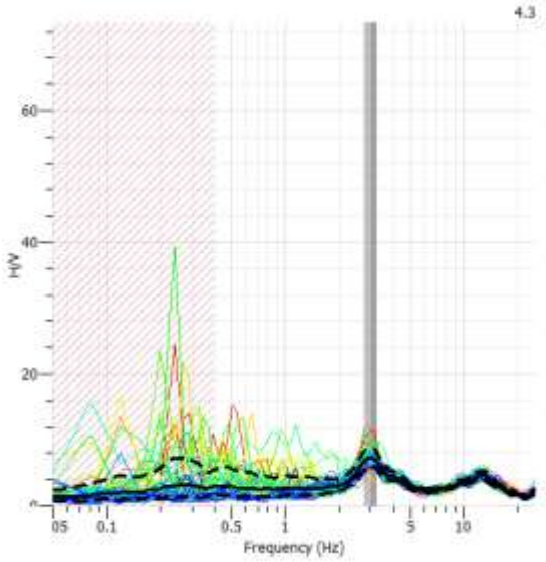


Figura 63. Frecuencia Vs H/V – Ayurá sensor 4.3

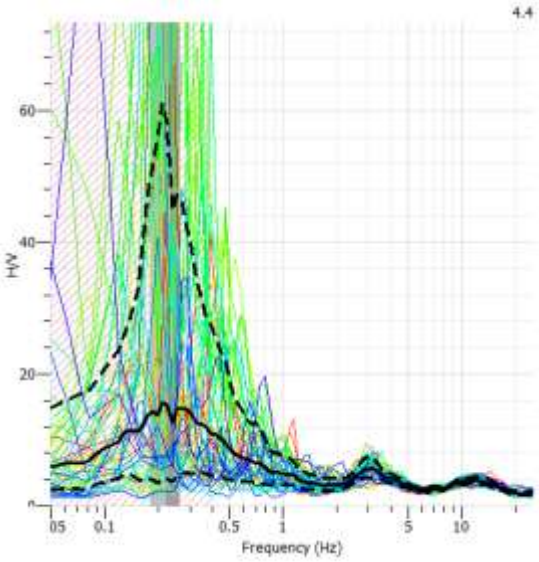


Figura 64. Frecuencia Vs H/V – Ayurá sensor 4.4

F0 3.08+/-0.34 Hz

A0 7.09

F0 0.22+/-0.04 Hz

A0 6.55

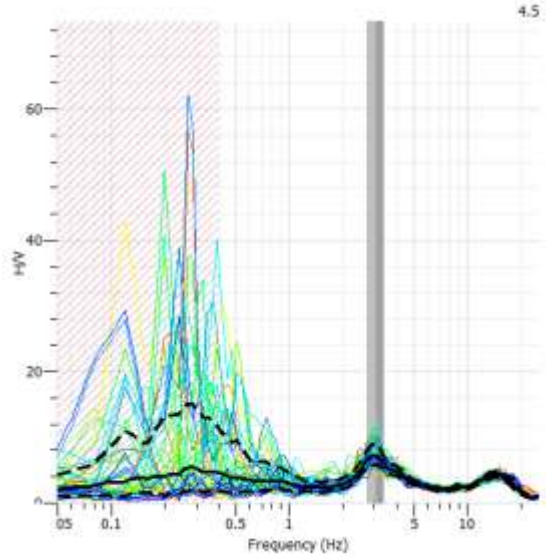


Figura 65. Frecuencia Vs H/V – Ayurá sensor 4.5

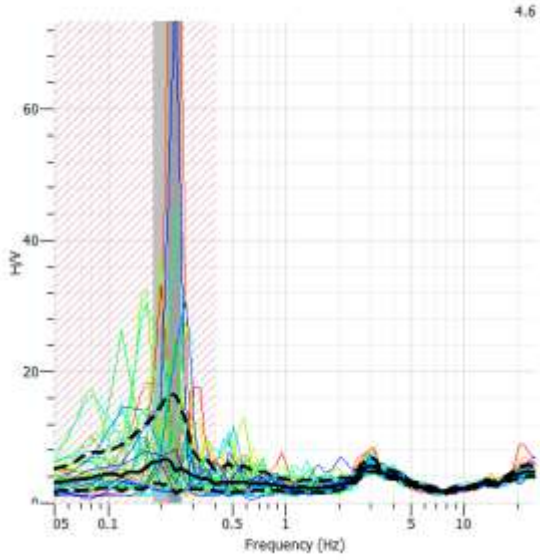


Figura 66. Frecuencia Vs H/V – Ayurá sensor 4.6

1.9.1.3.2 SPAC

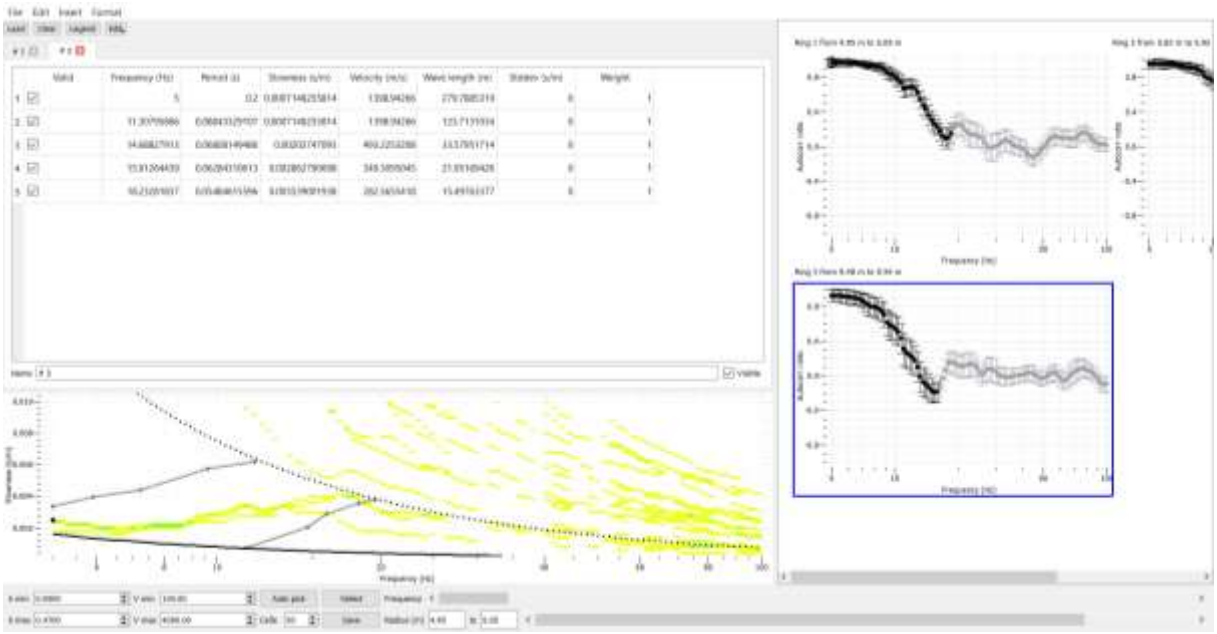


Figura 67. Histogramas de fase y curvas de auto correlación - Ayurá – 10.00 m

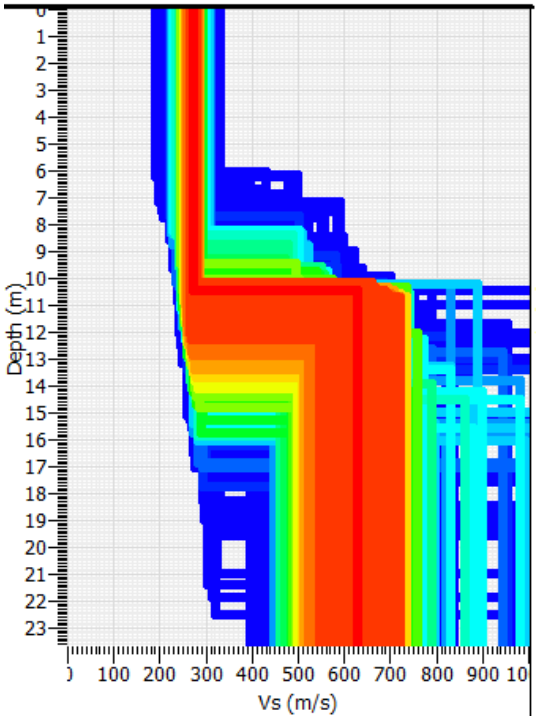


Figura 68. Perfil de velocidad de onda Vs – Ayurá – 10.00 m

1.9.1.4 Arreglo 15.00 m

1.9.1.4.1 H/V

F0 3.05+/-0.28 Hz

A0 6.68

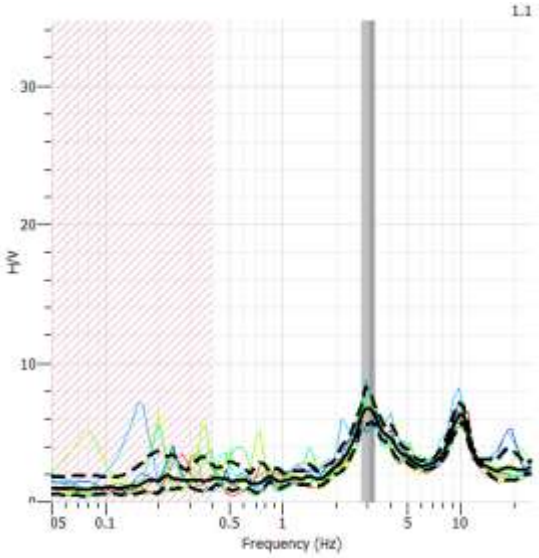


Figura 69. Frecuencia Vs H/V – Ayurá sensor 1.1

F0 3.08+/-0.23 Hz

A0 6.72

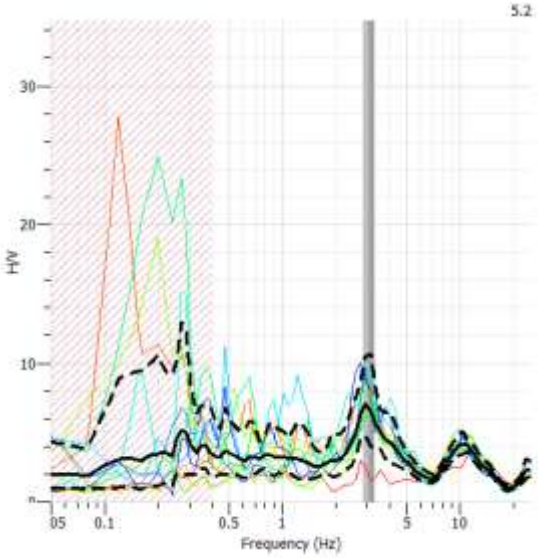


Figura 70. Frecuencia Vs H/V – Ayurá sensor 5.2

F0 3.04+/-0.13 Hz

A0 7.77

F0 0.27+/-0.05 Hz

A0 11.86

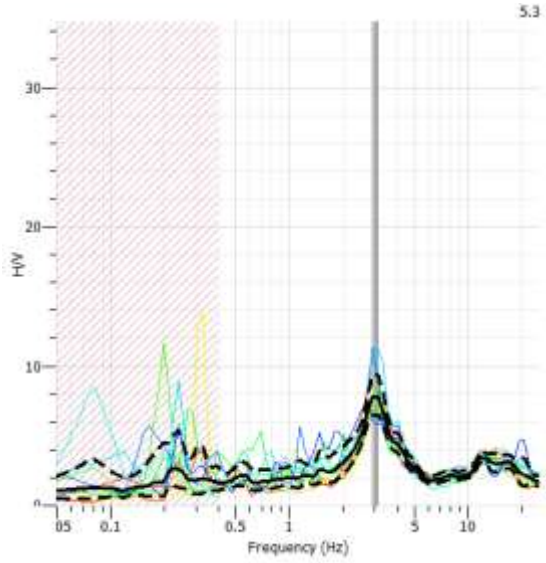


Figura 71. Frecuencia Vs H/V – Ayurá sensor 5.3

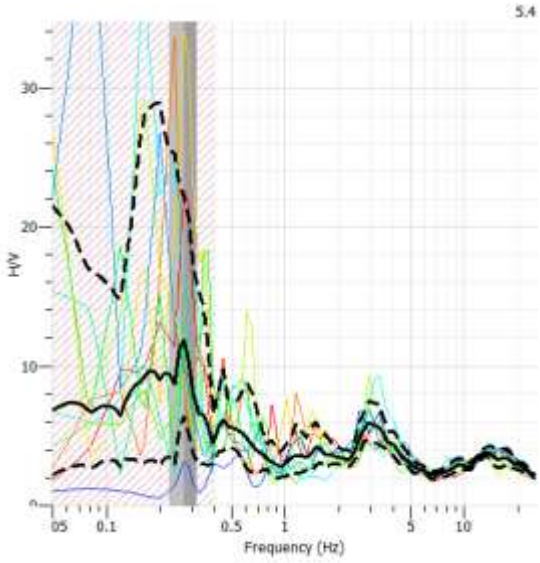


Figura 72. Frecuencia Vs H/V – Ayurá sensor 5.4

F0 0.25+/-0.06

A0 8.17

F0 3.13+/-0.24

A0 5.66

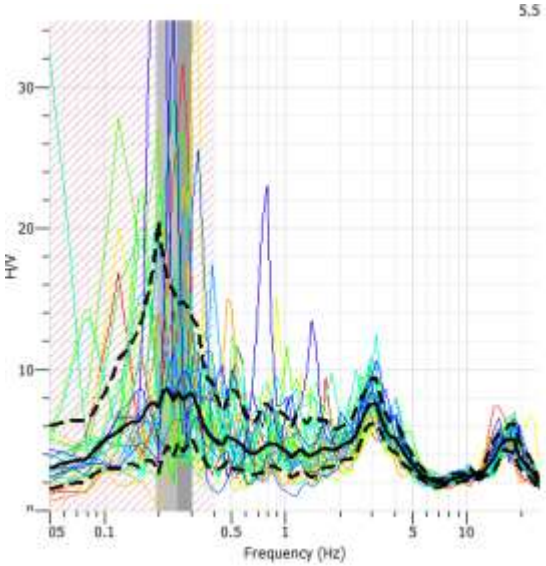


Figura 73. Frecuencia Vs H/V – Ayurá sensor 5.5

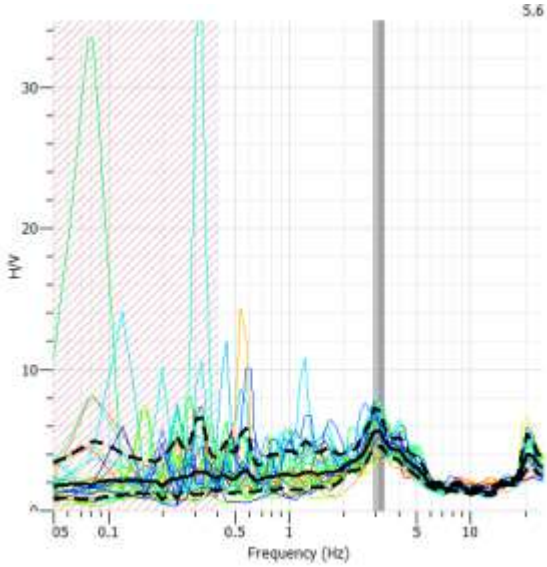


Figura 74. Frecuencia Vs H/V – Ayurá sensor 5.6

1.9.1.4.2 SPAC

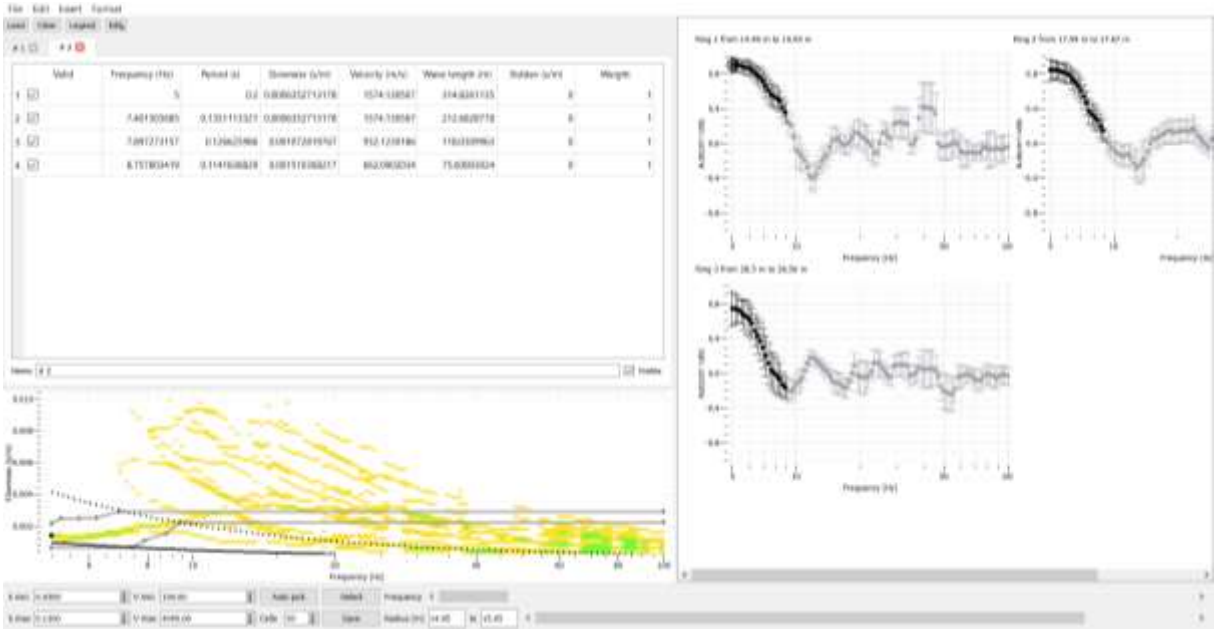


Figura 75. Histogramas de fase y curvas de auto correlación - Ayurá – 15.00 m

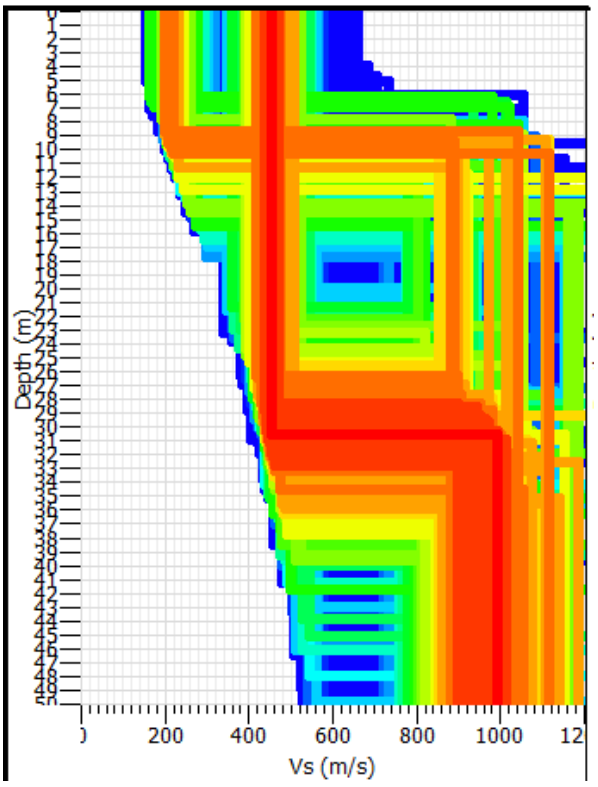


Figura 76. Perfil de velocidad de onda Vs – Ayurá – 15.00 m

1.9.1.5 Comprobación del SPAC con el H/V

Tabla 2. Datos de entrada para la comprobación del SPAC – Ayurá

BETA(m/s)	RO(t/m^3)	H(m)	CSI(%)
160.0	1.80	4.70	1.0
270.0	1.80	11.00	1.0
500.0	1.80	30.00	1.0

1.9.2 La Estrella

1.9.2.1 Arreglo 2.50 m

1.9.2.1.1 H/V

F0 1.52+/-0.19 Hz

A0 2.79

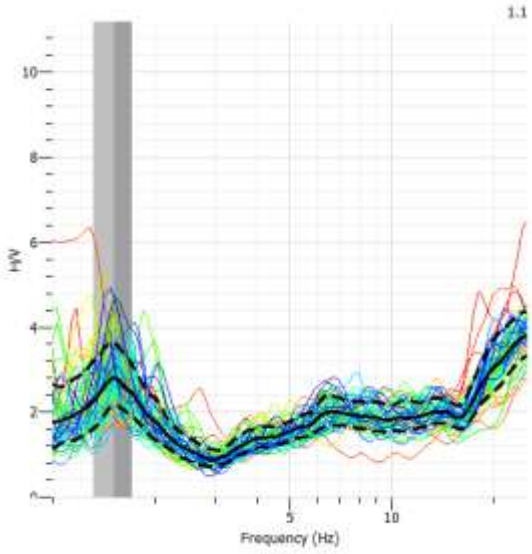


Figura 77. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 1.1

F0 1.46+/-0.22 Hz

A0 3.43

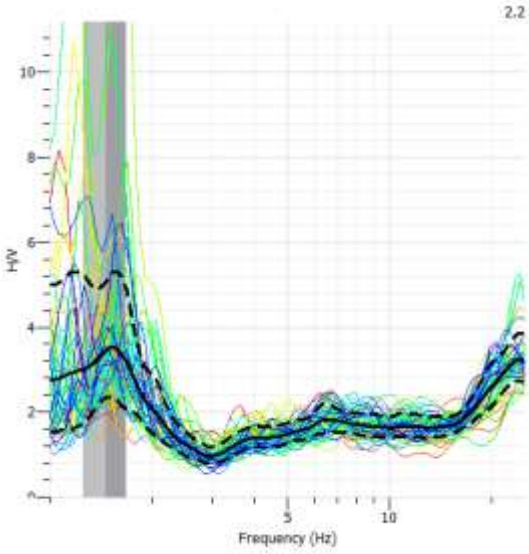


Figura 78. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 2.2

F0 1.54+/-0.21 Hz

A0 2.72

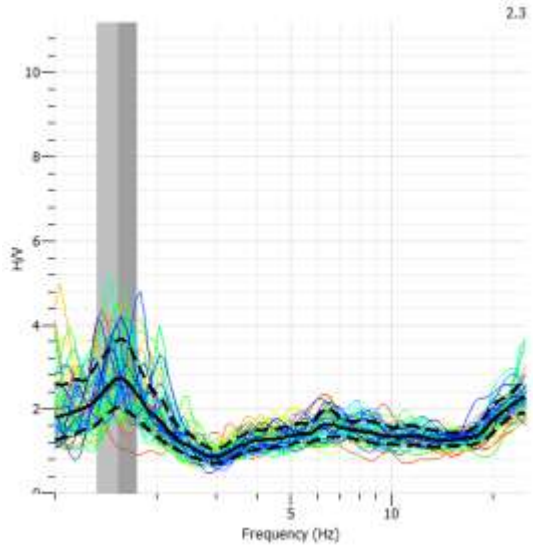


Figura 79. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 2.3

F0 1.27+/-0.16 Hz

A0 4.97

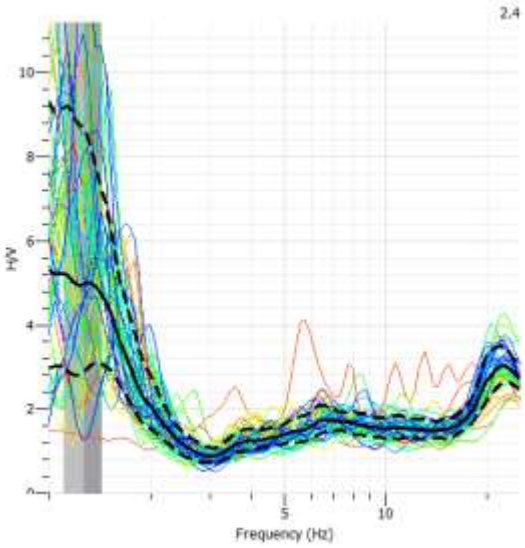
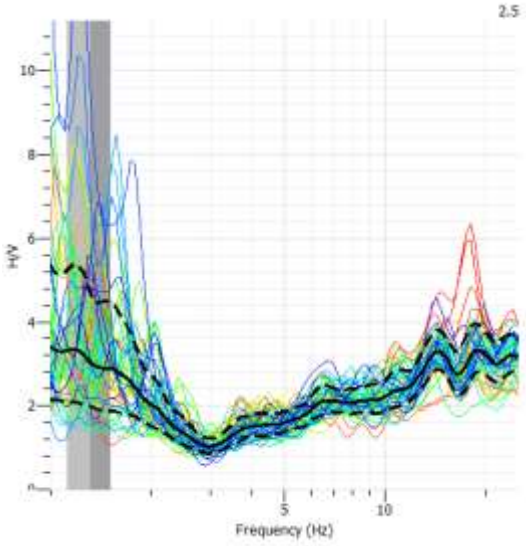


Figura 80. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 2.4

F0 1.32+/-0.20 Hz

A0 3.03



F0 21.59+/-1.57 Hz

A0 3.34

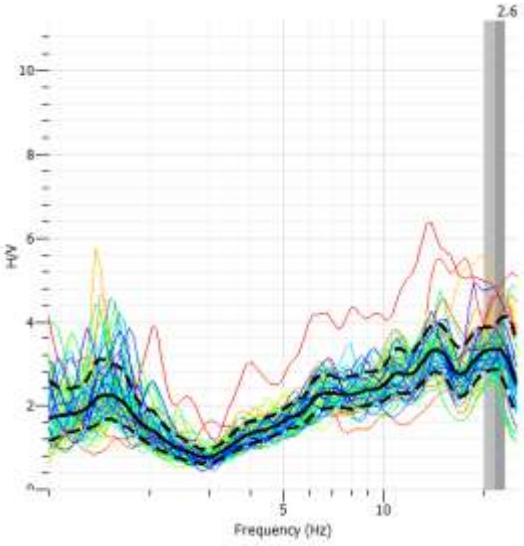


Figura 81. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 2.5

Figura 82. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 2.6

1.9.2.1.2 SPAC

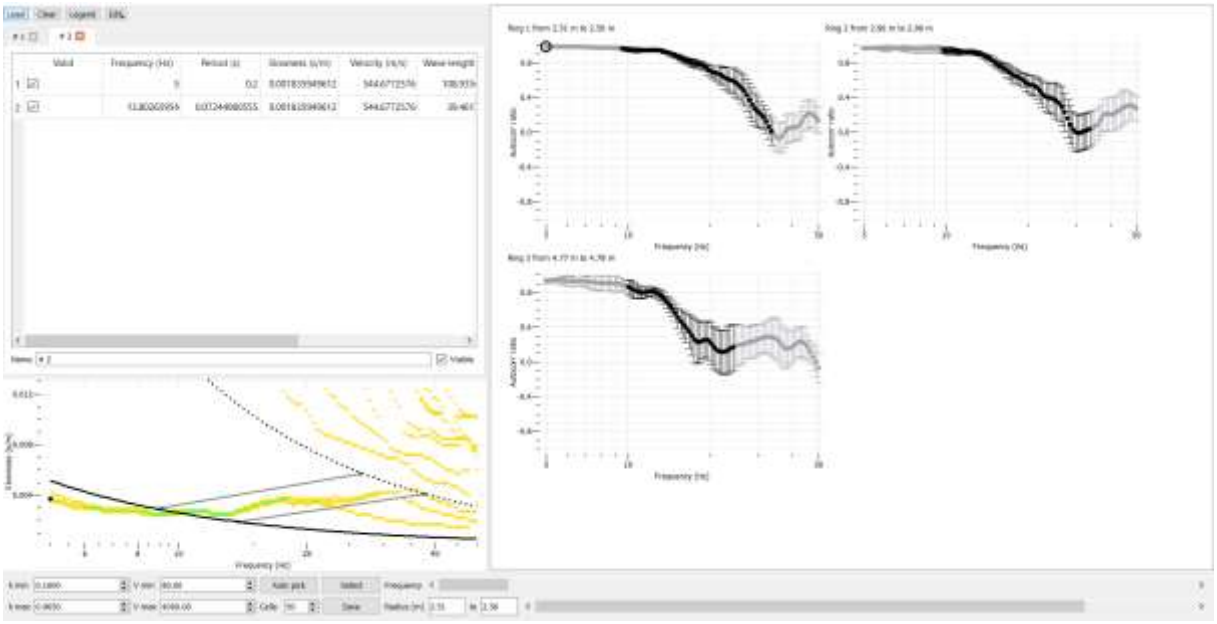


Figura 83. Histogramas de fase y curvas de auto correlación – La Estrella – 2.50 m

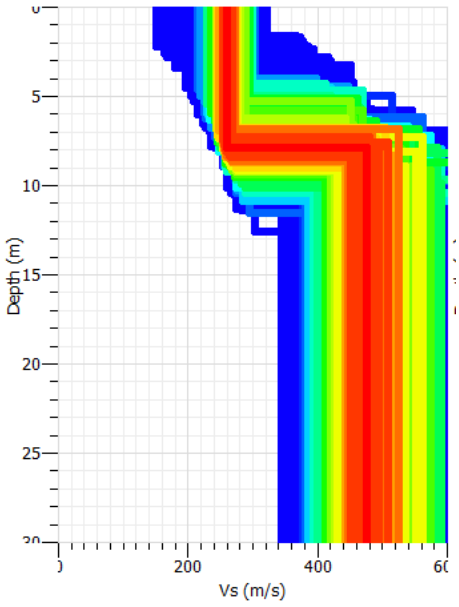


Figura 84. Perfil de velocidad de onda Vs – La Estrella – 2.50 m

1.9.2.2 Arreglo 5.00 m

1.9.2.2.1 H/V

F0 1.57+/-0.26 Hz

A0 2.72

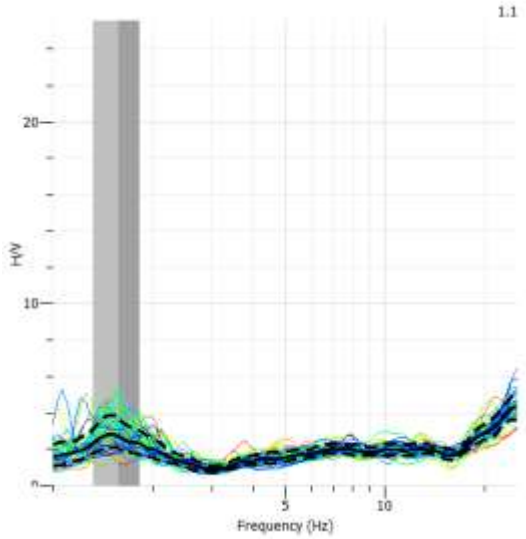


Figura 85. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 1.1

F0 1.43+/-0.23 Hz

A0 5.51

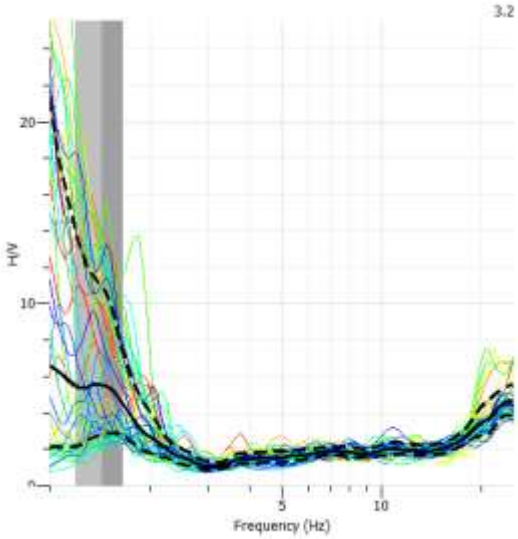


Figura 86. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 3.2

F0 1.46+/-0.26 Hz

A0 2.80

F0 1.28+/-0.16 Hz

A0 4.63

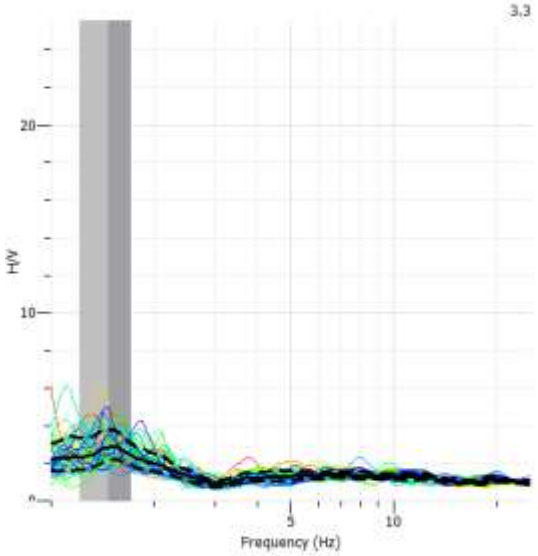


Figura 87. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 3.3

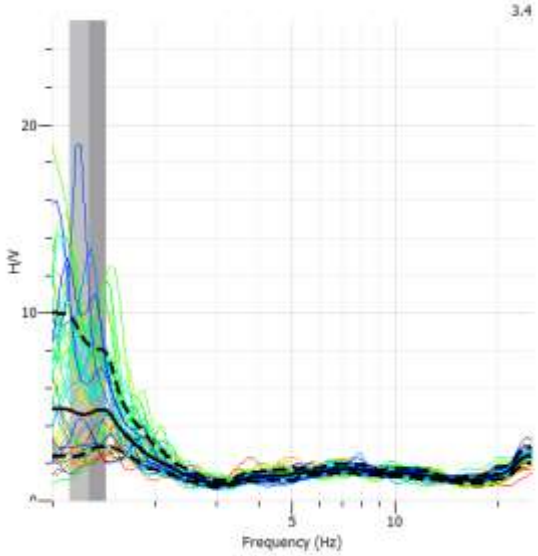


Figura 88. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 3.4

F0 14.73+/-1.02 Hz

A0 5.29

F0 13.46+/-1.91 Hz

A0 4.55

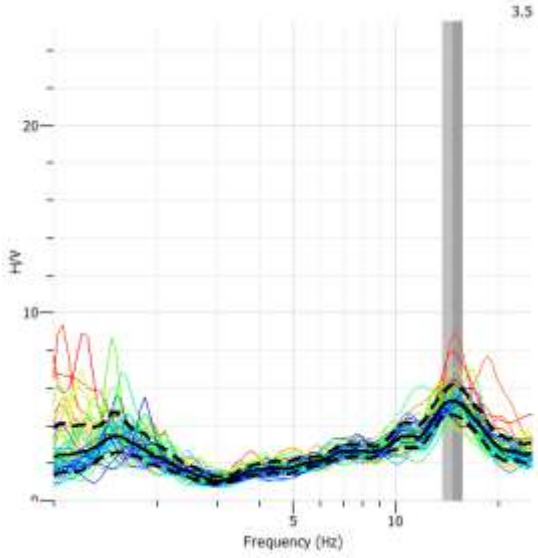


Figura 89. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 3.5

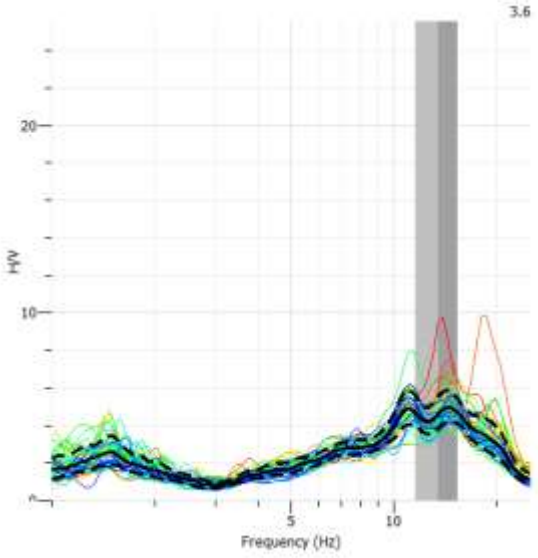


Figura 90. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 3.6

1.9.2.2.2 SPAC

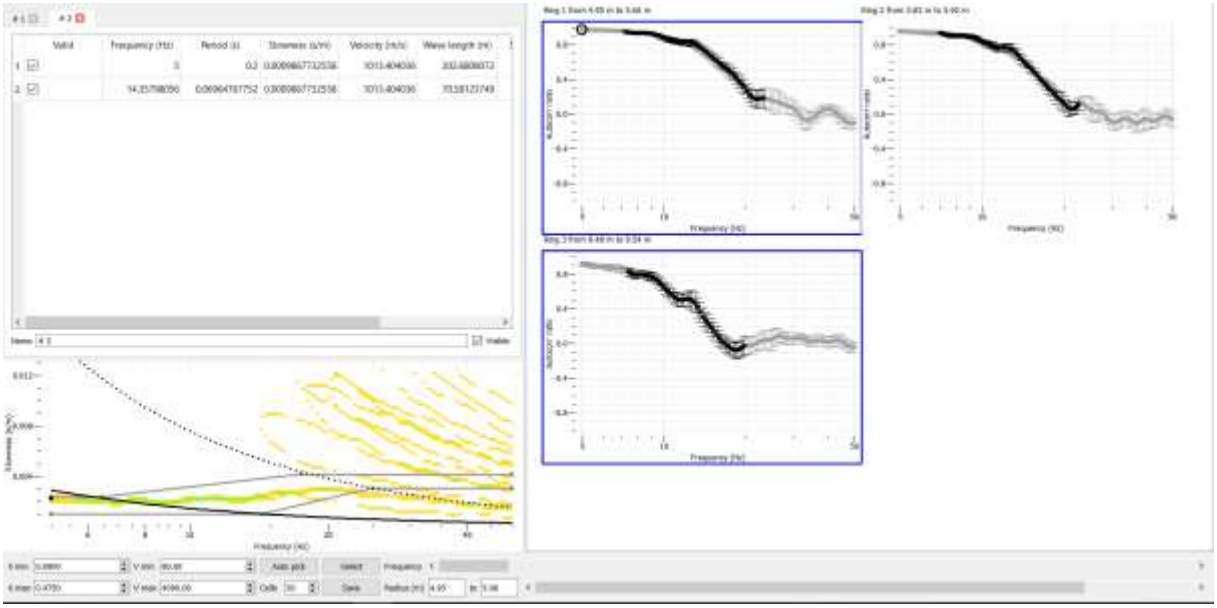


Figura 91. Histogramas de fase y curvas de auto correlación – La Estrella – 5.00 m

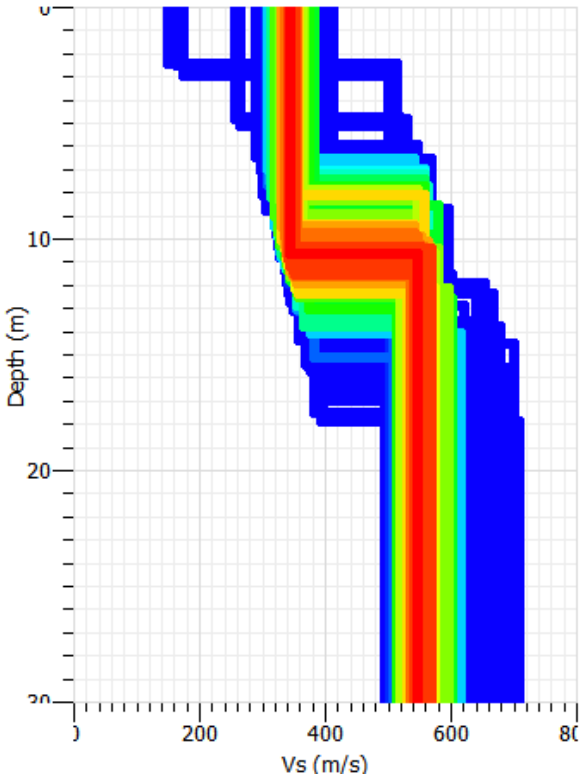


Figura 92. Perfil de velocidad de onda Vs – La Estrella – 5.00 m

1.9.2.3 Arreglo 10.00 m

1.9.2.3.1 H/V

F0	23.33+/-1.53 Hz	F0	18.31+/-1.30 Hz
A0	4.14	A0	4.47

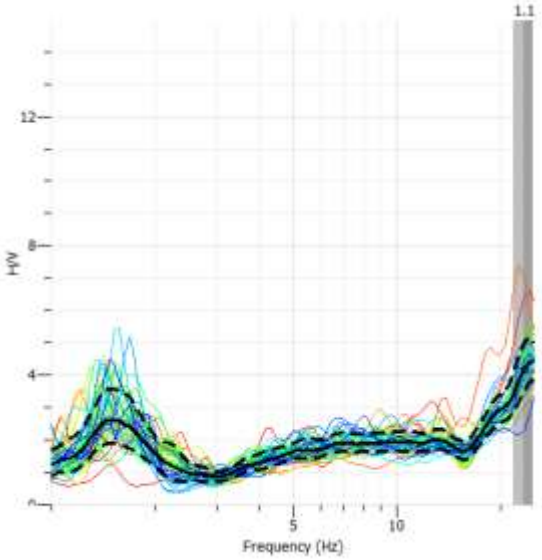


Figura 93. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 1.1

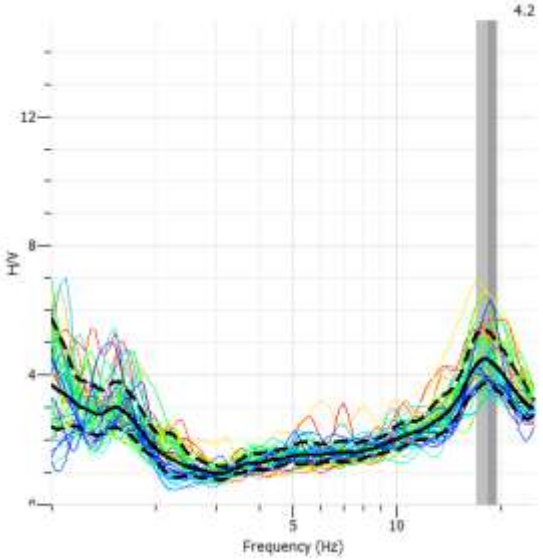


Figura 94. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 4.2

F0 1.60+/-0.18 Hz

A0 2.47

F0 7.03+/-1.33 Hz

A0 1.63

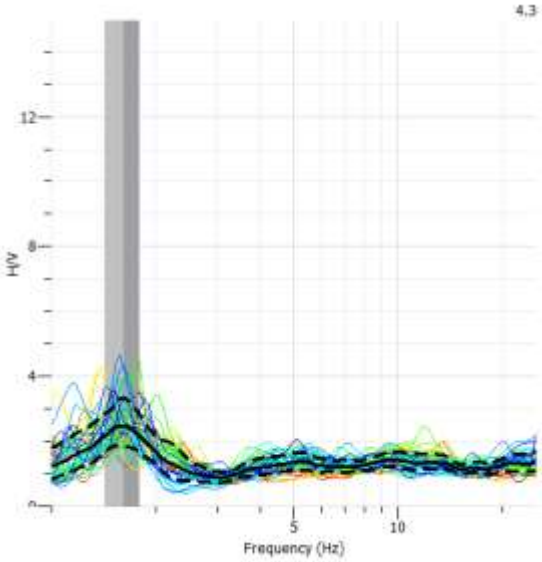


Figura 95. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 4.3

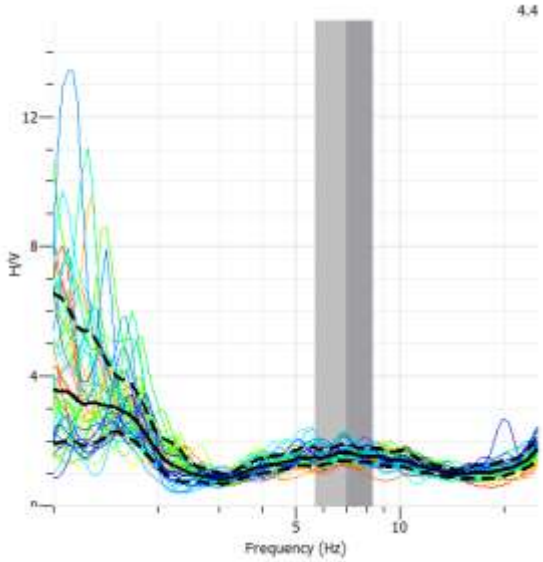


Figura 96. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 4.4

F0 11.61+/-0.93 Hz

A0 4.95

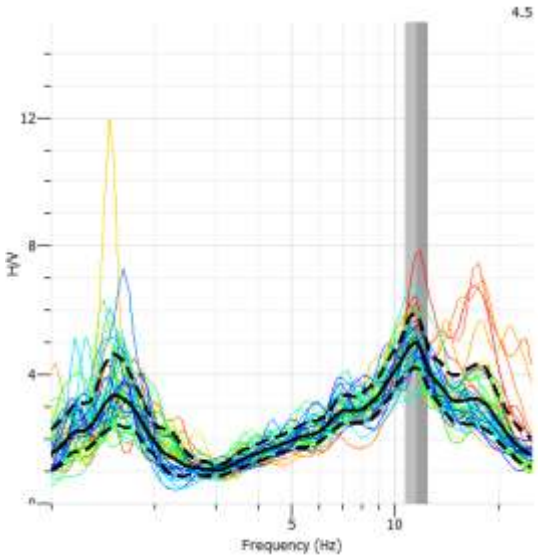


Figura 97. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 4.5

F0 12.47+/-0.68 Hz

A0 10.45

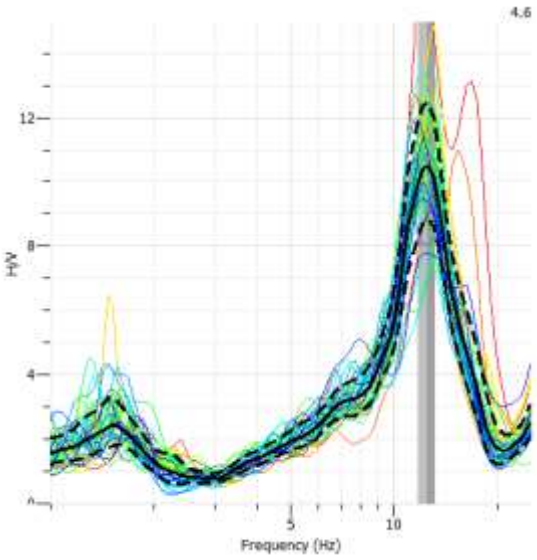


Figura 98. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 4.6

1.9.2.3.2 SPAC

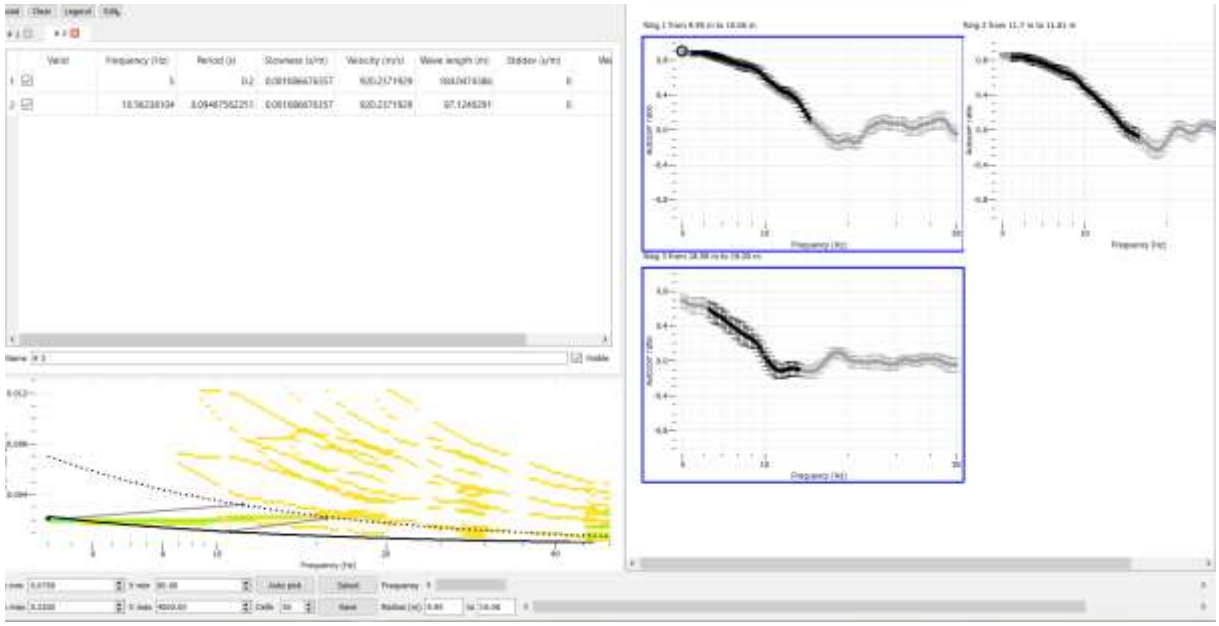


Figura 99. Histogramas de fase y curvas de auto correlación – La Estrella – 10.00 m

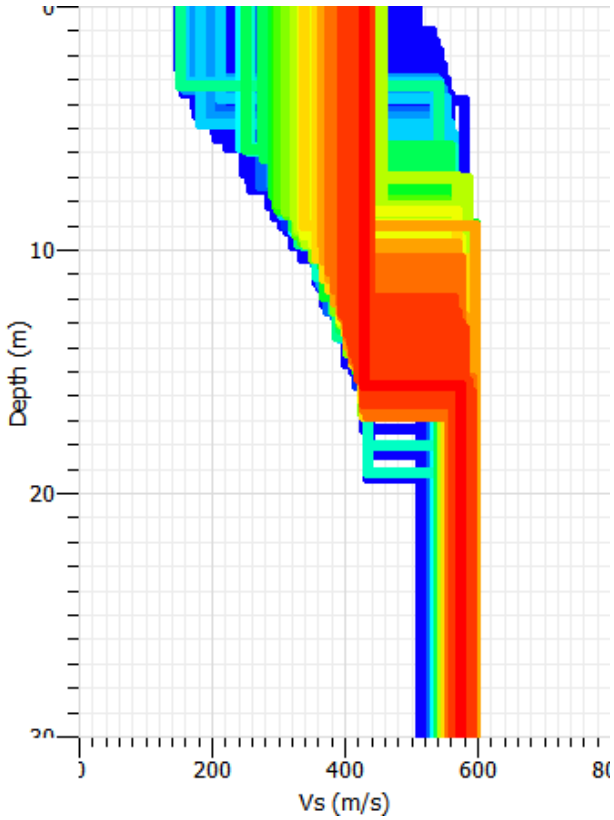


Figura 100. Perfil de velocidad de onda Vs – La Estrella – 10.00 m

1.9.2.4 Arreglo 15.00 m

1.9.2.4.1 H/V

F0	1.57+/-0.20 Hz	F0	17.95+/-1.45 Hz
A0	2.75	A0	4.75

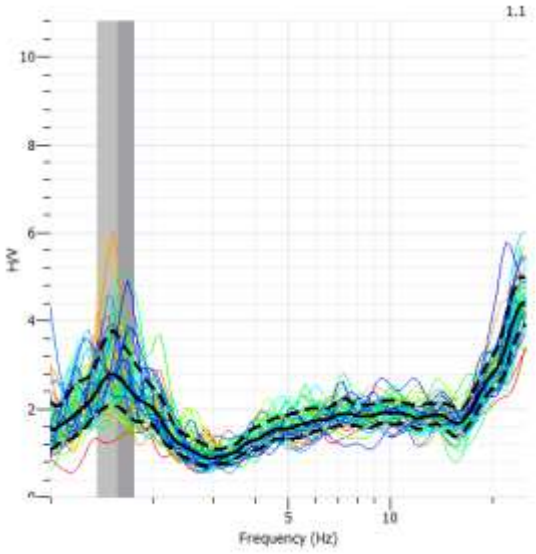


Figura 101. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 1.1

F0 1.53+/-0.24 Hz

A0 2.60

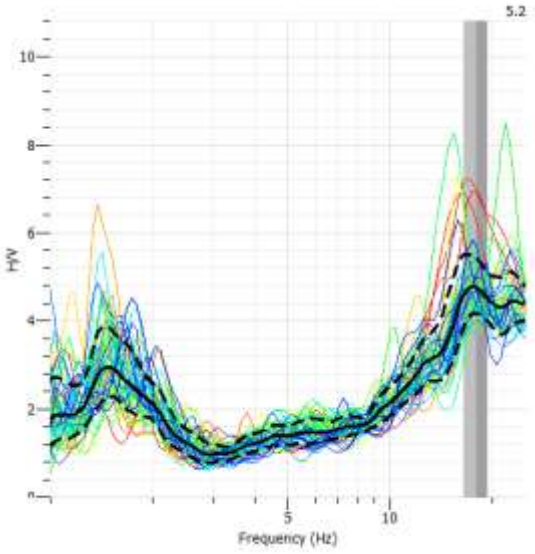


Figura 102. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 5.2

F0 1.24+/-0.16 Hz

A0 5.52

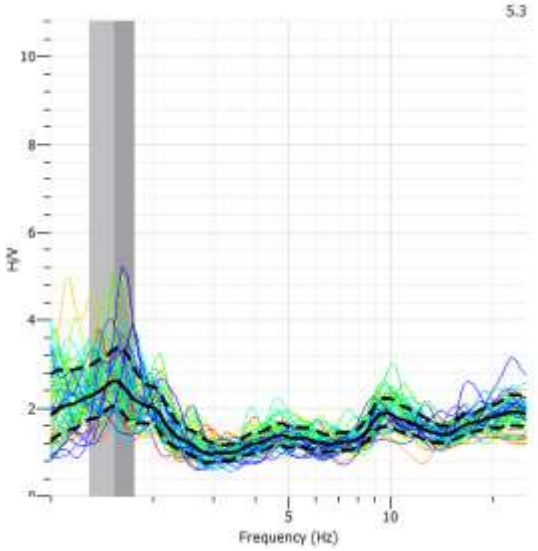


Figura 103. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 5.3

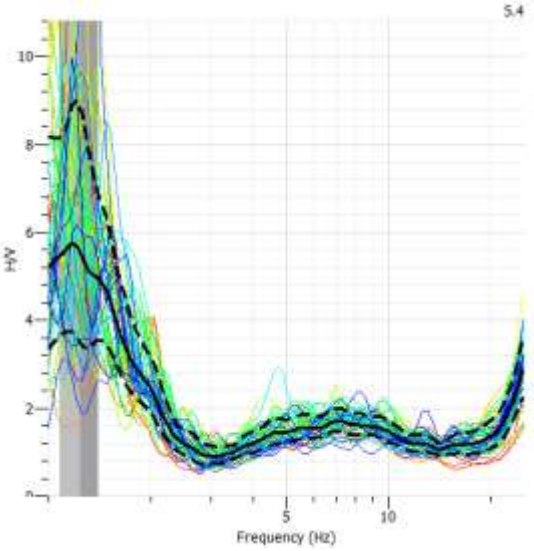


Figura 104. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 5.3

F0 11.71+/-0.39 Hz

A0 7.32

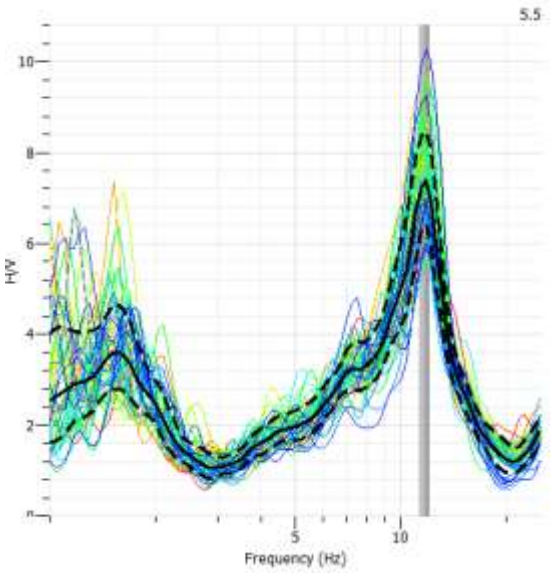


Figura 105. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 5.5

F0 19.21+/-1.22 Hz

A0 3.06

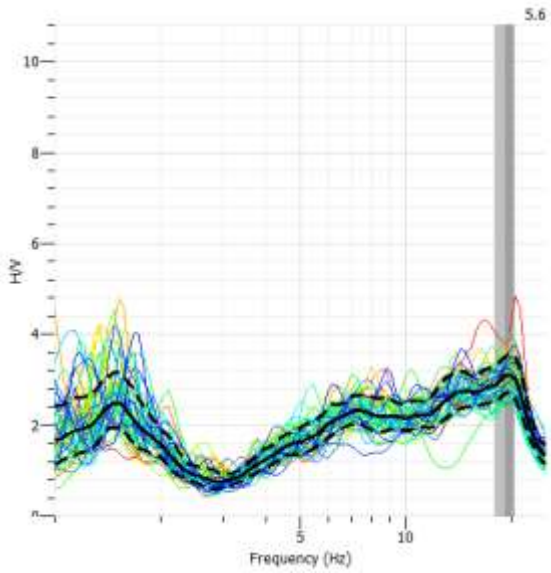


Figura 106. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 5.6

1.9.2.4.2 SPAC

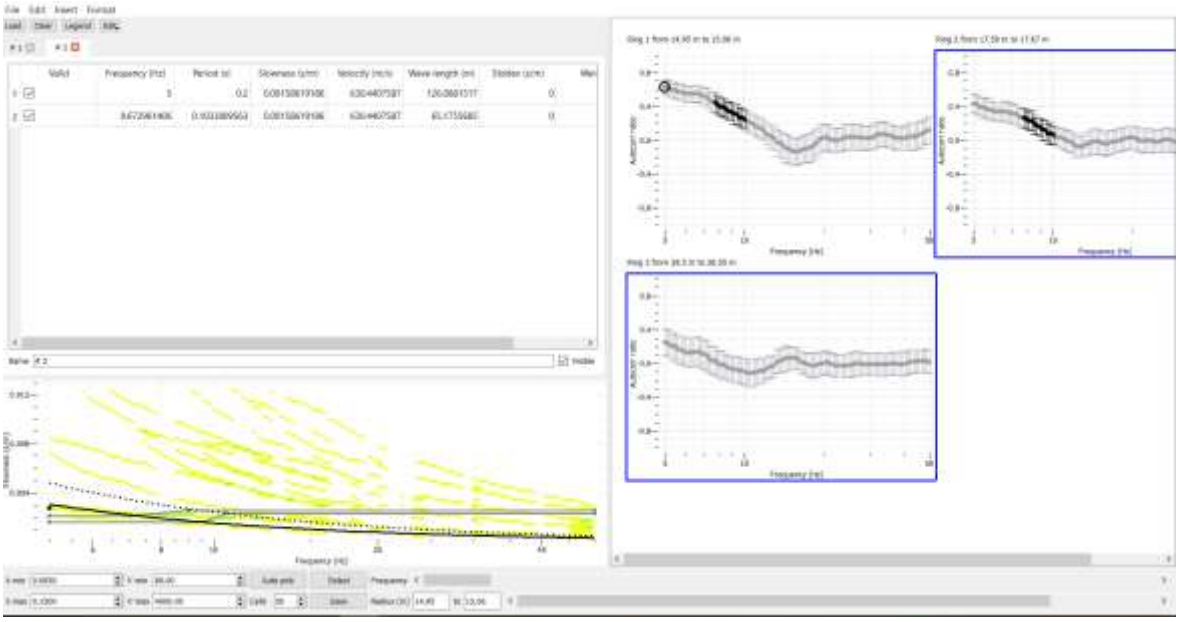


Figura 107. Histogramas de fase y curvas de auto correlación – La Estrella – 15.00 m

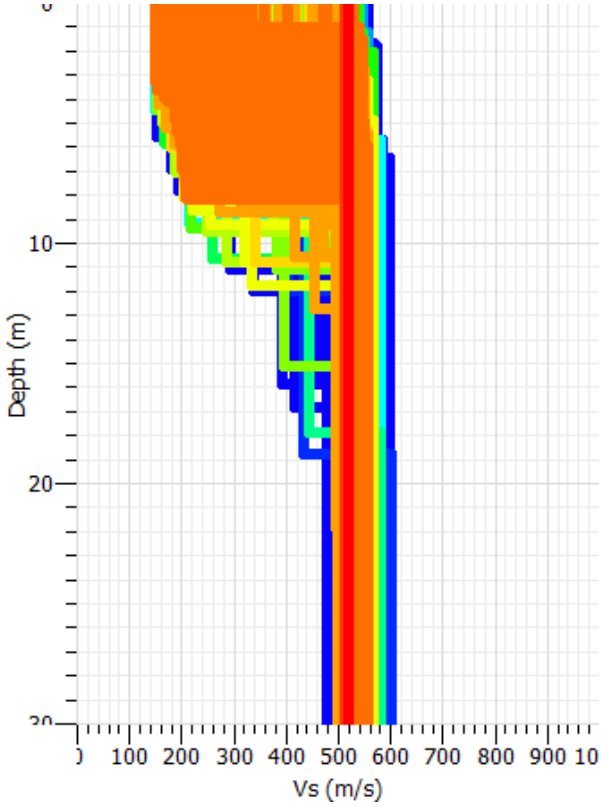


Figura 108. Perfil de velocidad de onda Vs – La Estrella – 15.00 m

1.9.2.5 Arreglo 20.00 m

1.9.2.5.1 H/V

F0 1.53+/-0.22 Hz

A0 2.51

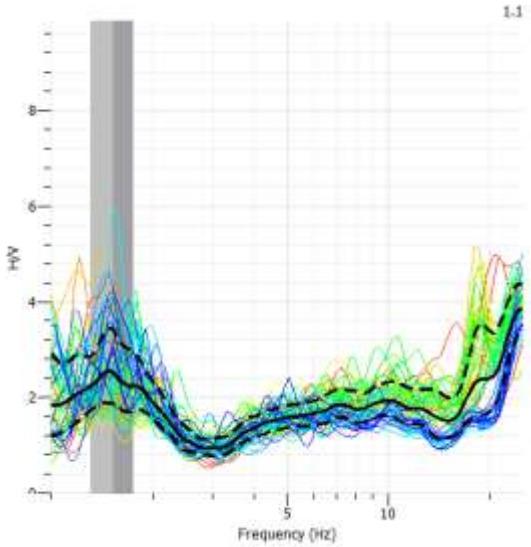


Figura 109. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 1.1

F0 15.28+/-1.19 Hz

A0 5.41

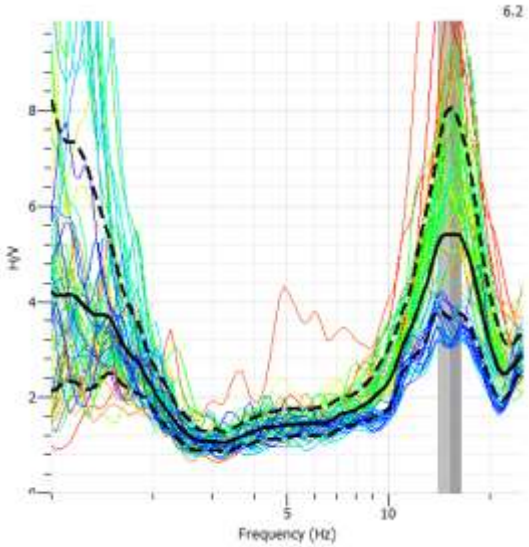


Figura 110. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 6.2

F0 10.32+/-0.74 Hz

A0 3.60

F0 1.52+/-0.21 Hz

A0 2.57

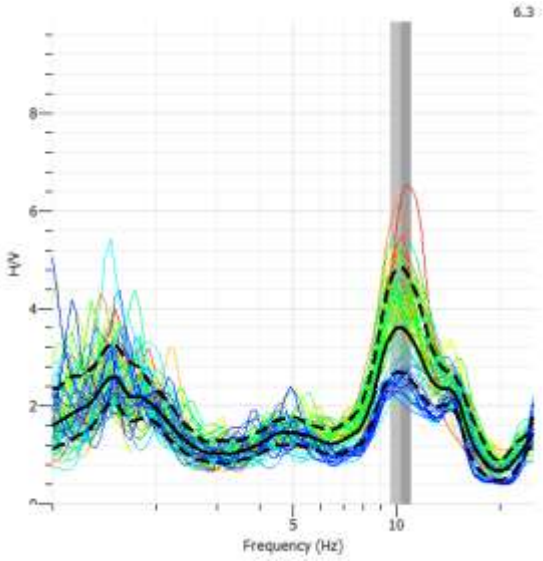


Figura 111. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 6.3

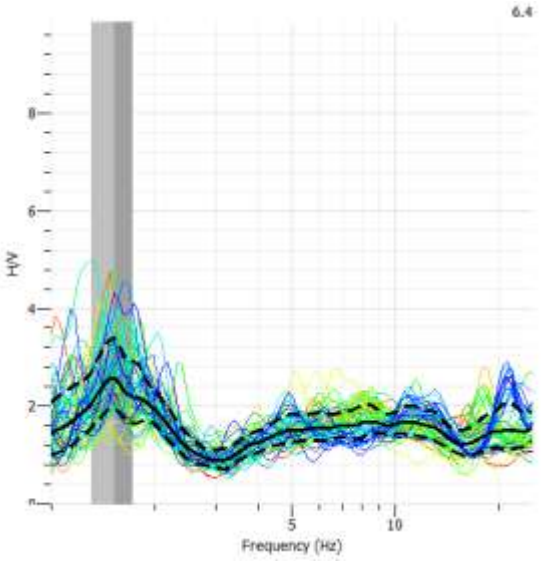


Figura 112. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 6.4

F0 11.42+/-0.95 Hz

A0 3.89

F0 23.18+/-1.16 Hz

A0 4.11

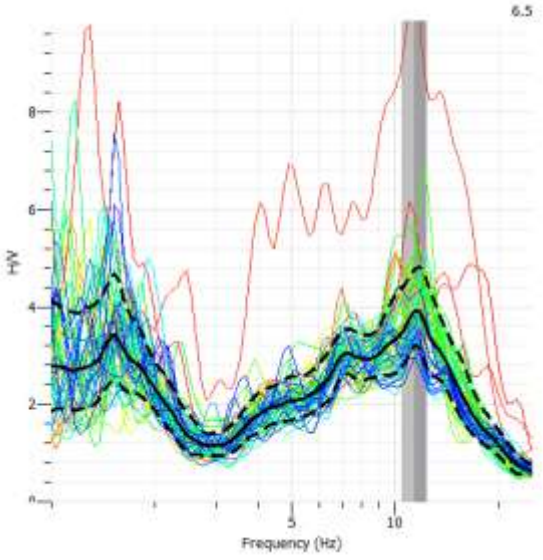


Figura 113. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 6.5

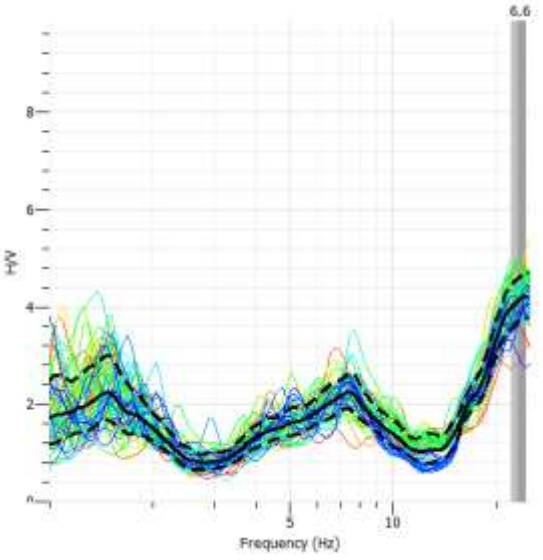


Figura 114. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 6.6

1.9.2.5.2 SPAC

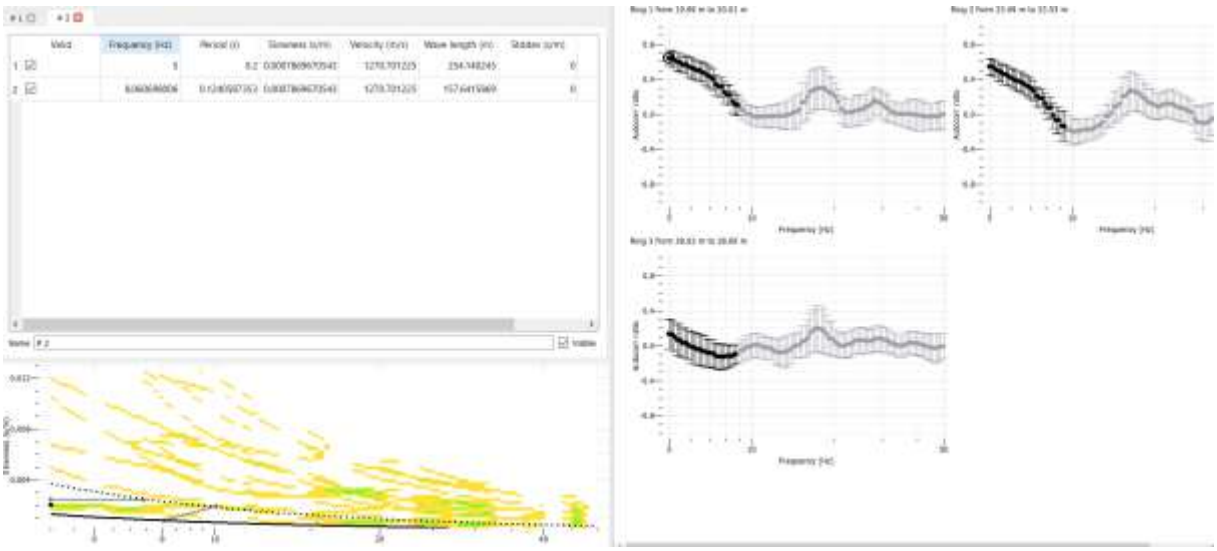


Figura 115. Histogramas de fase y curvas de auto correlación – La Estrella – 20.00 m

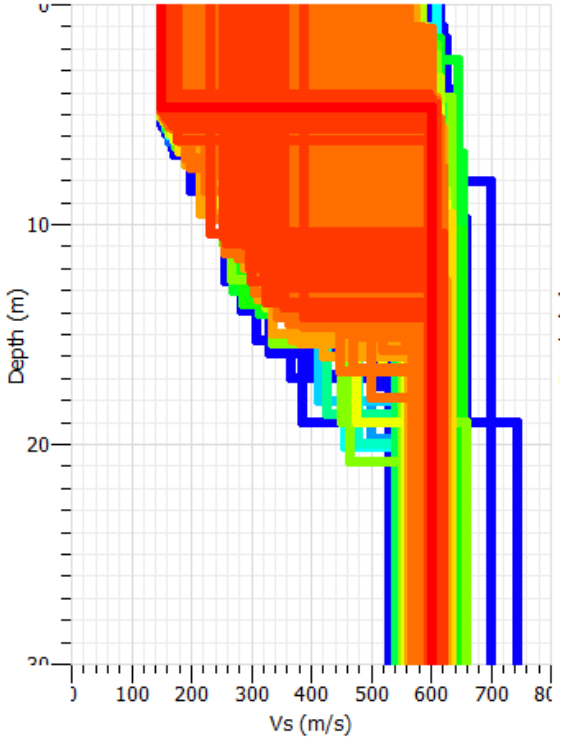


Figura 116. Perfil de velocidad de onda Vs – La Estrella – 20.00 m

1.9.2.6 Arreglo 25.00 m

1.9.2.6.1 H/V

F0 1.44+/-0.21 Hz

A0 2.97

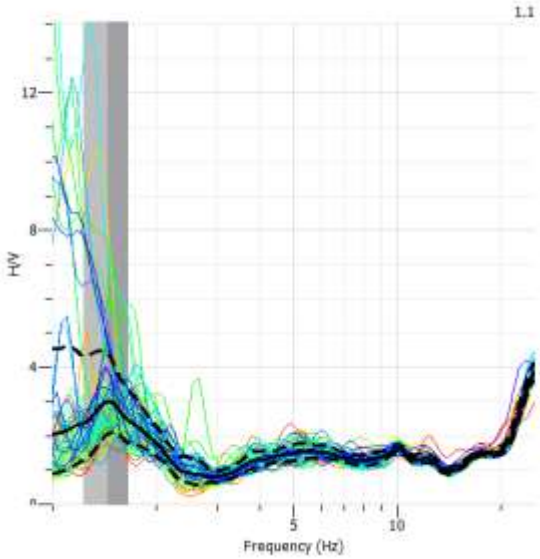


Figura 117. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 1.1

F0 21.25+/-0.24 Hz

A0 3.77

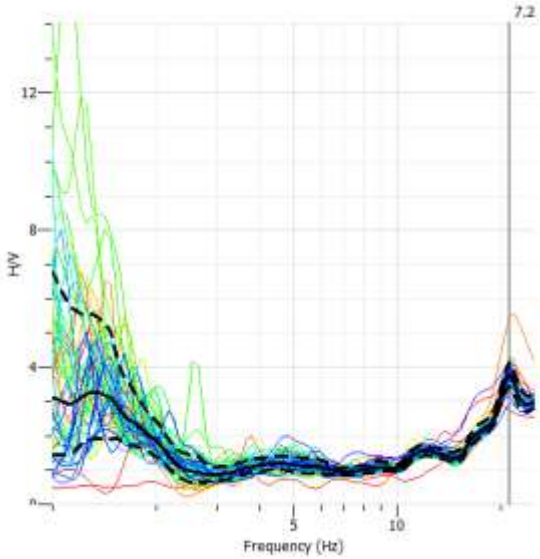


Figura 118. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 7.2

F0 13.51+/-0.11 Hz

A0 2.61

F0 19.37+/-0.27 Hz

A0 5.10

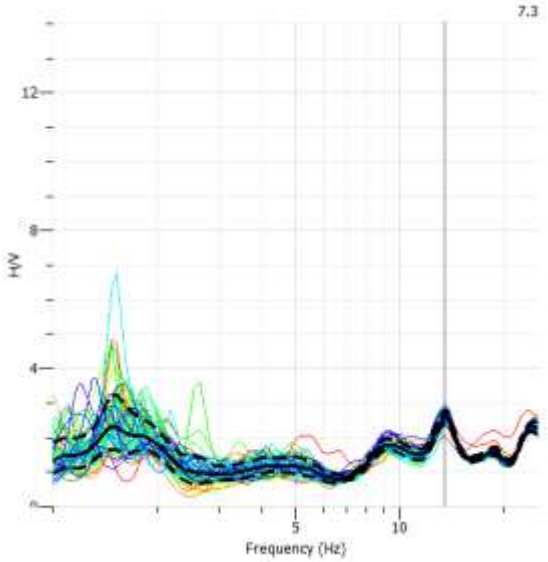


Figura 119. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 7.3

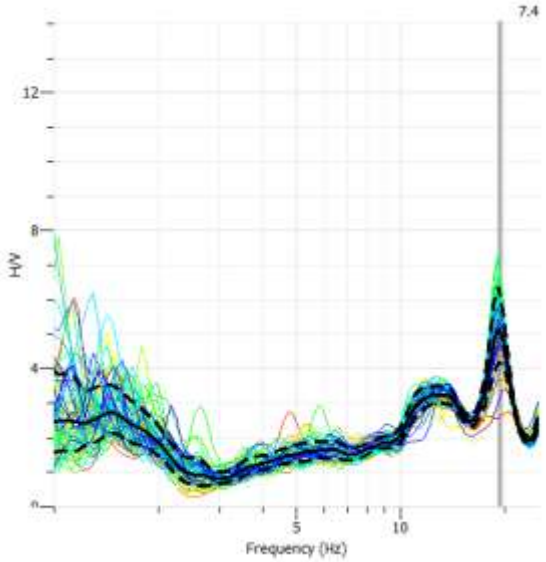


Figura 120. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 7.4

F0 13.98+/-0.81 Hz

A0 2.85

F0 21.60+/-1.44 Hz

A0 5.48

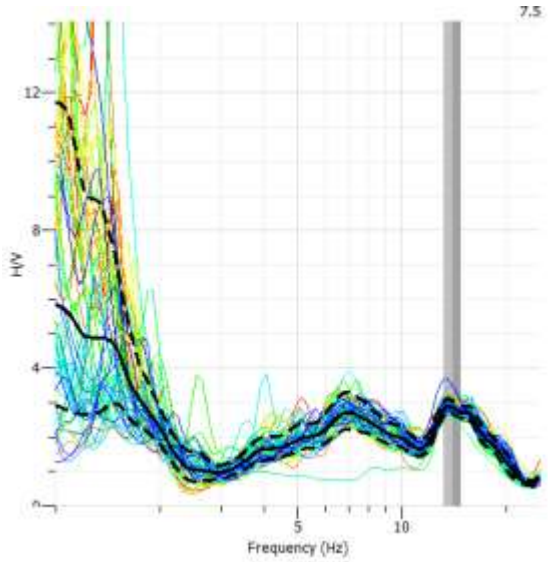


Figura 121. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 7.5

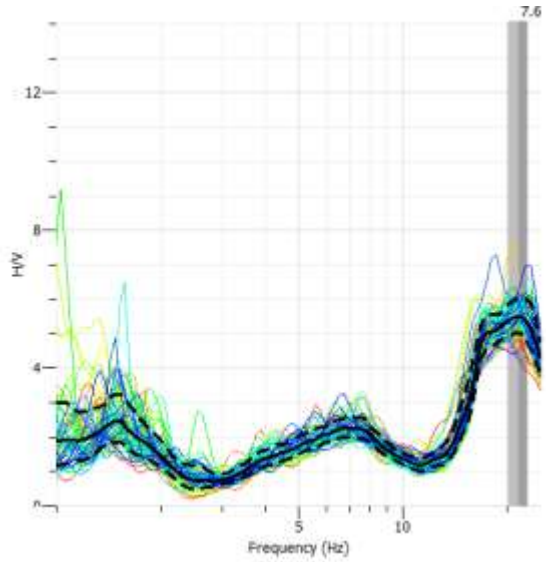


Figura 122. Frecuencia Vs H/V – La Estrella sensor 7.6

1.9.2.6.2 SPAC

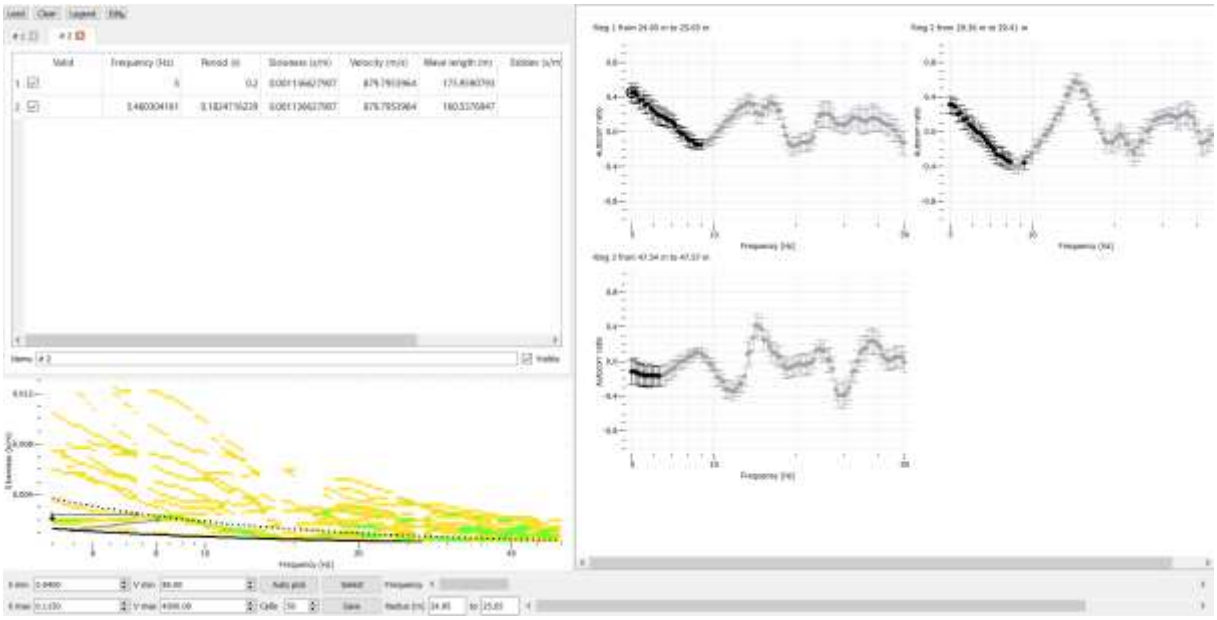


Figura 123. Histogramas de fase y curvas de auto correlación – La Estrella – 25.00 m

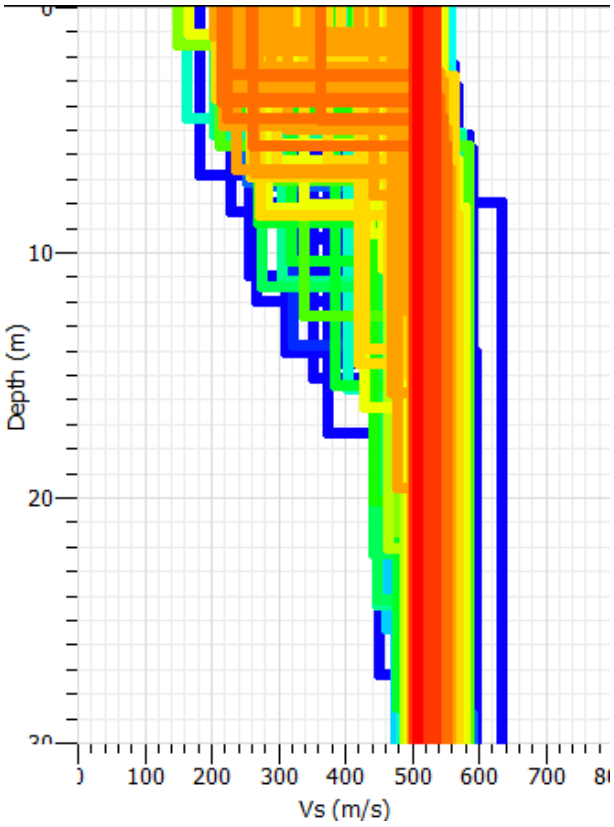


Figura 124. Perfil de velocidad de onda Vs – La Estrella – 25.00 m

1.9.2.7 Comprobación del SPAC con el H/V

Tabla 3. Datos de entrada para la comprobación del SPAC –La Estrella

BETA(m/s)	RO(t/m^3)	H(m)	CSI(%)
260.0	1.80	8.00	1.0
420.0	1.80	15.50	1.0
580.0	1.80	30.00	1.0

1.9.3 Universidad de Medellín

1.9.3.1 Arreglo 2.50 m

1.9.3.1.1 H/V

F0 3.31+/-0.29 Hz

A0 8.33

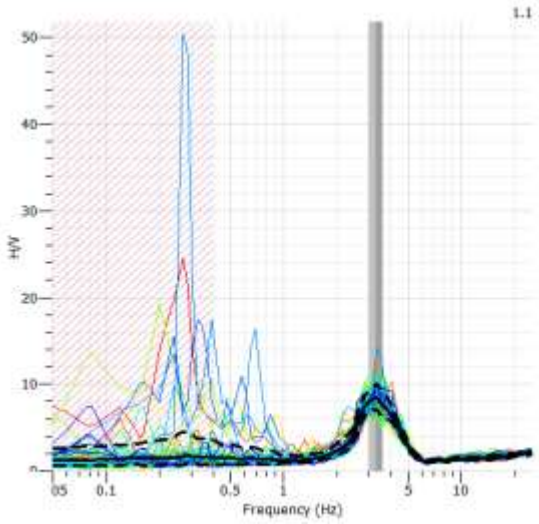


Figura 125. Frecuencia Vs H/V – Universidad de Medellín sensor 1.1

F0 3.30+/-0.30 Hz

A0 7.78

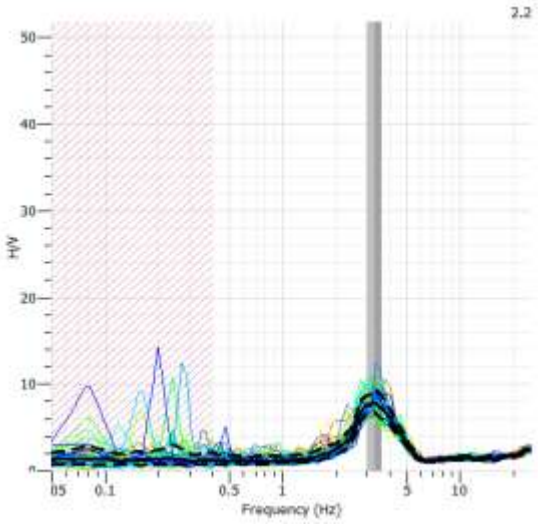


Figura 126. Frecuencia Vs H/V – Universidad de Medellín sensor 2.2

F0 3.35+/-0.28 Hz

A0 0.30

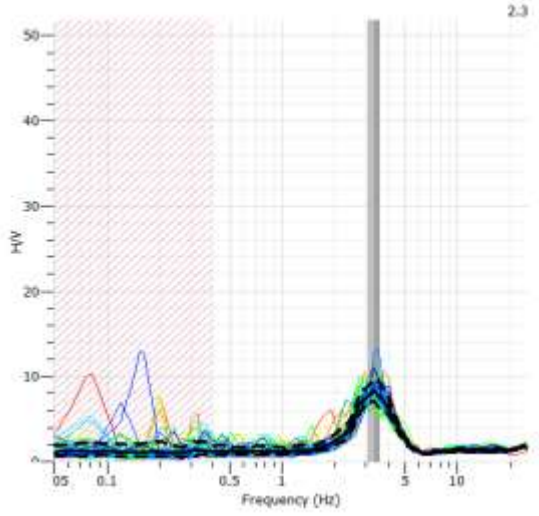


Figura 127. Frecuencia Vs H/V – Universidad de Medellín sensor 2.3

F0 3.24+/-0.26 Hz

A0 8.99

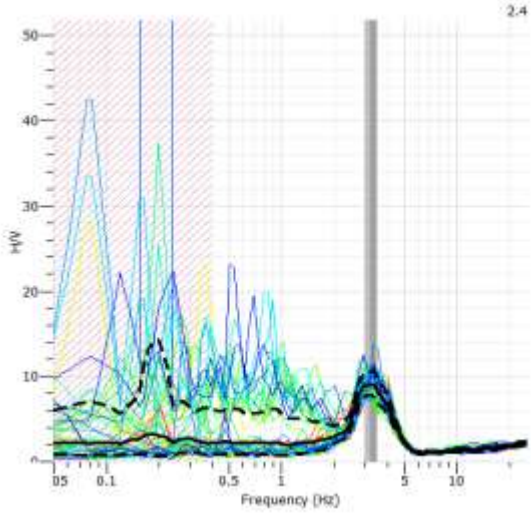


Figura 128. Frecuencia Vs H/V – Universidad de Medellín sensor 2.4

F0 0.22+/-0.03 Hz

A0 11.84

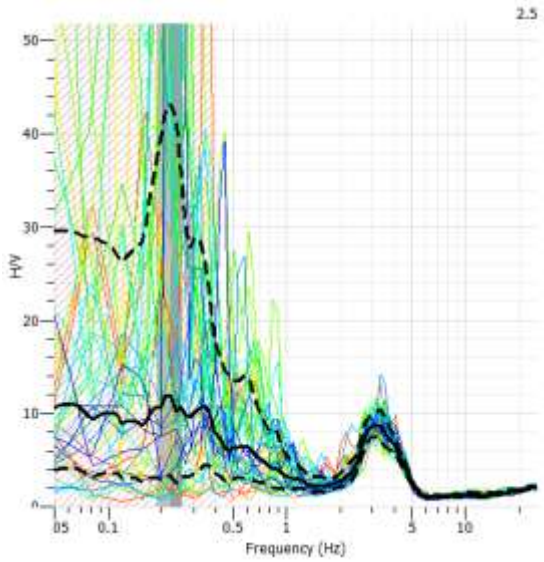


Figura 129. Frecuencia Vs H/V – Universidad de Medellín sensor 2.5

F0 3.33+/-0.33 Hz

A0 6.66

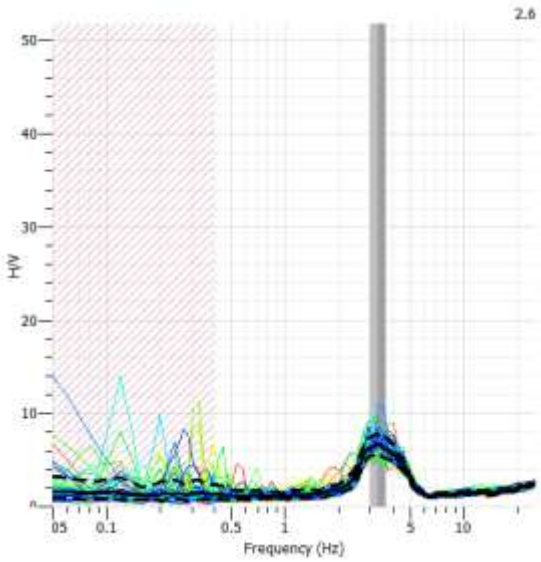


Figura 130. Frecuencia Vs H/V – Universidad de Medellín sensor 2.6

1.9.3.1.2 SPAC

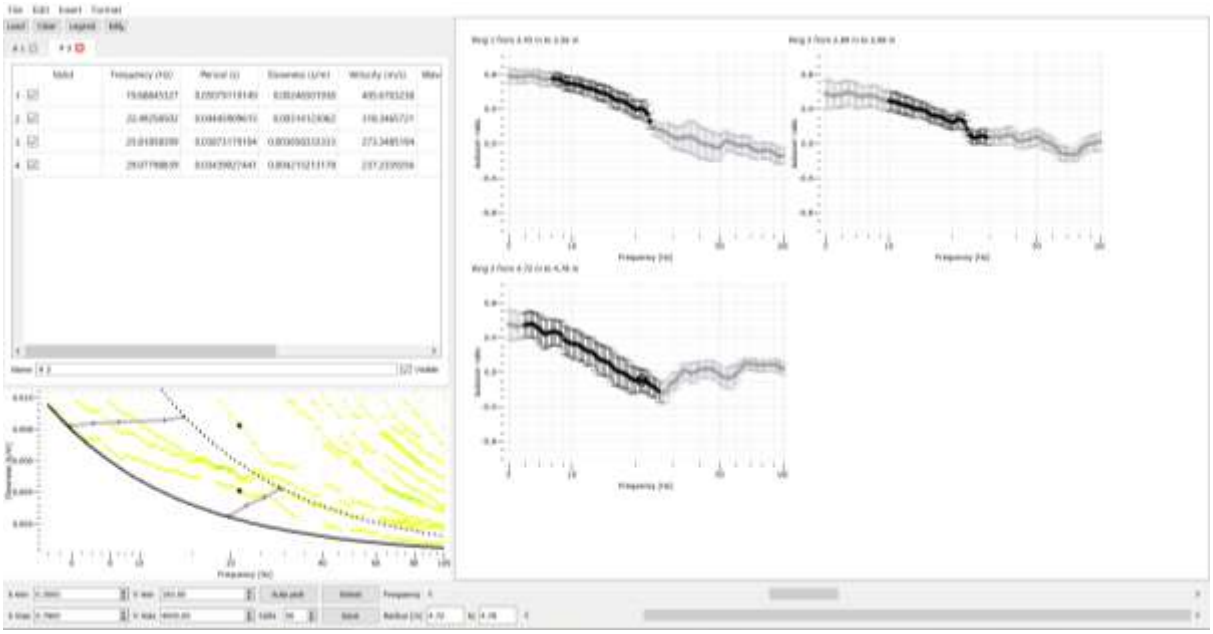


Figura 131. Histogramas de fase y curvas de auto correlación – Universidad de Medellín – 2.50 m

Debido a la tendencia descendente de las curvas del histograma de fase, no se logra realizar la inversión de la curva y por ende obtener las velocidades de onda.

1.9.3.2 Arreglo 5.00 m

1.9.3.2.1 H/V

F0 3.24+/-0.23 Hz

A0 8.49

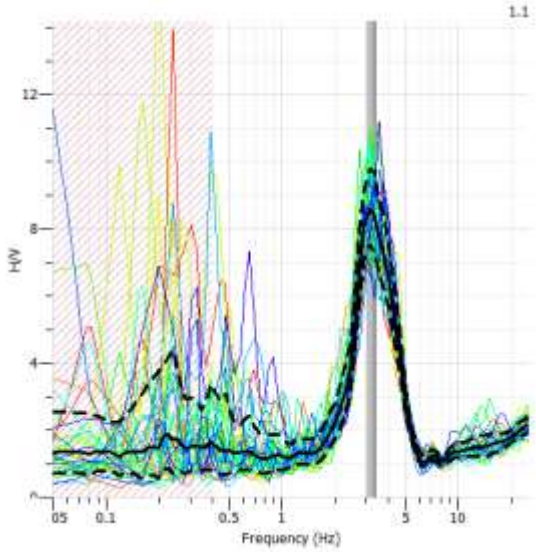


Figura 132. Frecuencia Vs H/V – Universidad de Medellín sensor 1.1

F0 3.32+/-0.33 Hz

A0 7.26

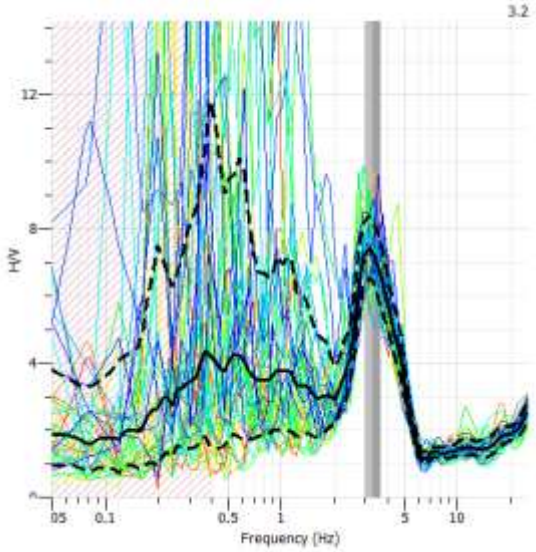


Figura 133. Frecuencia Vs H/V – Universidad de Medellín sensor 3.2

F0 3.31+/-0.26 Hz

A0 8.33

F0 3.26+/-0.24 Hz

A0 9.04

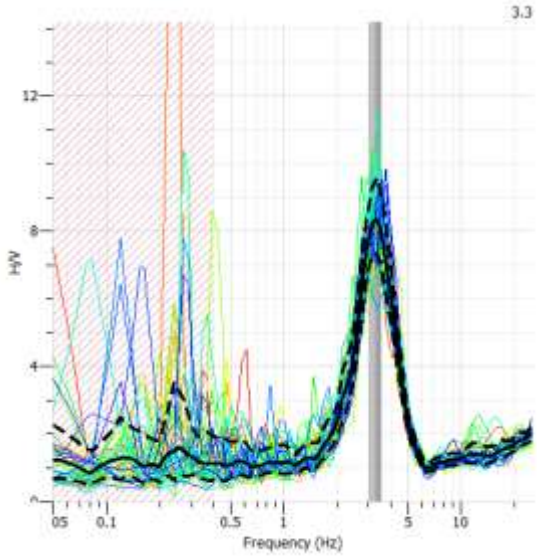


Figura 134. Frecuencia Vs H/V – Universidad de Medellín sensor 3.3

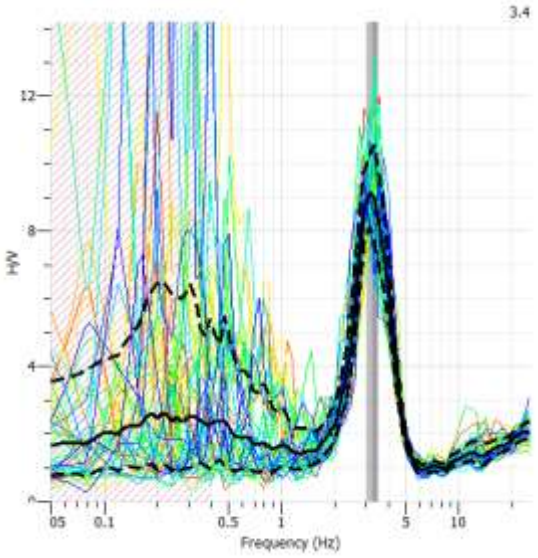


Figura 135. Frecuencia Vs H/V – Universidad de Medellín sensor 3.4

F0 3.20+/-0.27 Hz

A0 8.37

F0 3.31+/-0.37 Hz

A0 6.29

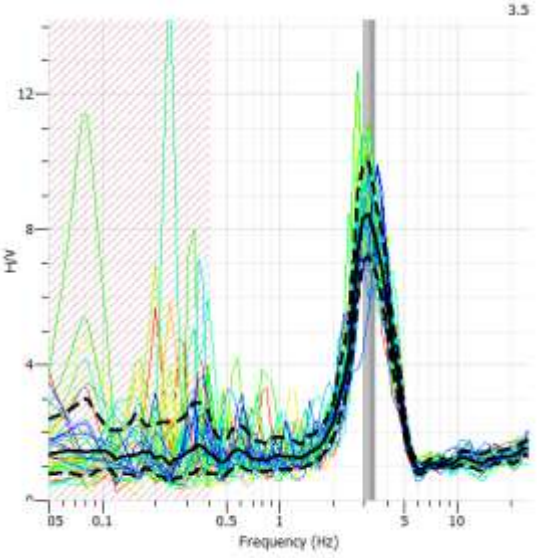


Figura 136. Frecuencia Vs H/V – Universidad de Medellín sensor 3.5

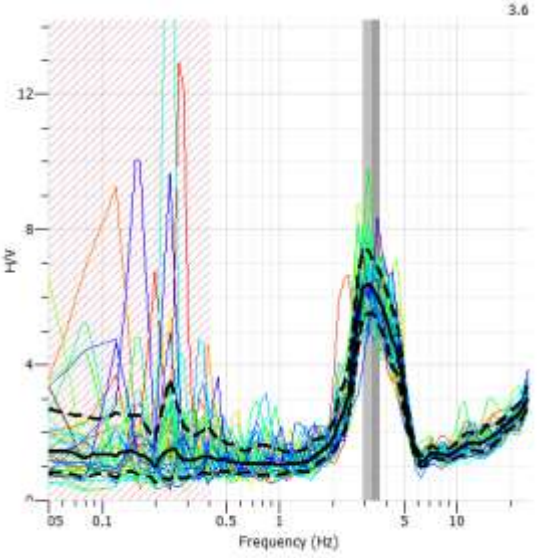


Figura 137. Frecuencia Vs H/V – Universidad de Medellín sensor 3.6

1.9.3.2.2 SPAC

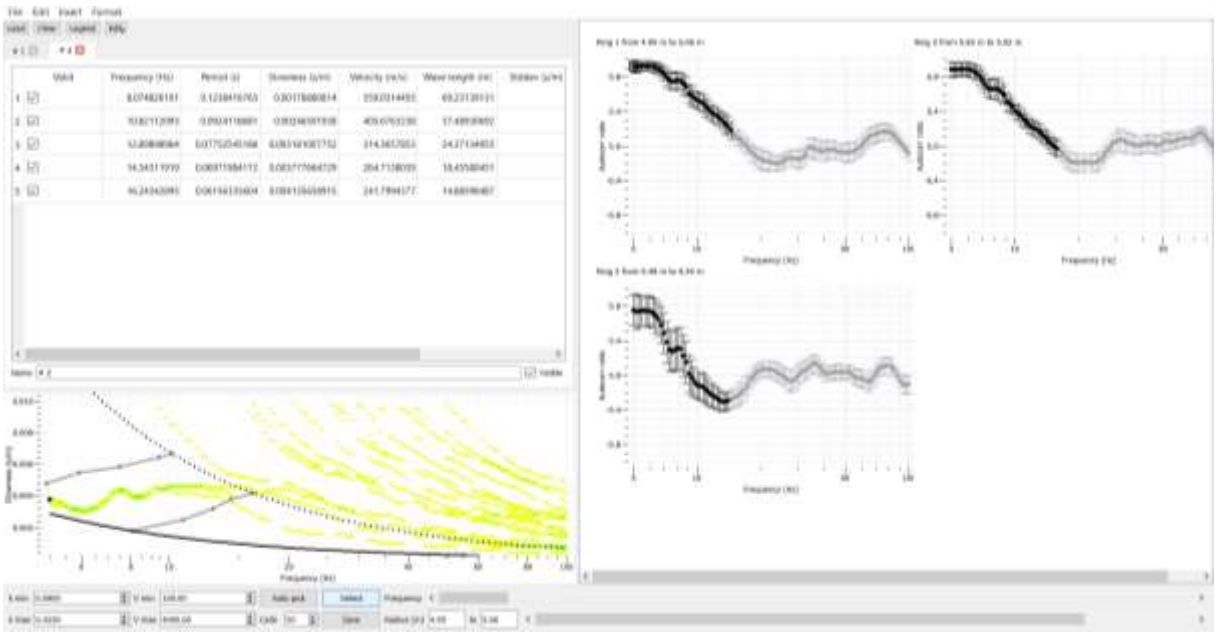


Figura 138. Histogramas de fase y curvas de auto correlación – Universidad de Medellín – 5.00 m

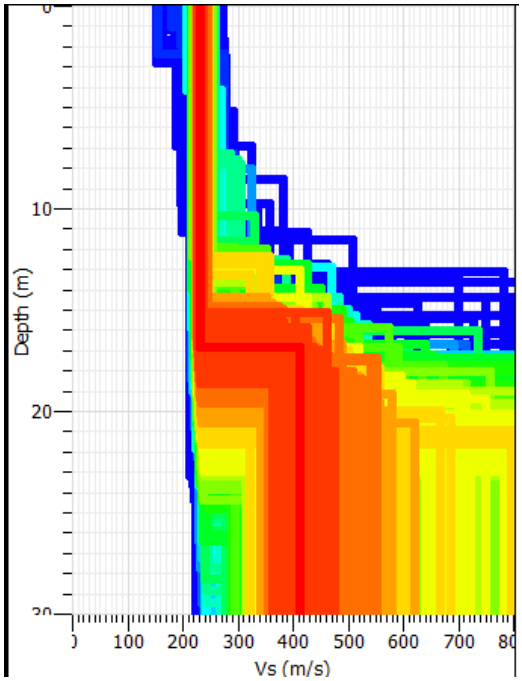


Figura 139. Perfil de velocidad de onda Vs – Universidad de Medellín – 5.00 m

1.9.3.3 Arreglo 10.00 m

1.9.3.3.1 H/V

F0 3.40+/-0.30 Hz

A0 8.49

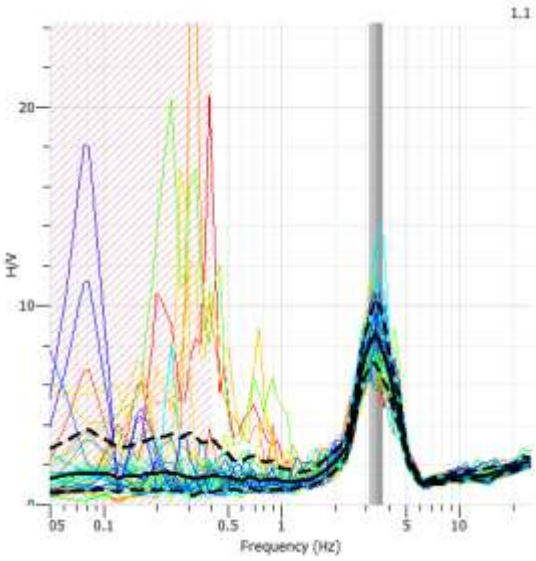


Figura 140. Frecuencia Vs H/V – Universidad de Medellín sensor 1.1

F0 3.46+/-0.36 Hz

A0 6.83

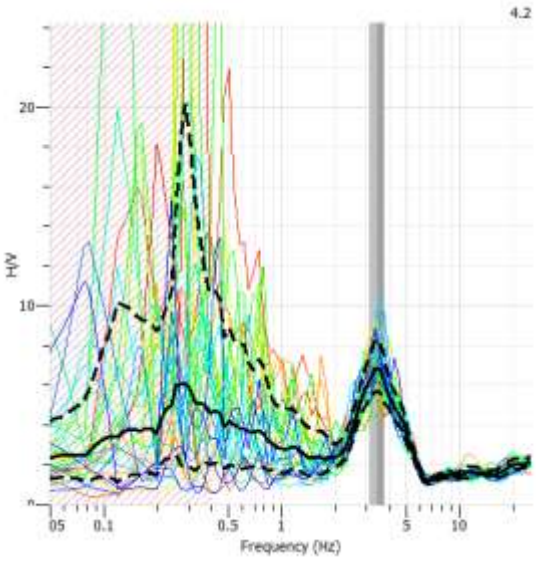


Figura 141. Frecuencia Vs H/V – Universidad de Medellín sensor 4.2

F0 3.50+/-0.17 Hz

A0 6.16

F0 3.25+/-0.23 Hz

A0 8.32

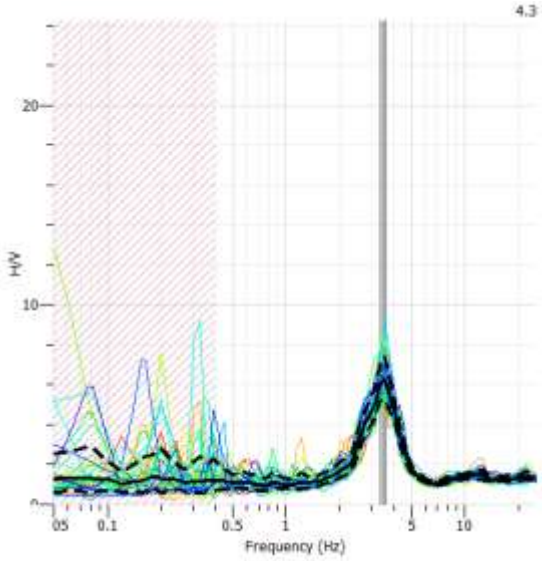


Figura 142. Frecuencia Vs H/V – Universidad de Medellín sensor 4.3

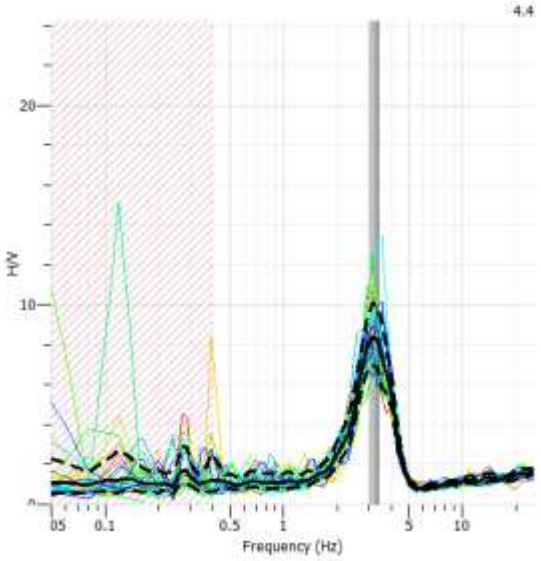


Figura 143. Frecuencia Vs H/V – Universidad de Medellín sensor 4.4

F0 3.26+/-0.33 Hz

A0 7.57

F0 3.50+/-0.40 Hz

A0 5.70

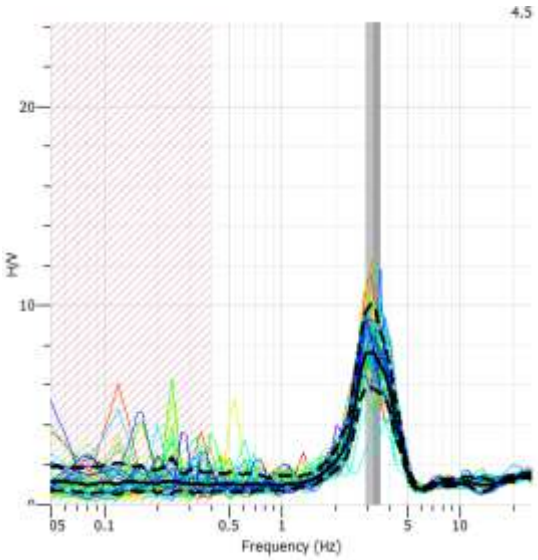


Figura 144. Frecuencia Vs H/V – Universidad de Medellín sensor 4.5

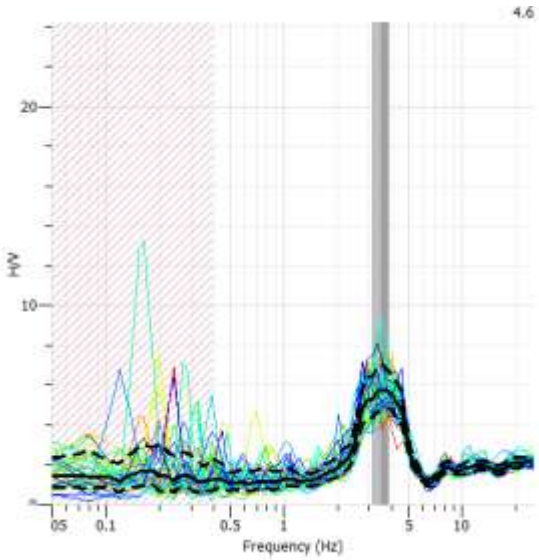


Figura 145. Frecuencia Vs H/V – Universidad de Medellín sensor 4.6

1.9.3.3.2 SPAC

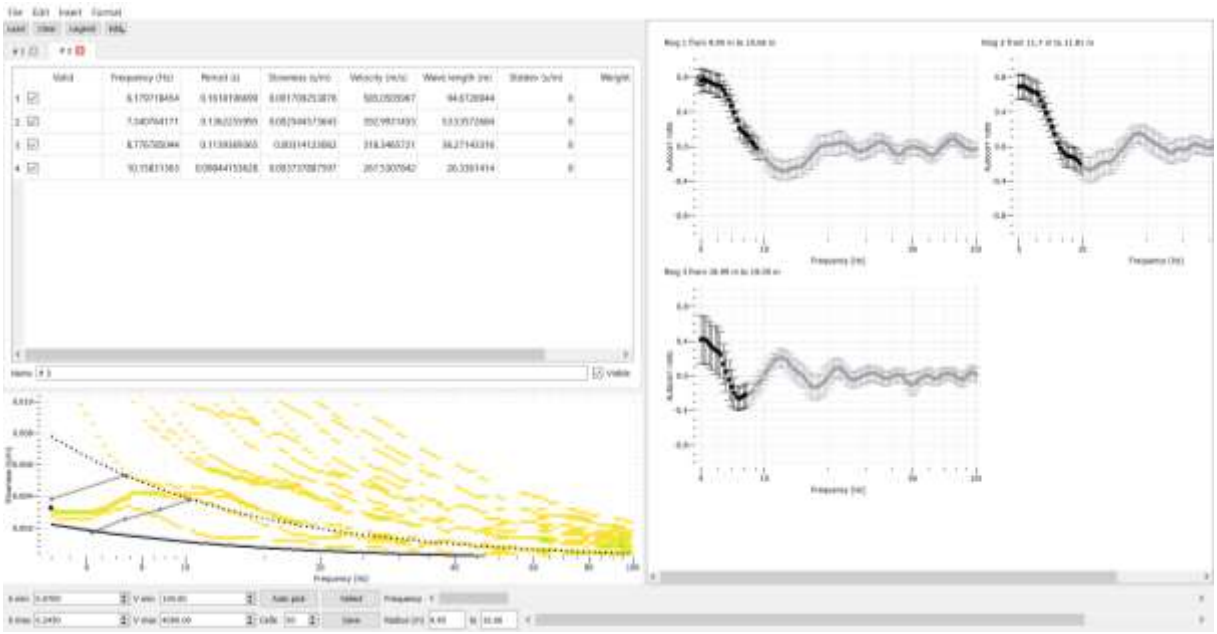


Figura 146. Histogramas de fase y curvas de auto correlación – Universidad de Medellín – 10.00 m

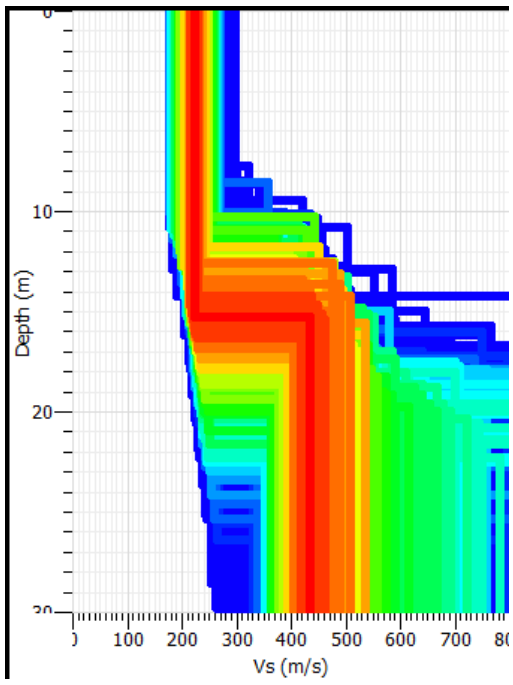


Figura 147. Perfil de velocidad de onda Vs – Universidad de Medellín – 10.00 m

1.9.3.4 Arreglo 15.00 m

1.9.3.4.1 H/V

F0 3.37+/-0.30 Hz

A0 8.00

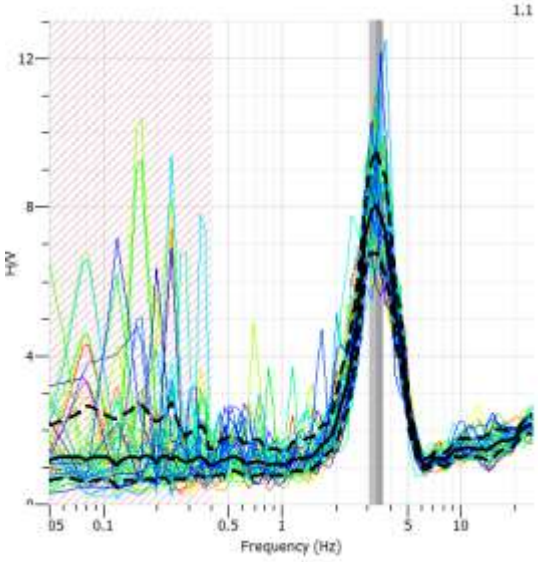


Figura 148. Frecuencia Vs H/V – Universidad de Medellín sensor 1.1

F0 3.40+/-0.24 Hz

A0 5.83

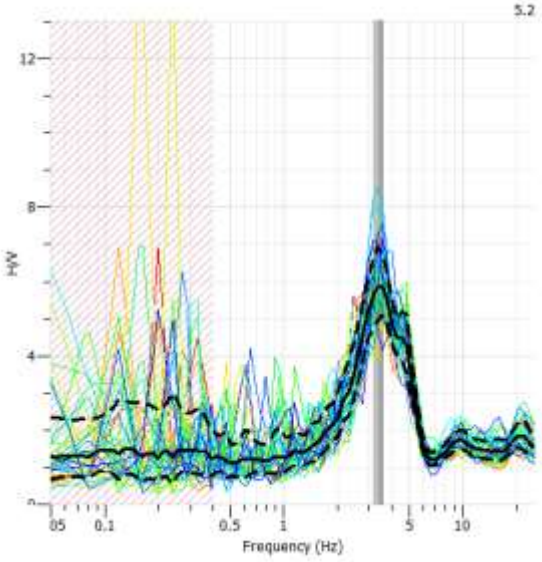


Figura 149. Frecuencia Vs H/V – Universidad de Medellín sensor 5.2

F0 3.39+/-0.26 Hz

A0 5.85

F0 3.11+/-0.16 Hz

A0 8.84

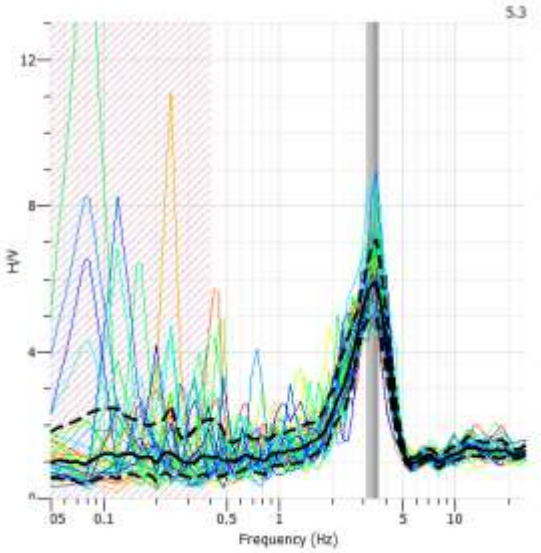


Figura 150. Frecuencia Vs H/V – Universidad de Medellín sensor 5.3

F0 3.21+/-0.30 Hz

A0 8.81

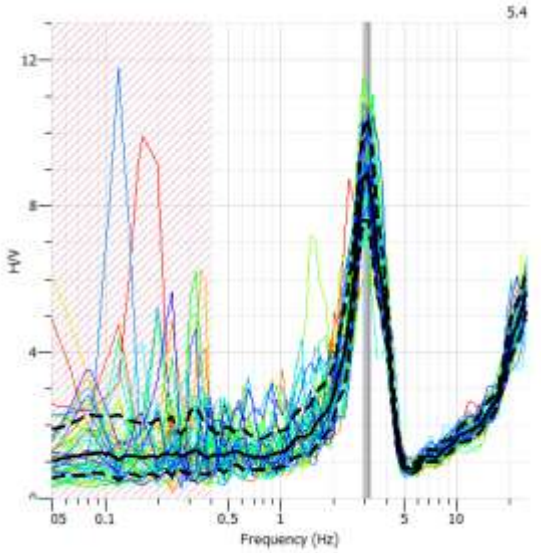


Figura 151. Frecuencia Vs H/V – Universidad de Medellín sensor 5.4

F0 3.79+/-0.51 Hz

A0 5.61

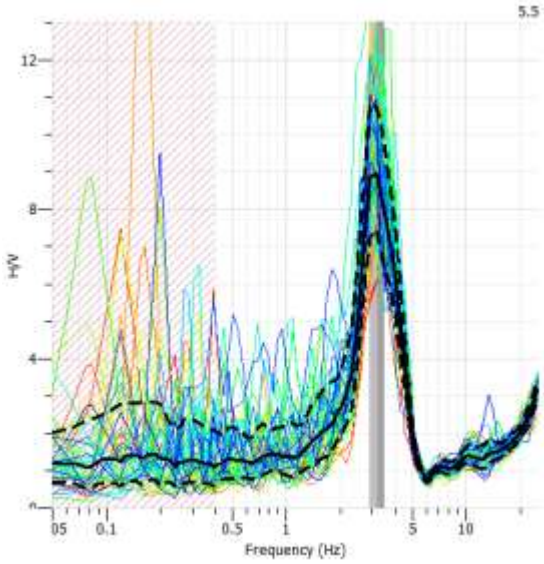


Figura 152. Frecuencia Vs H/V – Universidad de Medellín sensor 5.5

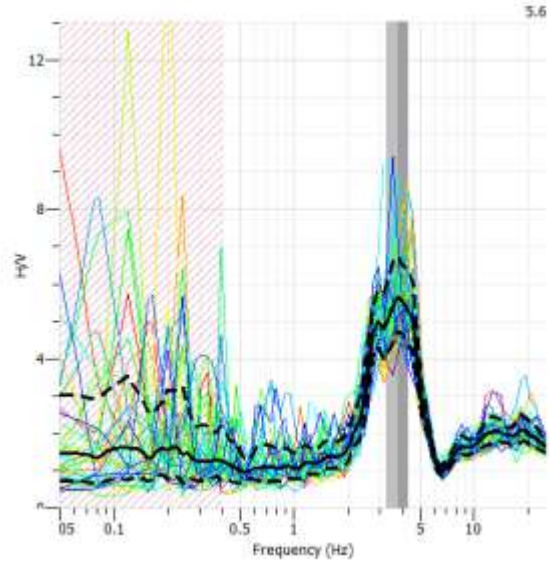


Figura 153. Frecuencia Vs H/V – Universidad de Medellín sensor 5.6

1.9.3.4.2 SPAC

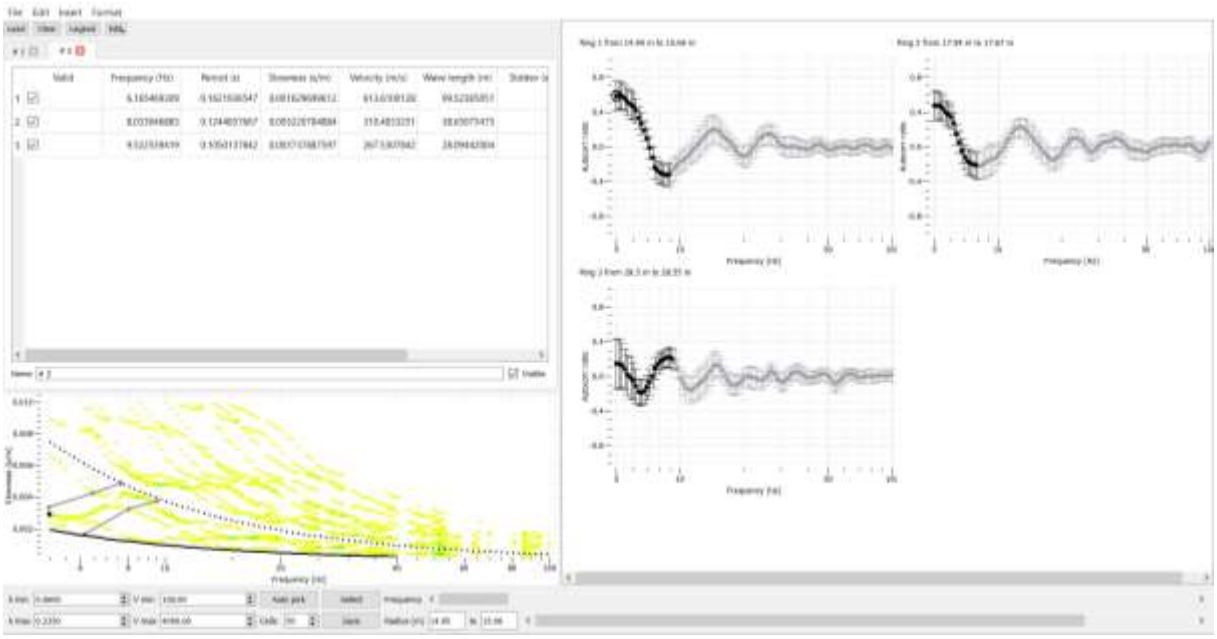


Figura 154. Histogramas de fase y curvas de auto correlación – Universidad de Medellín – 15.00 m

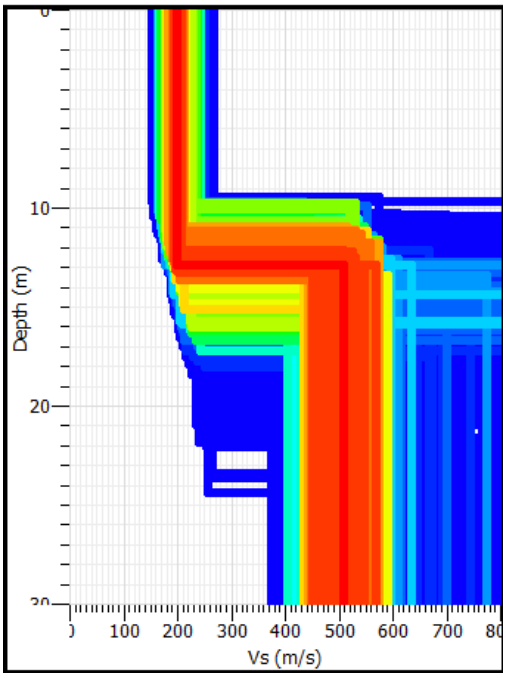


Figura 155. Perfil de velocidad de onda Vs – Universidad de Medellín – 15.00 m

1.9.3.5 Comprobación del SPAC con el H/V

Table 4. Datos de entrada para la comprobación del SPAC –Universidad de Medellín

BETA(m/s)	RO(t/m^3)	H(m)	CSI(%)
200.0	1.80	13.00	1.0
510.0	1.80	30.00	1.0

1.9.4 Obra en construcción (Ciudad del Bosque)

1.9.4.1 Arreglo 2.50 m

1.9.4.1.1 H/V

F0 1.98+/-0.33 Hz

A0 5.82

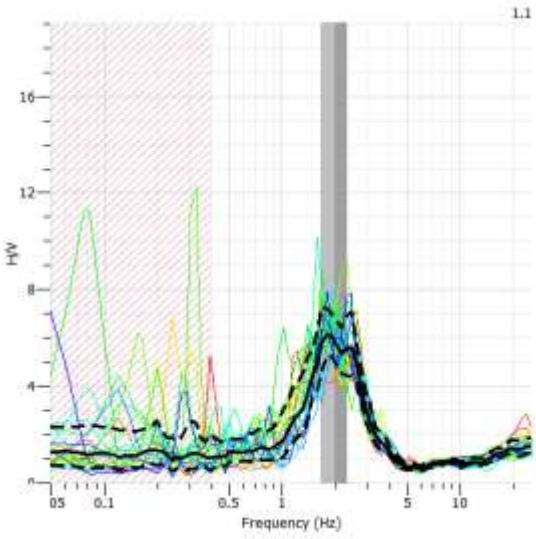


Figura 156. Frecuencia Vs H/V – Obra en Construcción sensor 1.1

F0 2.00+/-0.34 Hz

A0 4.67

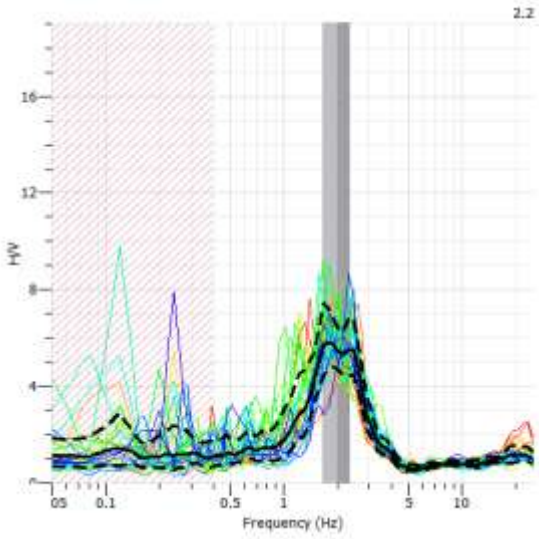


Figura 157. Frecuencia Vs H/V – Obra en Construcción sensor 2.2

F0 2.00+/-0.26 Hz

A0 6.07

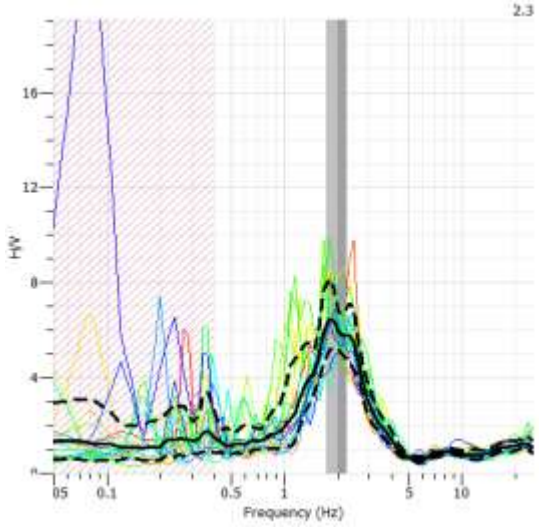


Figura 158. Frecuencia Vs H/V – Obra en Construcción sensor 2.3

F0 1.95+/-0.32 Hz

A0 7.46

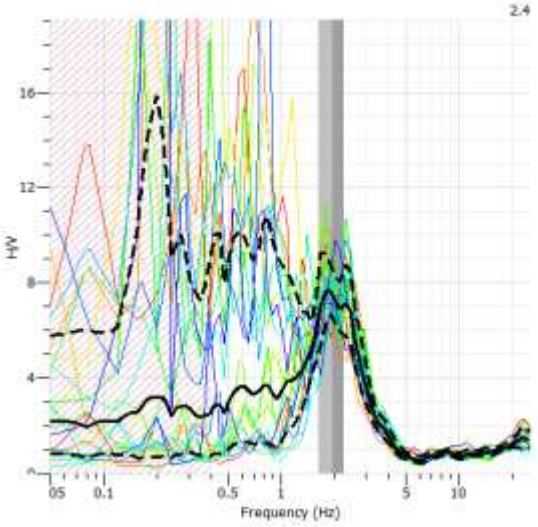


Figura 159. Frecuencia Vs H/V – Obra en Construcción sensor 2.4

F0 1.95+/-0.36 Hz

A0 5.88

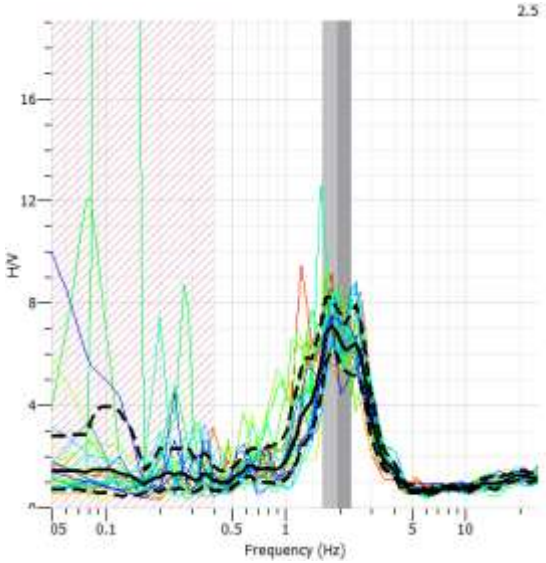


Figura 160. Frecuencia Vs H/V – Obra en Construcción sensor 2.5

F0 2.27+/-0.30 Hz

A0 4.31

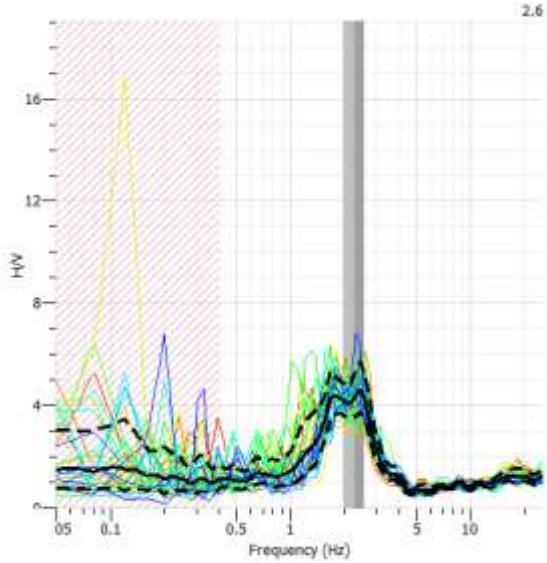


Figura 161. Frecuencia Vs H/V – Obra en Construcción sensor 2.6

1.9.4.1.2 SPAC

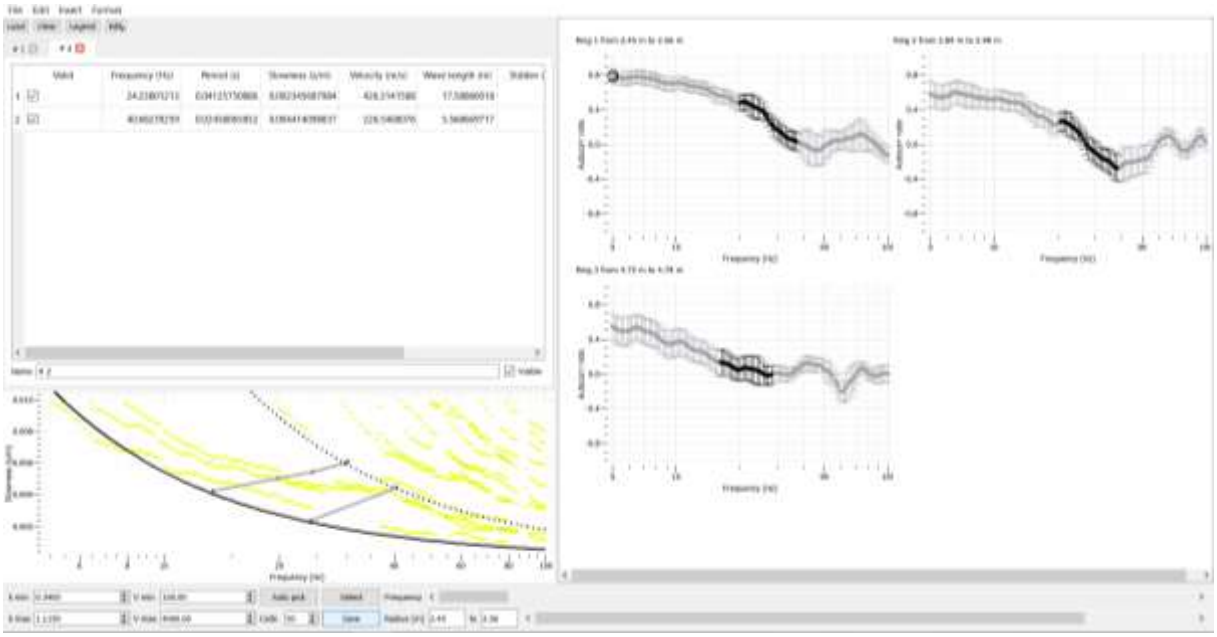


Figura 162. Histogramas de fase y curvas de auto correlación – Sitio de Construcción – 2.50 m

Debido a la tendencia descendente de las curvas del histograma de fase, no se logra realizar la inversión de la curva y por ende obtener las velocidades de onda.

1.9.4.2 Arreglo 5.00 m

1.9.4.2.1 H/V

F0	2.26+/-0.50 Hz	F0	2.12+/-0.35 Hz
A0	5.16	A0	5.61

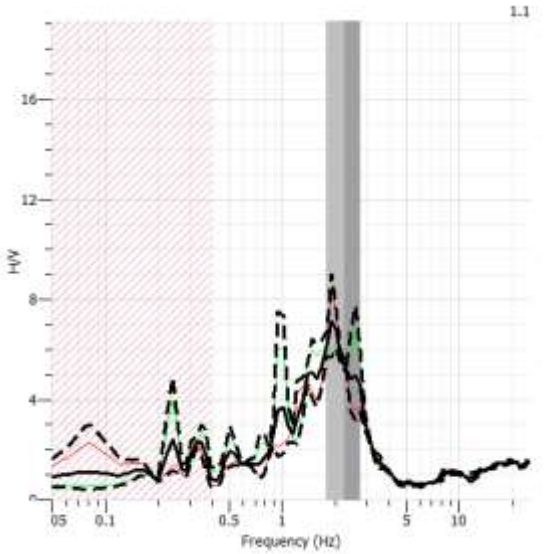


Figura 163. Frecuencia Vs H/V – Obra en Construcción sensor 1.1

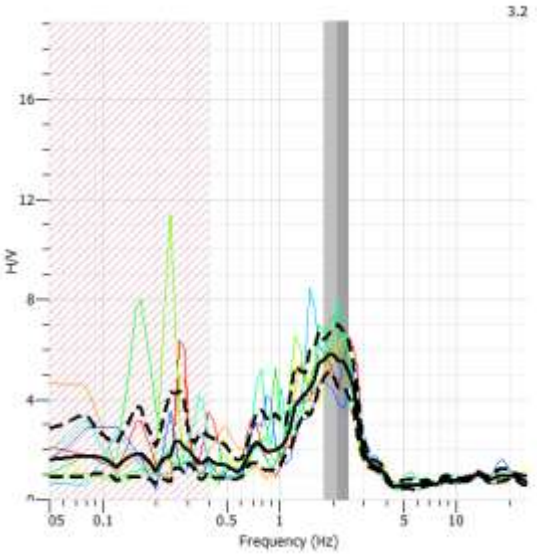


Figura 164. Frecuencia Vs H/V – Obra en Construcción sensor 3.2

F0 1.79+/-0.13 Hz

A0 7.93

F0 1.99+/-0.16 Hz

A0 12.00

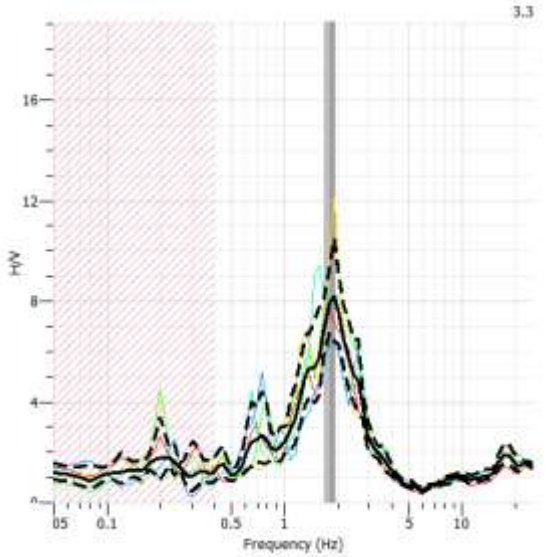


Figura 165. Frecuencia Vs H/V – Obra en Construcción sensor 3.3

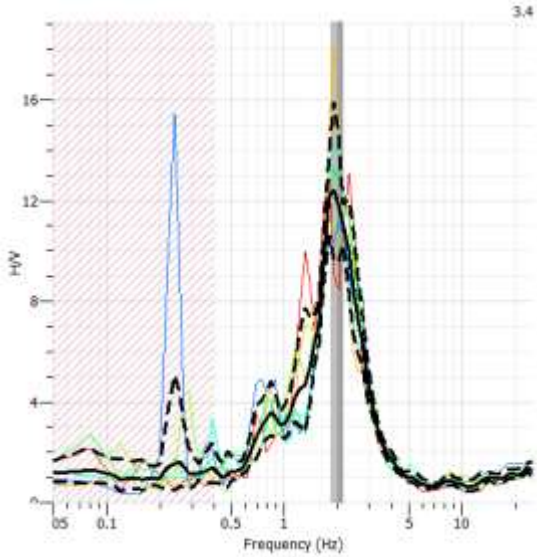


Figura 166. Frecuencia Vs H/V – Obra en Construcción sensor 3.4

F0 1.96+/-0.51 Hz

A0 9.20

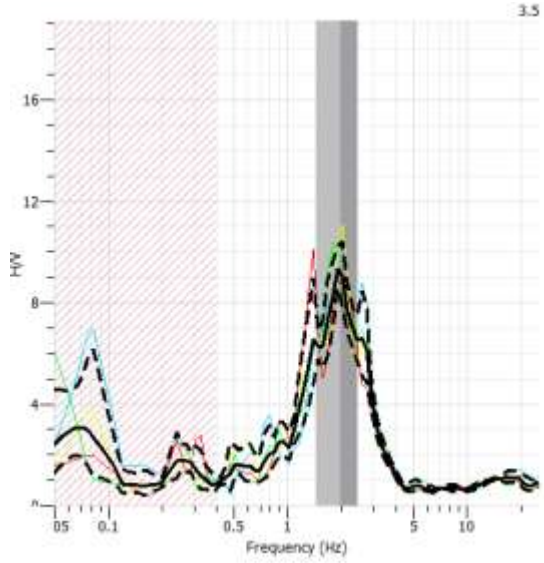


Figura 167. Frecuencia Vs H/V – Obra en Construcción sensor 3.5

F0 2.32+/-0.41 Hz

A0 3.60

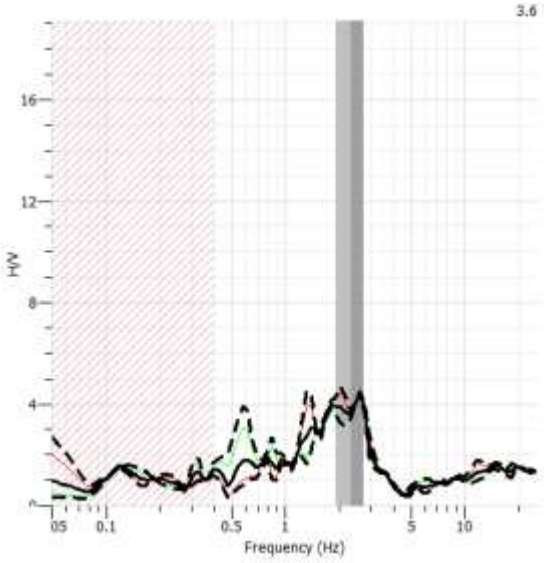


Figura 168.. Frecuencia Vs H/V – Obra en Construcción sensor 3.6

1.9.4.2.2 SPAC

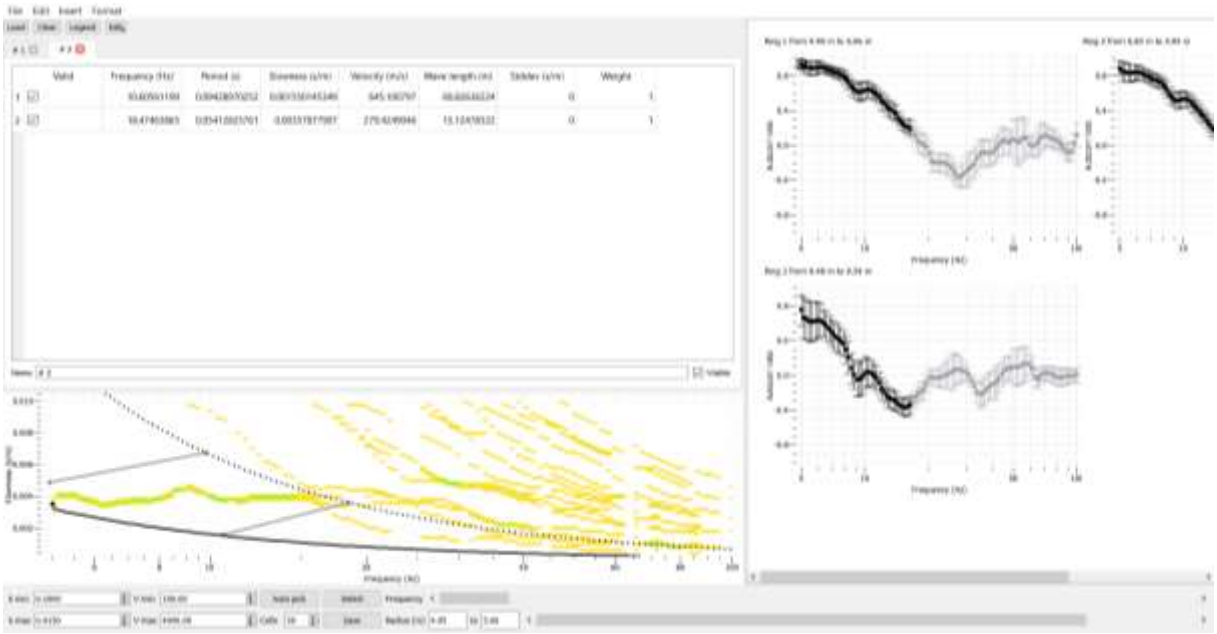


Figura 169. Histogramas de fase y curvas de auto correlación – Sitio de Construcción – 5.00 m

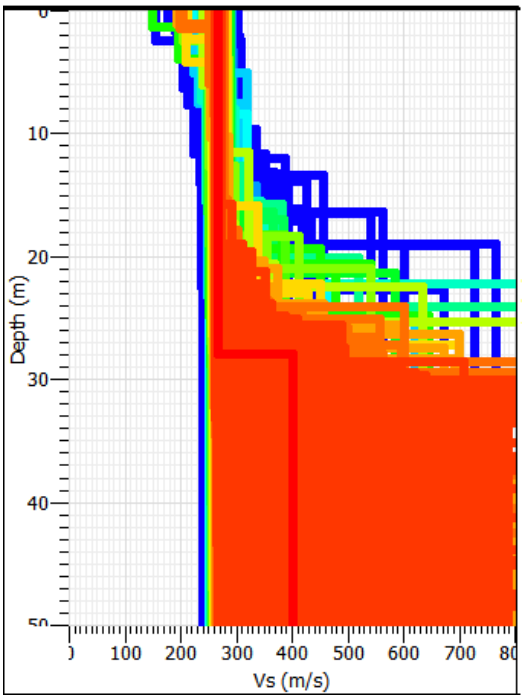


Figura 170. Perfil de velocidad de onda Vs – Sitio de Construcción – 5.00 m

1.9.4.3 Comprobación del SPAC con el H/V

En este sitio no se realiza dicha comparación, debido a que no hay datos concluyentes para la determinación del perfil.

1.9.5 Seminario Mayor

1.9.5.1 Arreglo 2.50 m

1.9.5.1.1 H/V

F0	2.98+/-0.33 Hz	F0	3.03+/-0.40 Hz
A0	8.07	A0	8.13

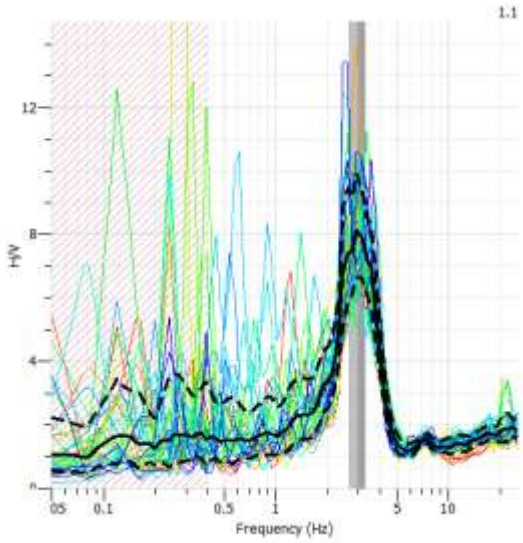


Figura 171. Frecuencia Vs H/V – Seminario Mayor sensor 1.1

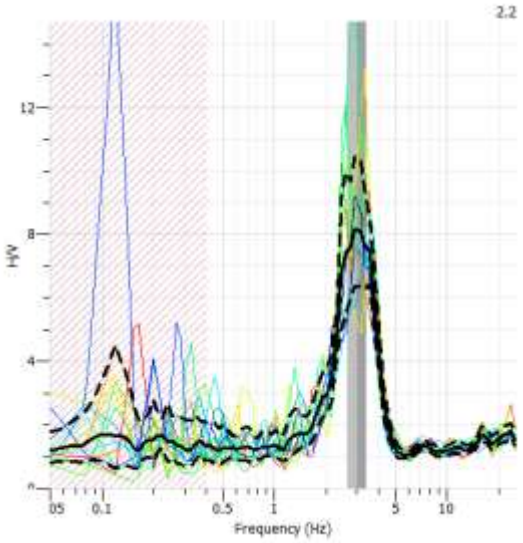


Figura 172. Frecuencia Vs H/V – Seminario Mayor sensor 2.2

F0 2.94+/-0.27 Hz

A0 9.04

F0 2.90+/-0.28 Hz

A0 9.14

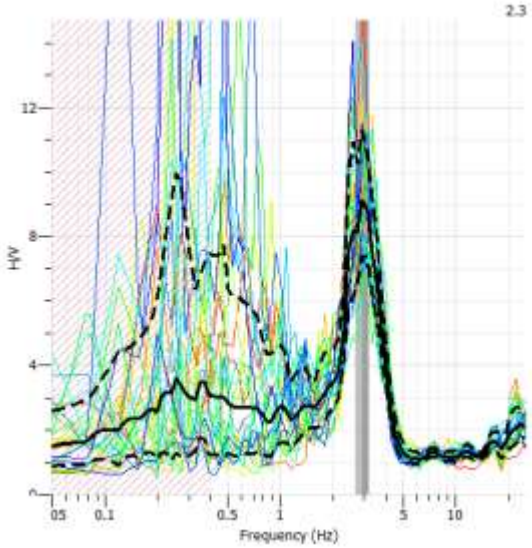


Figura 173. Frecuencia Vs H/V – Seminario Mayor sensor 2.3

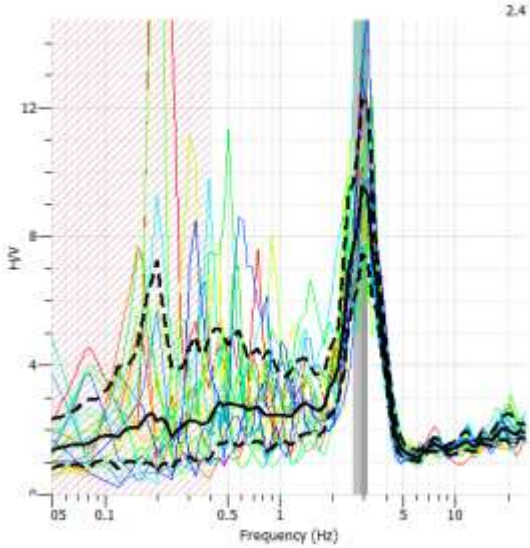
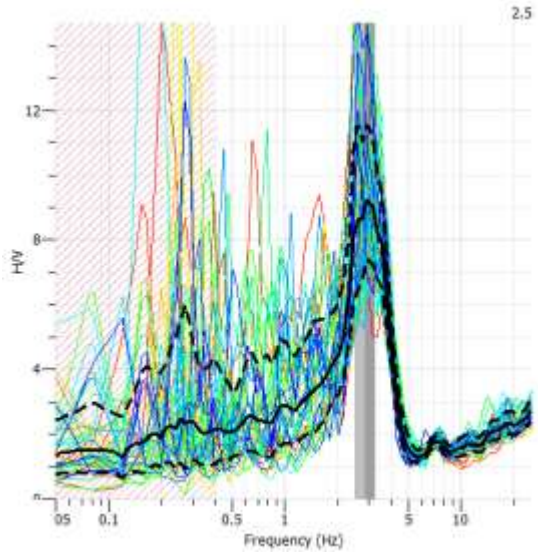


Figura 174. Frecuencia Vs H/V – Seminario Mayor sensor 2.4

F0	2.87+/-0.37 Hz	F0	3.04+/-0.43 Hz
A0	8.94	A0	6.85



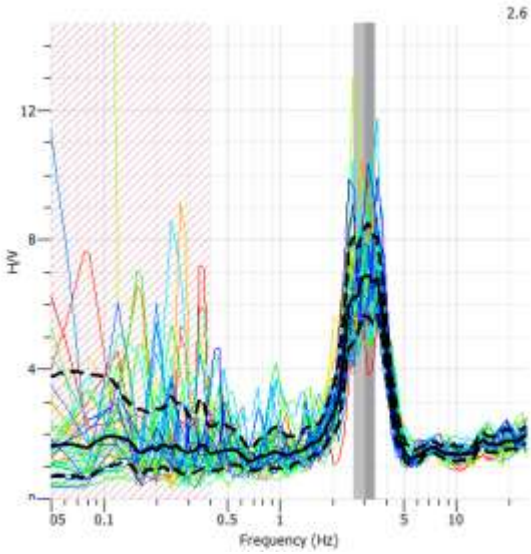


Figura 175. Frecuencia Vs H/V – Seminario Mayor sensor 2.5

Figura 176. Frecuencia Vs H/V – Seminario Mayor sensor 2.6

1.9.5.1.2 SPAC

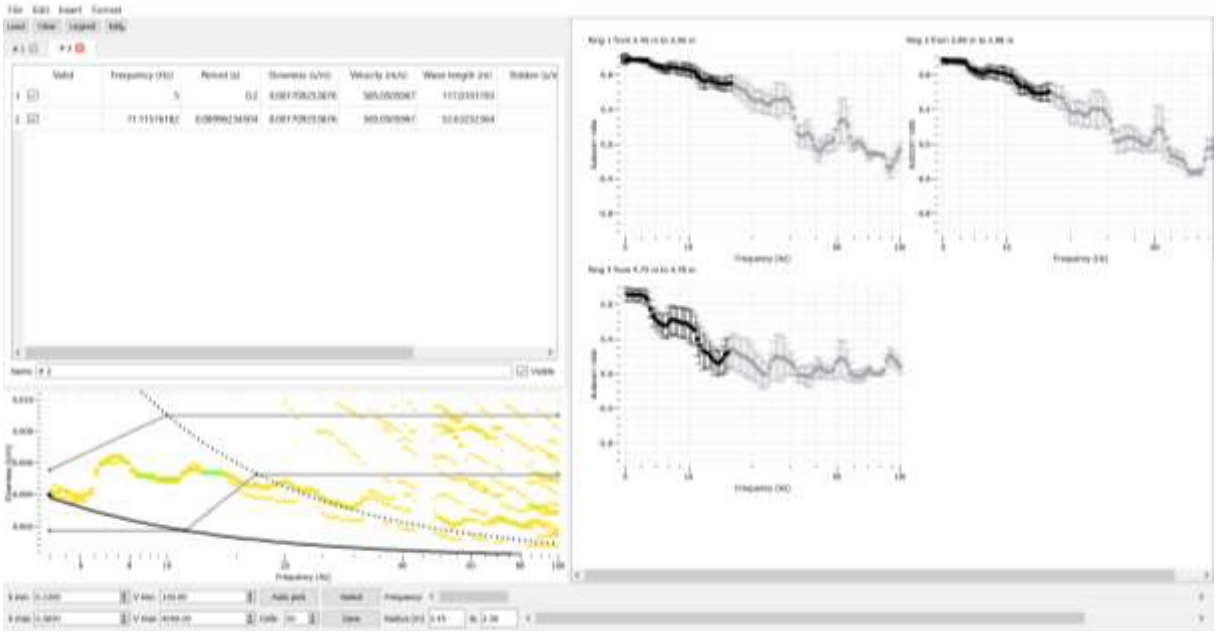


Figura 177. Histogramas de fase y curvas de auto correlación – Seminario Mayor – 2.50 m

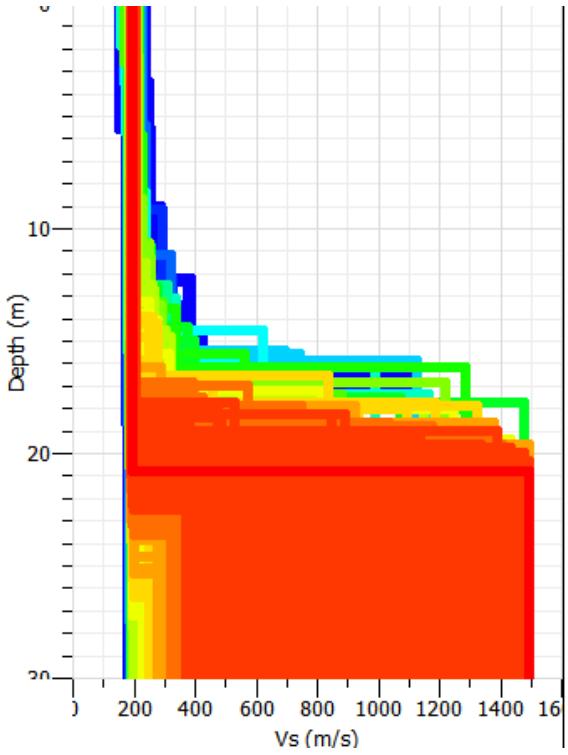


Figura 178. Perfil de velocidad de onda Vs – Seminario Mayor – 2.50 m

1.9.5.2 Arreglo 5.00 m

1.9.5.2.1 H/V

F0	3.60+/-0.34 Hz	F0	3.24+/-0.38 Hz
A0	7.38	A0	6.93

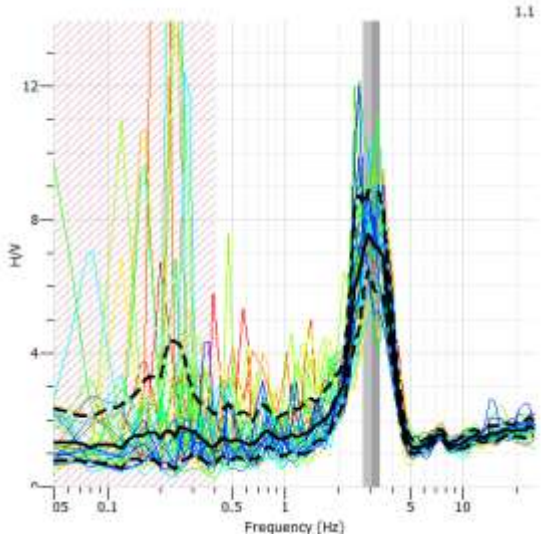


Figura 179. Frecuencia Vs H/V – Seminario Mayor sensor 1.1

F0 3.06+/-0.29 Hz

A0 7.95

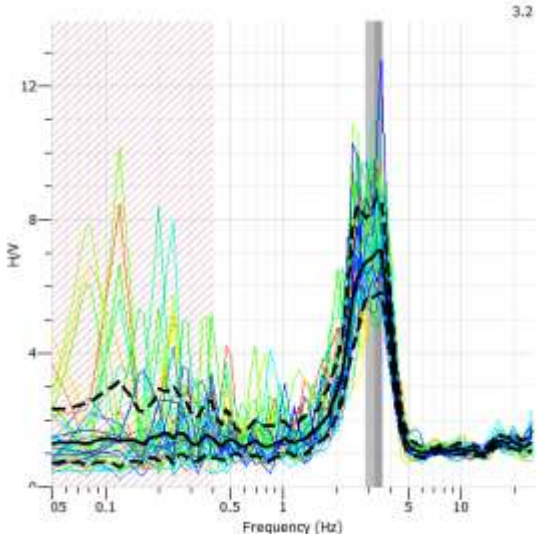


Figura 180. Frecuencia Vs H/V – Seminario Mayor sensor 3.2

F0 3.02+/-0.17 Hz

A0 9.25

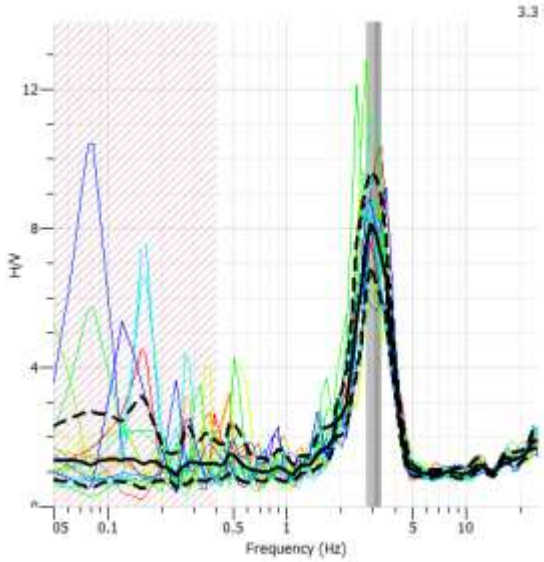


Figura 181. Frecuencia Vs H/V – Seminario Mayor sensor 3.3

F0 3.17+/-0.32 Hz

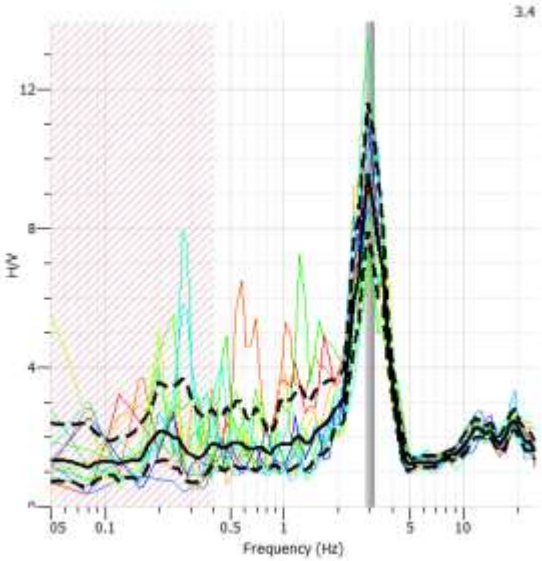


Figura 182. Frecuencia Vs H/V – Seminario Mayor sensor 3.4

F0 3.51+/-0.30 Hz

A0 9.21

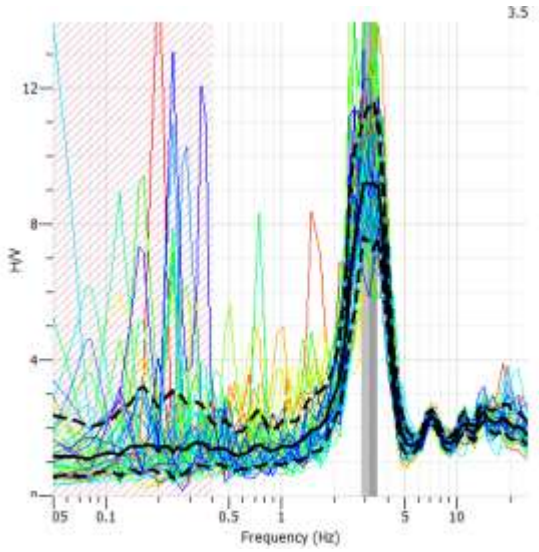


Figura 183. Frecuencia Vs H/V – Seminario Mayor sensor 3.5

A0 6.59

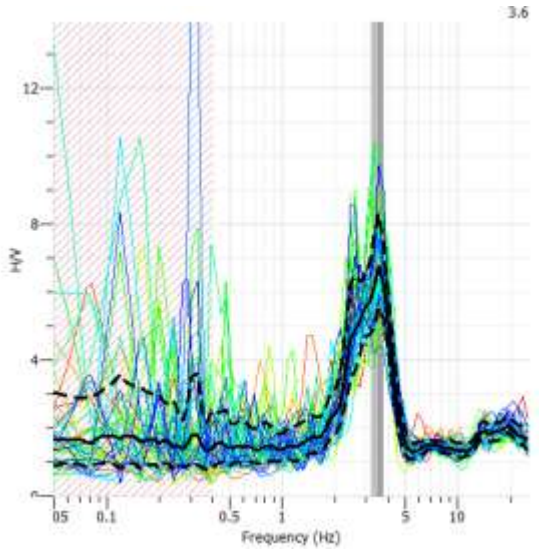


Figura 184. Frecuencia Vs H/V – Seminario Mayor sensor 3.6

1.9.5.2.2 SPAC

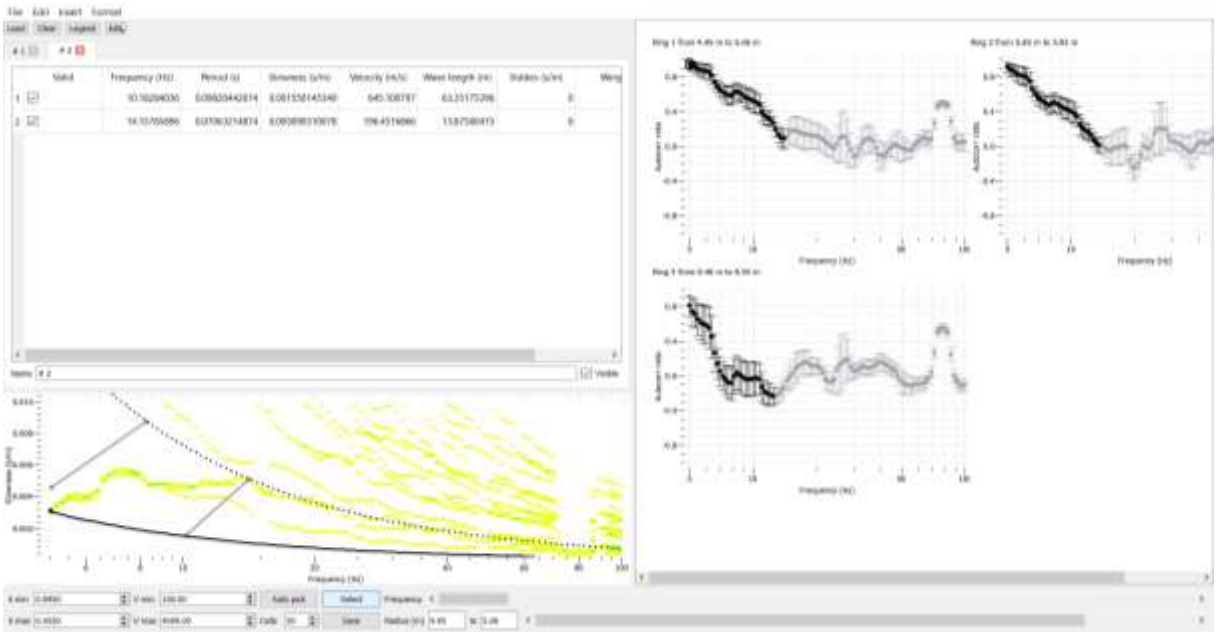


Figura 185. Histogramas de fase y curvas de auto correlación – Seminario Mayor – 5.00 m

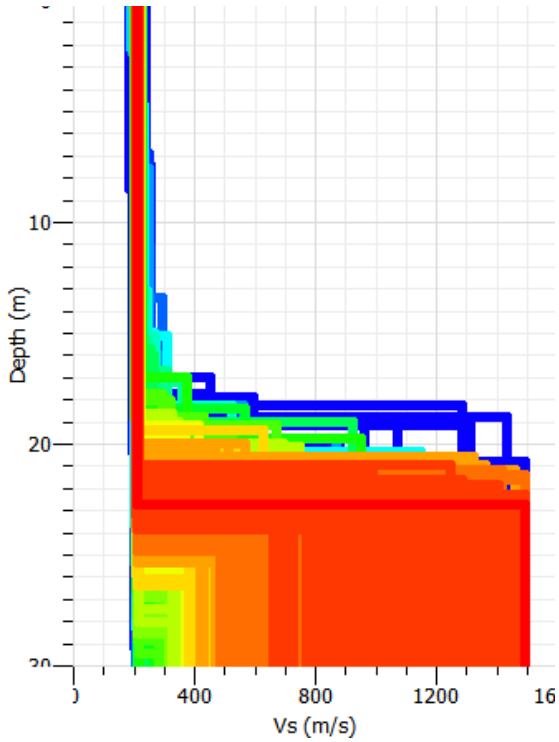


Figura 186. Perfil de velocidad de onda Vs – Seminario Mayor – 5.00 m

1.9.5.3 Arreglo 10.00 m

1.9.5.3.1 H/V

F0	3.05+/-0.31 Hz	F0	3.18+/-0.42 Hz
A0	7.88	A0	7.00

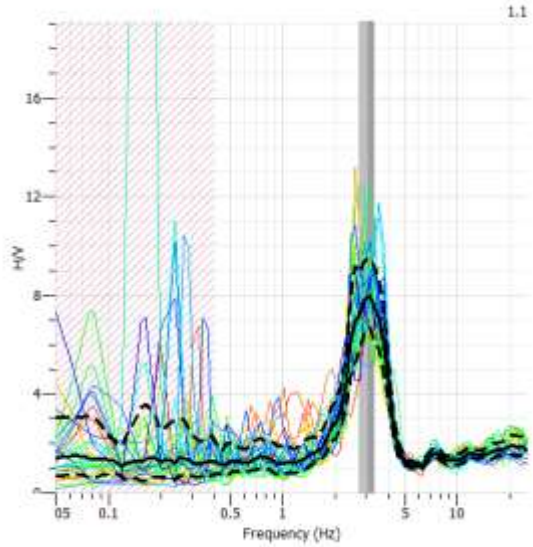


Figura 187. Frecuencia Vs H/V – Seminario Mayor sensor 1.1

F0 2.92+/-0.25 Hz

A0 8.92

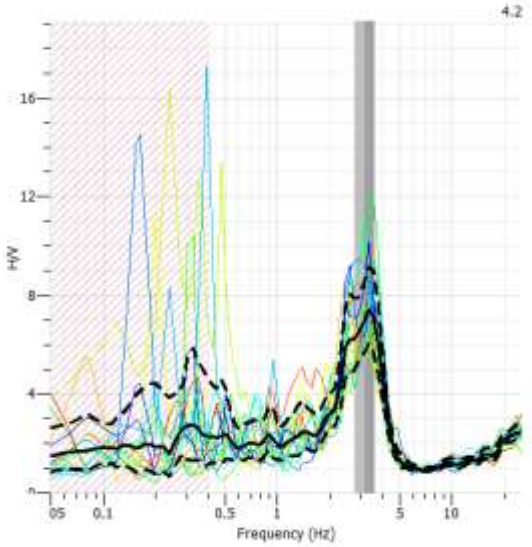


Figura 188. Frecuencia Vs H/V – Seminario Mayor sensor 4.2

F0 2.94+/-0.21 Hz

A0 12.01

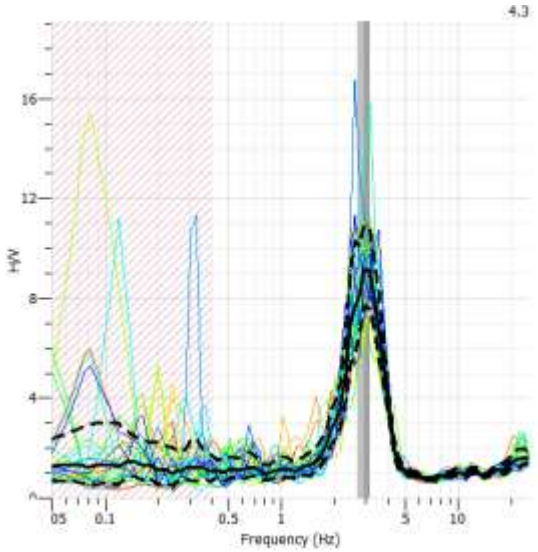


Figura 189. Frecuencia Vs H/V – Seminario Mayor sensor 4.3

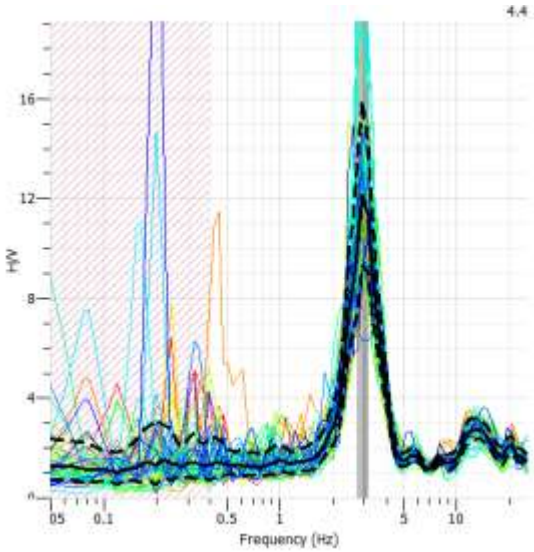


Figura 190. Frecuencia Vs H/V – Seminario Mayor sensor 4.4

F0 3.20+/-0.33 Hz

A0 10.93

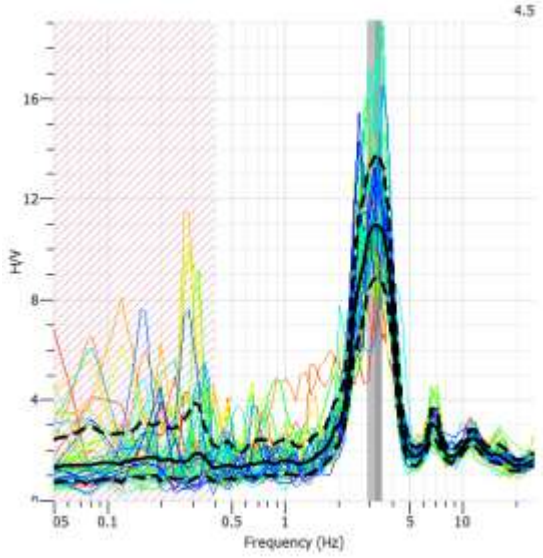


Figura 191. Frecuencia Vs H/V – Seminario Mayor sensor 4.5

F0 3.52+/-0.38 Hz

A0 6.66

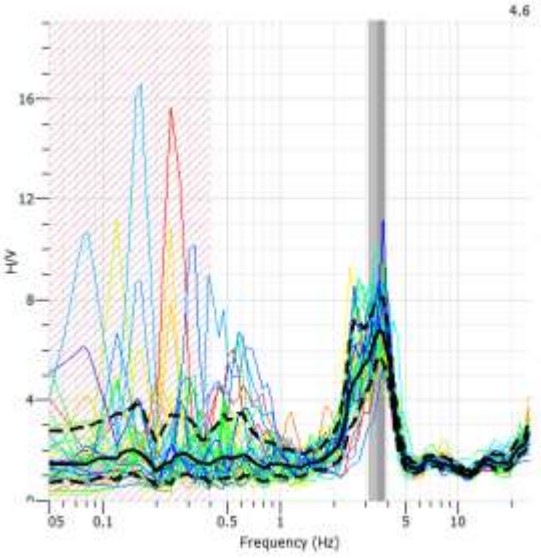


Figura 192. Frecuencia Vs H/V – Seminario Mayor sensor 4.6

1.9.5.3.2 SPAC

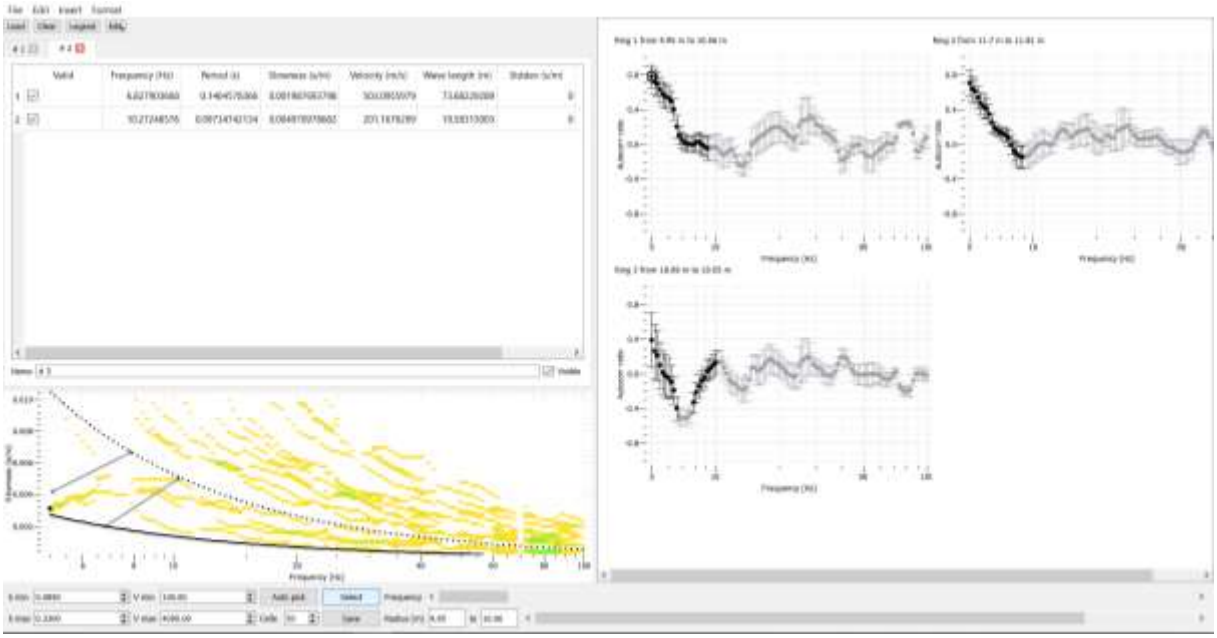


Figura 193. Histogramas de fase y curvas de auto correlación – Seminario Mayor – 10.00 m

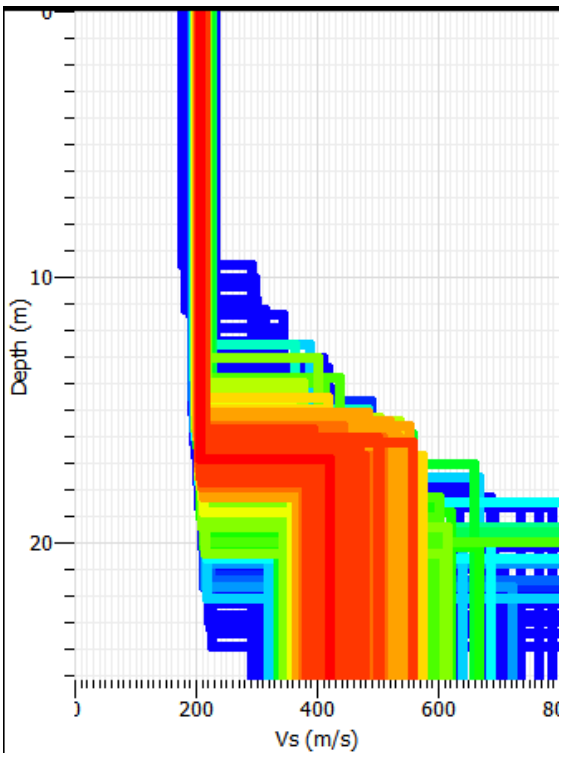


Figura 194. Perfil de velocidad de onda Vs – Seminario Mayor – 10.00 m

1.9.5.4 Arreglo 15.00 m

1.9.5.4.1 H/V

F0	3.08+/-0.30 Hz	F0	3.36+/-0.43 Hz
A0	7.77	A0	6.30

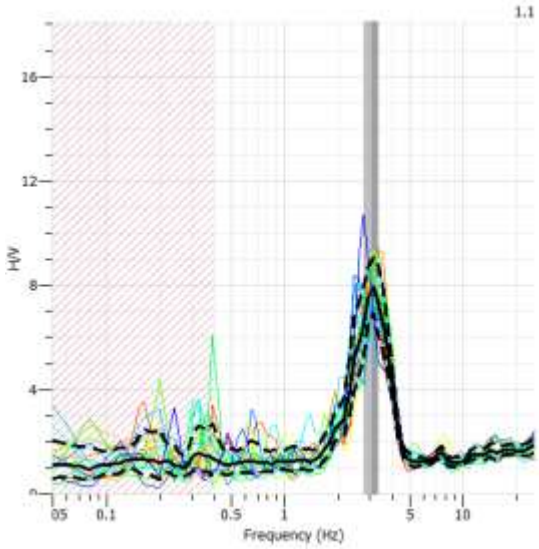


Figura 195. Frecuencia Vs H/V – Seminario Mayor sensor 1.1

F0 3.00+/-0.29 Hz

A0 11.36

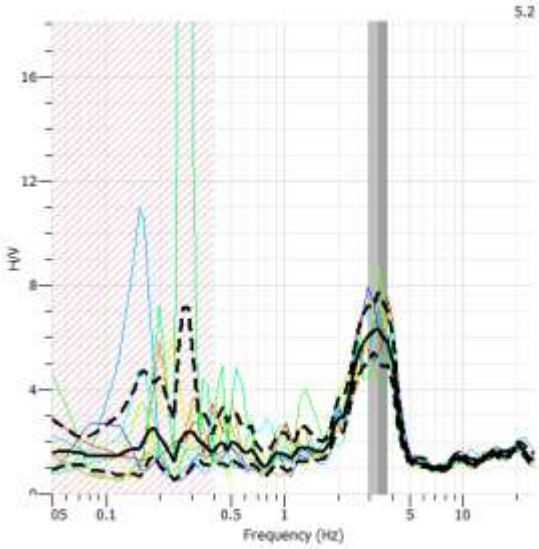


Figura 196. Frecuencia Vs H/V – Seminario Mayor sensor 5.2

F0 2.91+/-0.19 Hz

A0 12.0

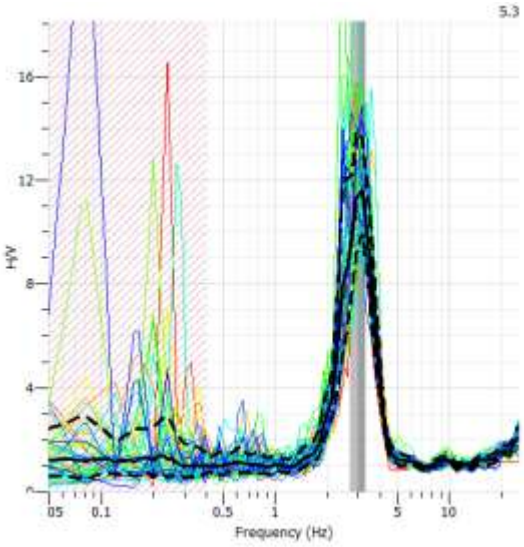


Figura 197. Frecuencia Vs H/V – Seminario Mayor sensor 5.3

F0 3.21+/-0.46 Hz

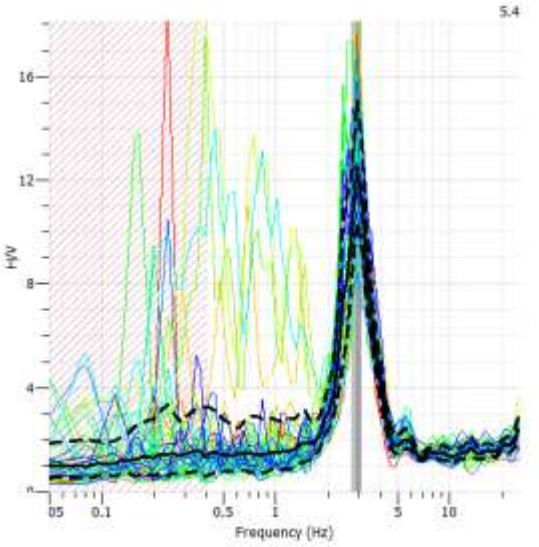


Figura 198. Frecuencia Vs H/V – Seminario Mayor sensor 5.4

F0 3.57+/-0.33 Hz

A0 10.48

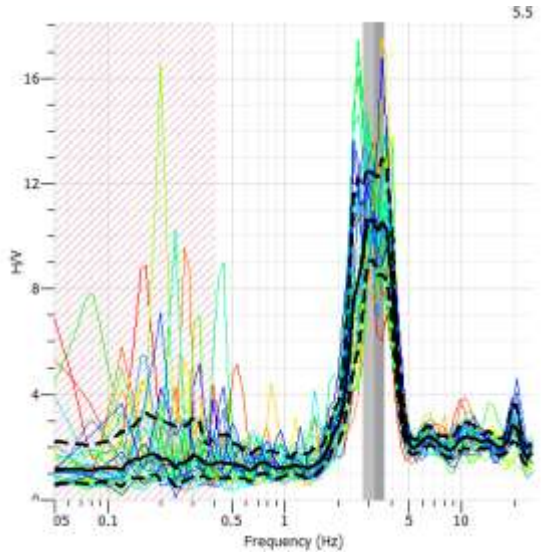


Figura 199. Frecuencia Vs H/V – Seminario Mayor sensor 5.5

A0 6.92

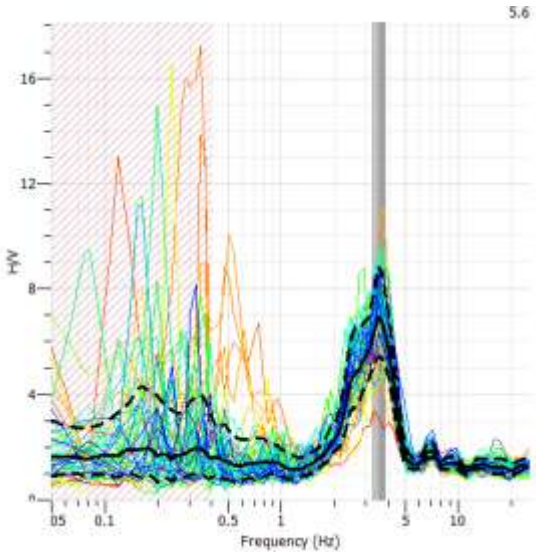


Figura 200. Frecuencia Vs H/V – Seminario Mayor sensor 5.6

1.9.5.4.2 SPAC

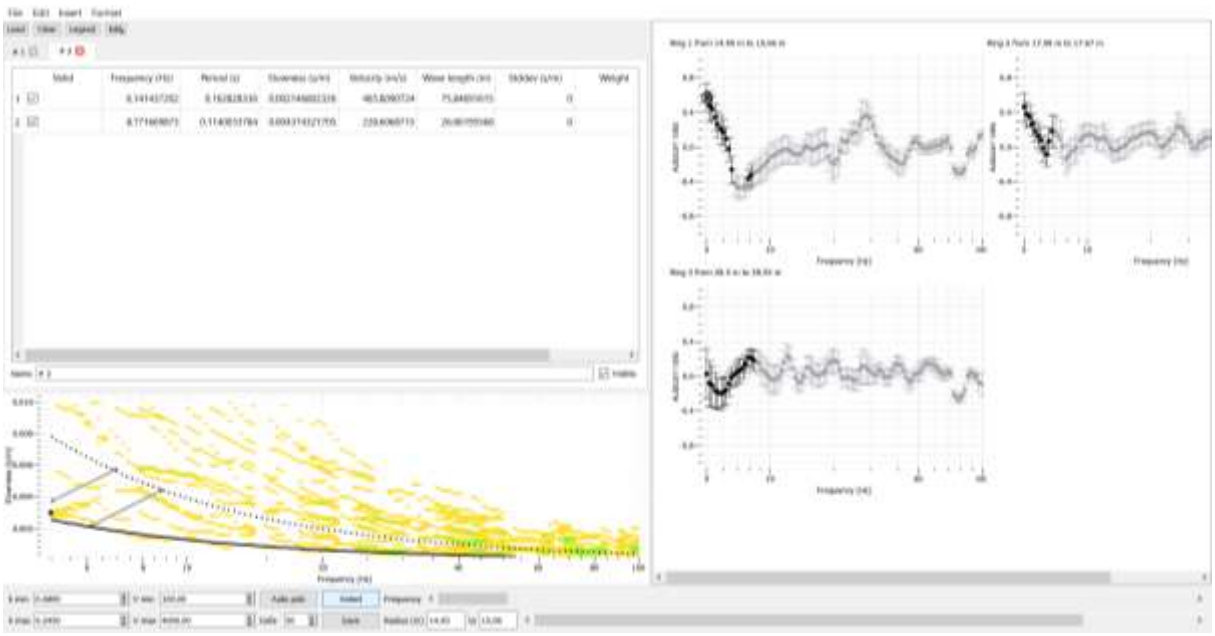


Figura 201. Histogramas de fase y curvas de auto correlación – Seminario Mayor – 15.00 m

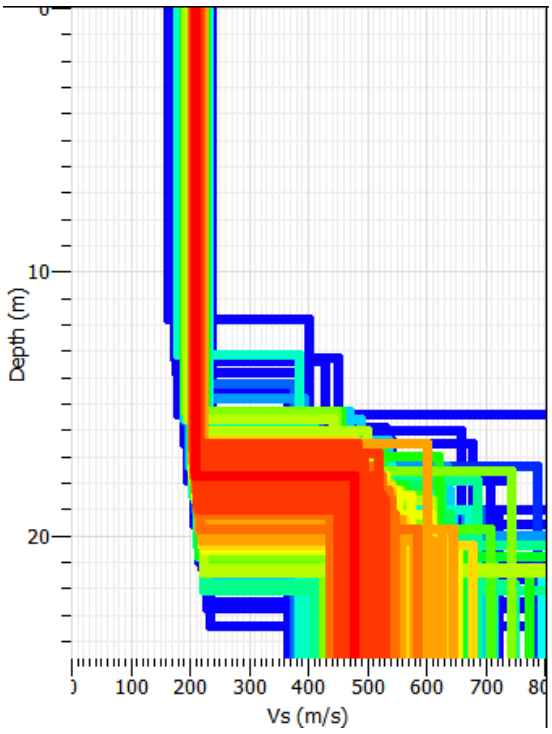


Figura 202. Perfil de velocidad de onda Vs – Seminario Mayor – 15.00 m

1.9.5.5 Comprobación del SPAC con el H/V

Tabla 5. Datos de entrada para la comprobación del SPAC –Seminario Mayor

BETA(m/s)	RO(t/m^3)	H(m)	CSI(%)
200.0	1.80	17.00	1.0
420.0	1.80	23.00	1.0
1500.0	1.80	30.00	1.0

1.9.6 Presa la Fe

1.9.6.1 Arreglo 2.50 m

1.9.6.1.1 H/V

F0 3.00+/-0.36 Hz F0 2.87+/-0.39 Hz

A0 6.93

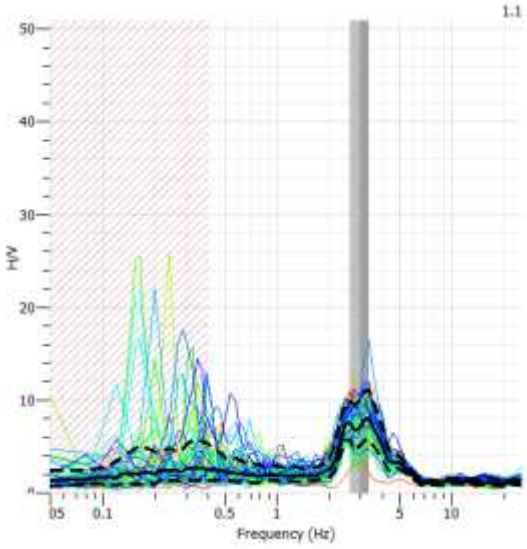


Figura 203. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 1.1

A0 5.72

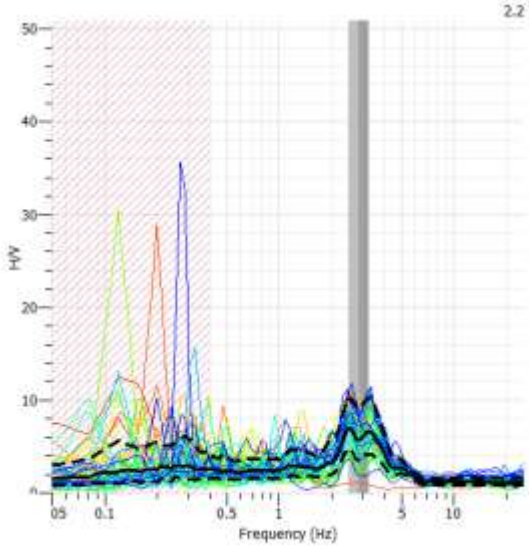


Figura 204. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 2.2

F0 2.82+/-0.41 Hz

A0 4.92

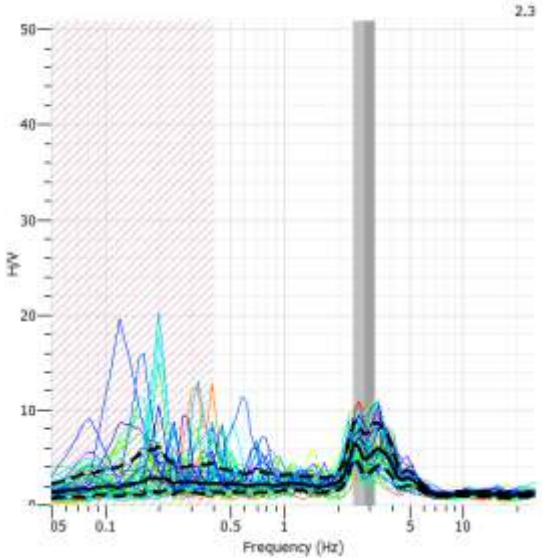


Figura 205. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 2.3

F0 2.86+/-0.39Hz

A0 6.90

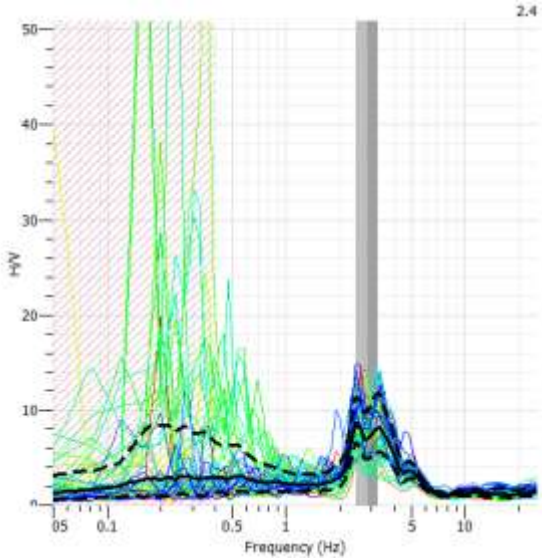


Figura 206. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 2.4

F0

A0

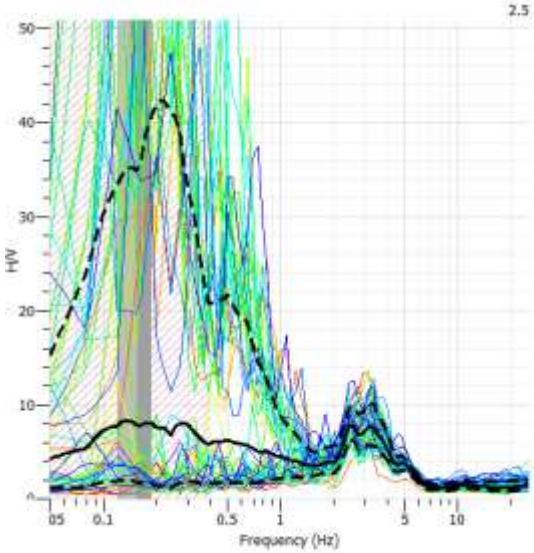


Figura 207. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 2.5

F0 3.05+/-0.40

A0 5.66

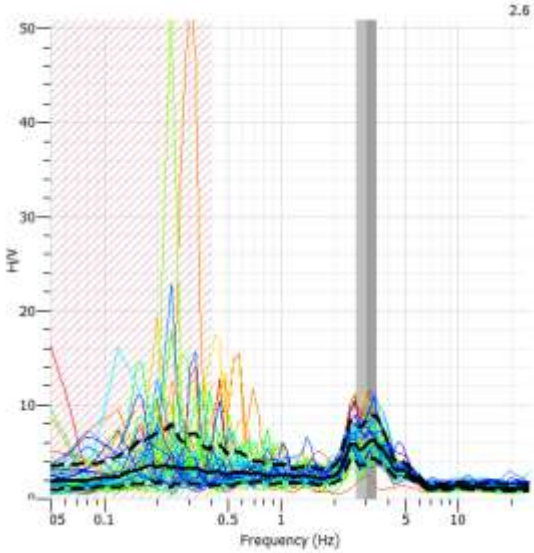


Figura 208. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 2.6

1.9.6.1.2 SPAC

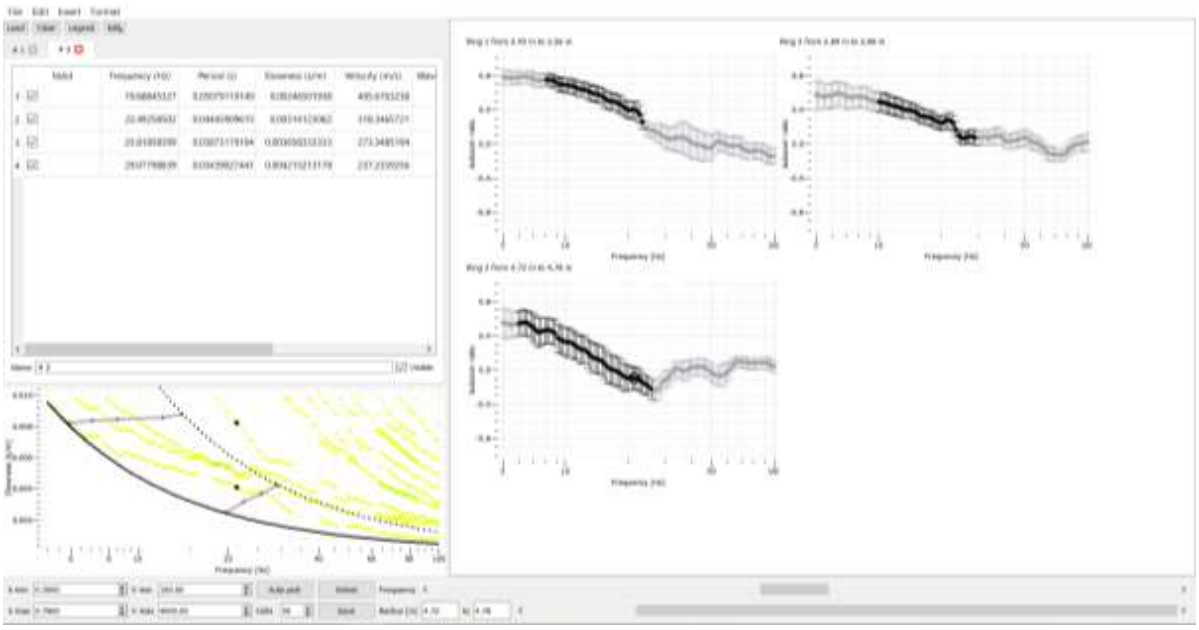


Figura 209. Histogramas de fase y curvas de auto correlación – Presa la Fe –2.00 m

Debido a la tendencia descendente de las curvas del histograma de fase, no se logra realizar la inversión de la curva y por ende obtener las velocidades de onda.

1.9.6.2 Arreglo 5.00 m

1.9.6.2.1 H/V

F0 3.03+/-0.34 Hz
A0 8.67

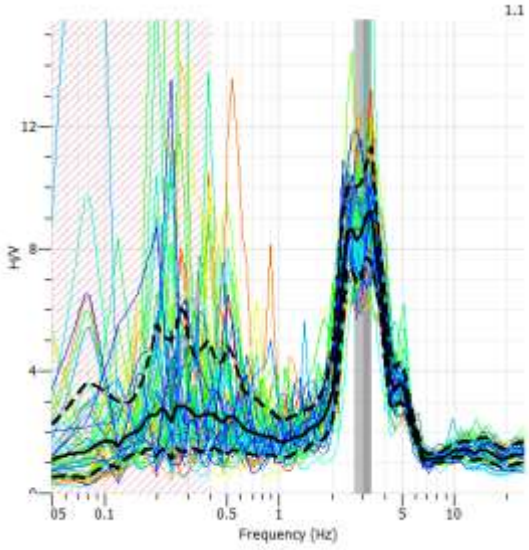


Figura 210. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 1.1

F0 2.82+/-0.41 Hz
A0 6.10

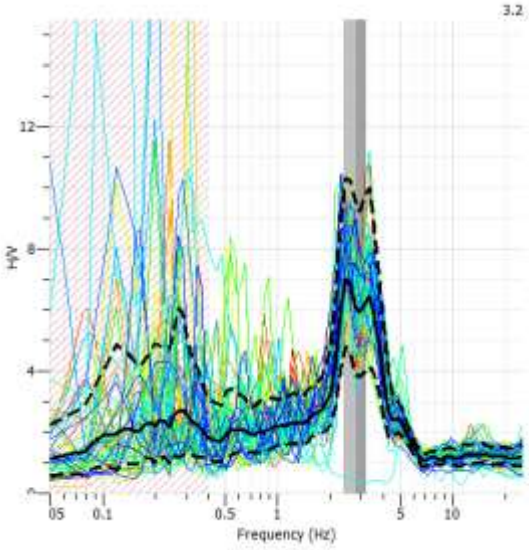


Figura 211. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 3.2

F0 2.88+/-0.43 Hz
A0 6.43

F0 2.89+/-0.39Hz
A0 9.11

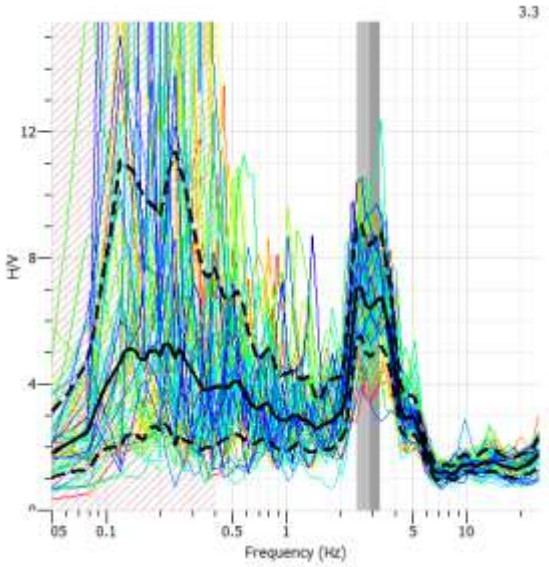


Figura 212. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 3.3

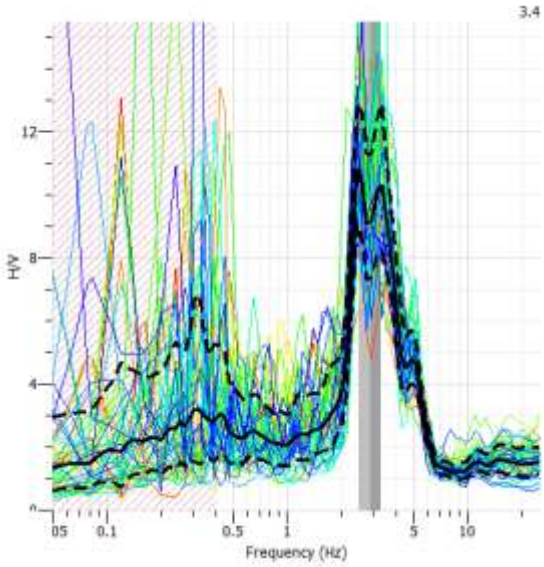


Figura 213. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 3.4

F0 2.90+/-0.39 Hz

A0 9.48

F0 2.95+/-0.40

A0 5.88

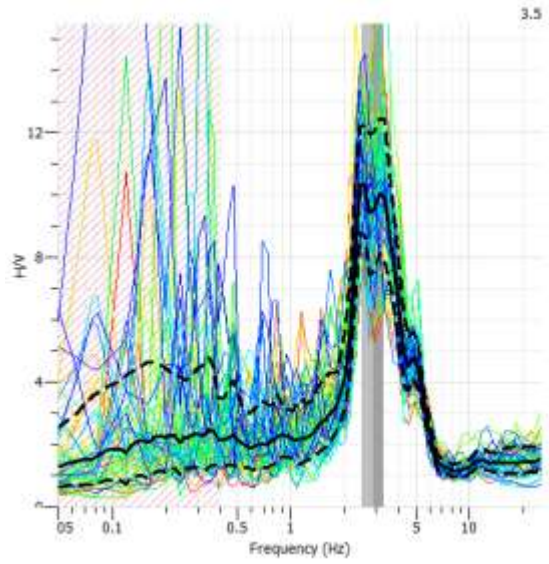


Figura 214. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 3.5

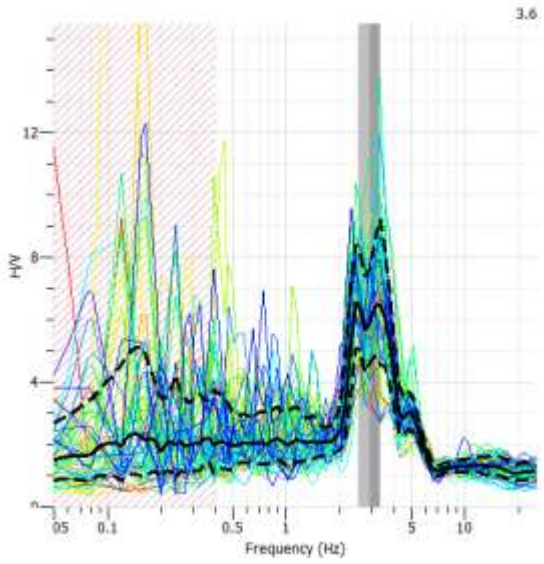


Figura 215.. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 3.6

1.9.6.2.2 SPAC

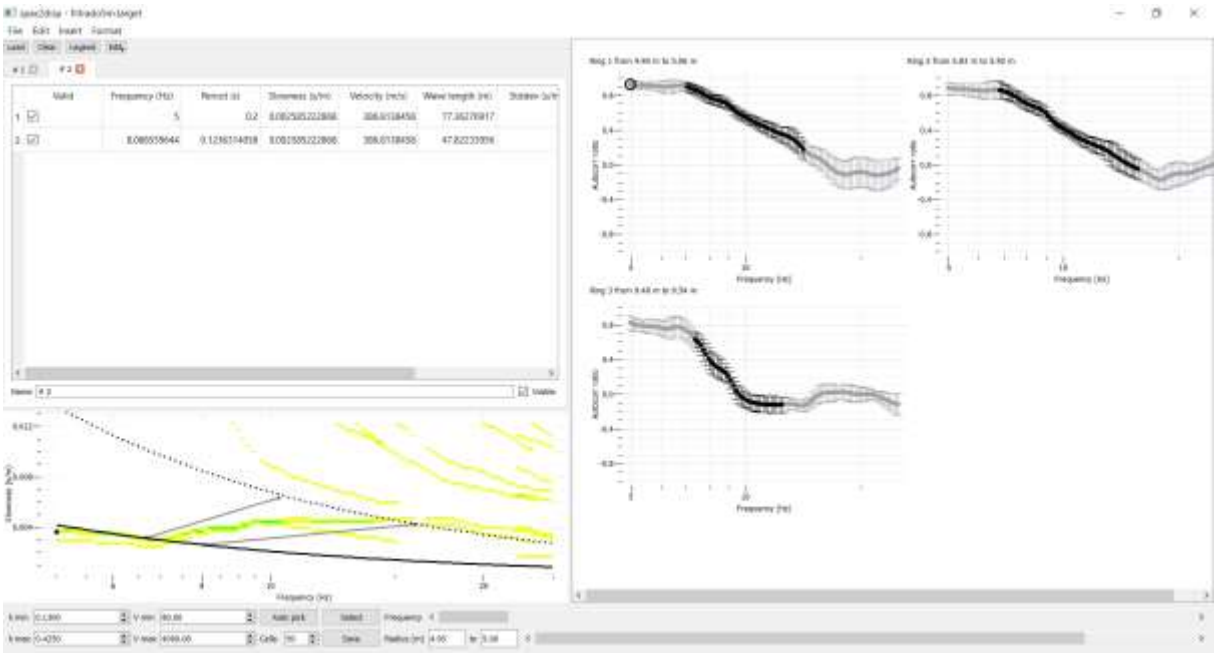


Figura 216. Histogramas de fase y curvas de auto correlación – Presa la Fe –5.00 m

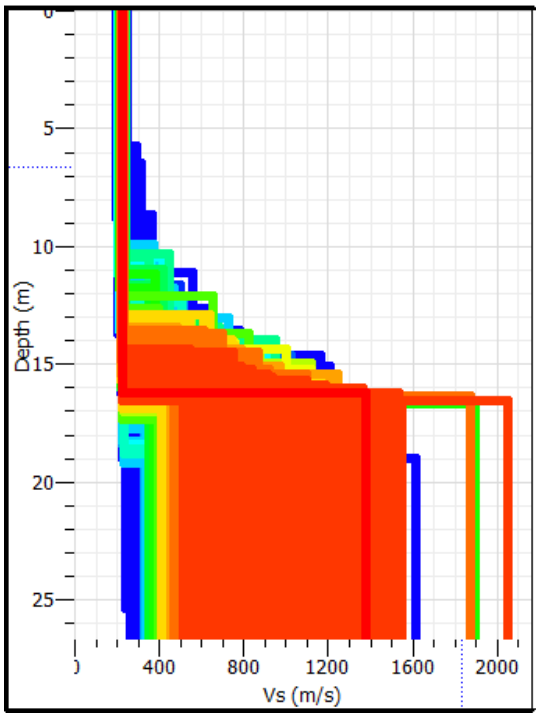


Figura 217. Perfil de velocidad de onda Vs – Presa la Fe – 5.00 m

1.9.6.3 Arreglo 10.00 m

1.9.6.3.1 H/V

F0	2.86+/-0.38 Hz
A0	8.67

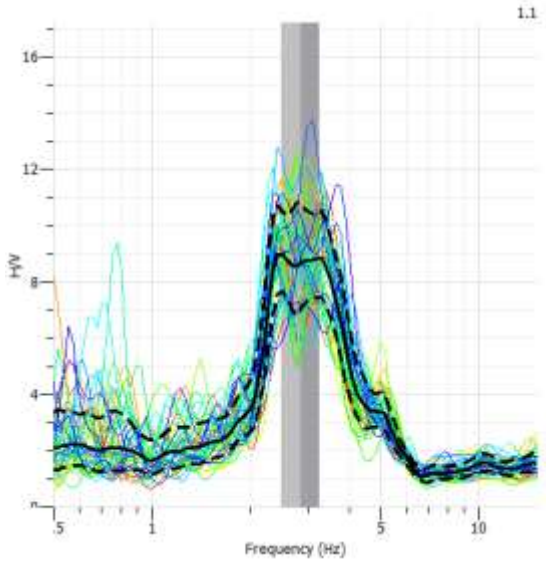


Figura 218. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 1.1

F0	2.68+/-0.48 Hz
A0	6.39

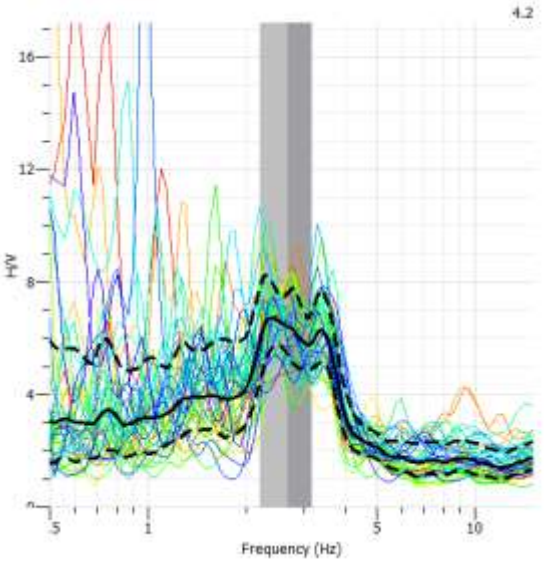


Figura 219. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 4.2

F0	2.91+/-0.39 Hz
A0	8.05

F0	
A0	

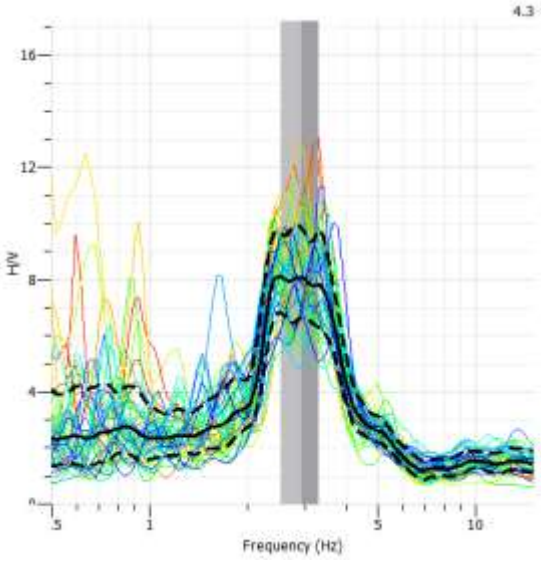


Figura 220. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 4.3

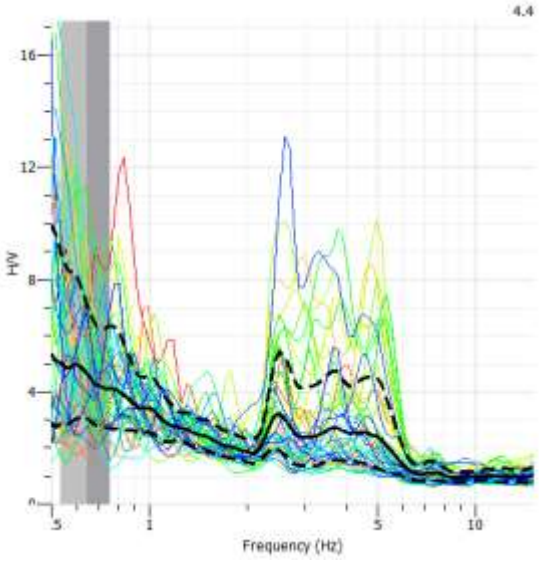


Figura 221. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 4.4

F0

A0

F0 2.82+/-0.46

A0 5.34

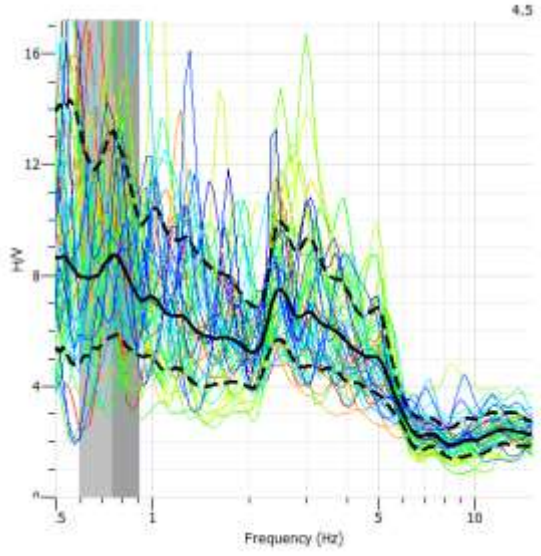


Figura 222. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 4.5

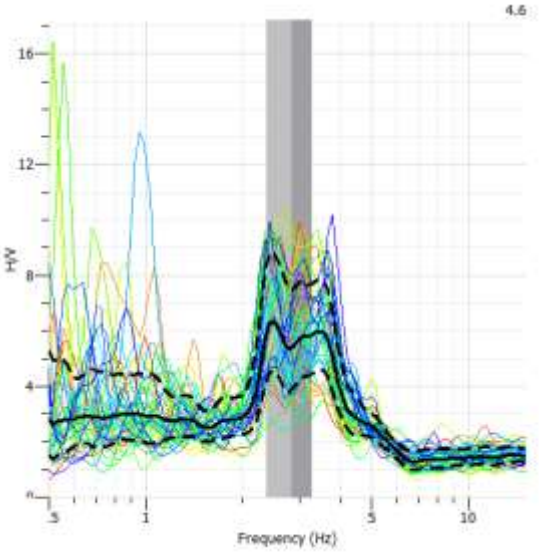


Figura 223. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 4.6

1.9.6.3.2 SPAC

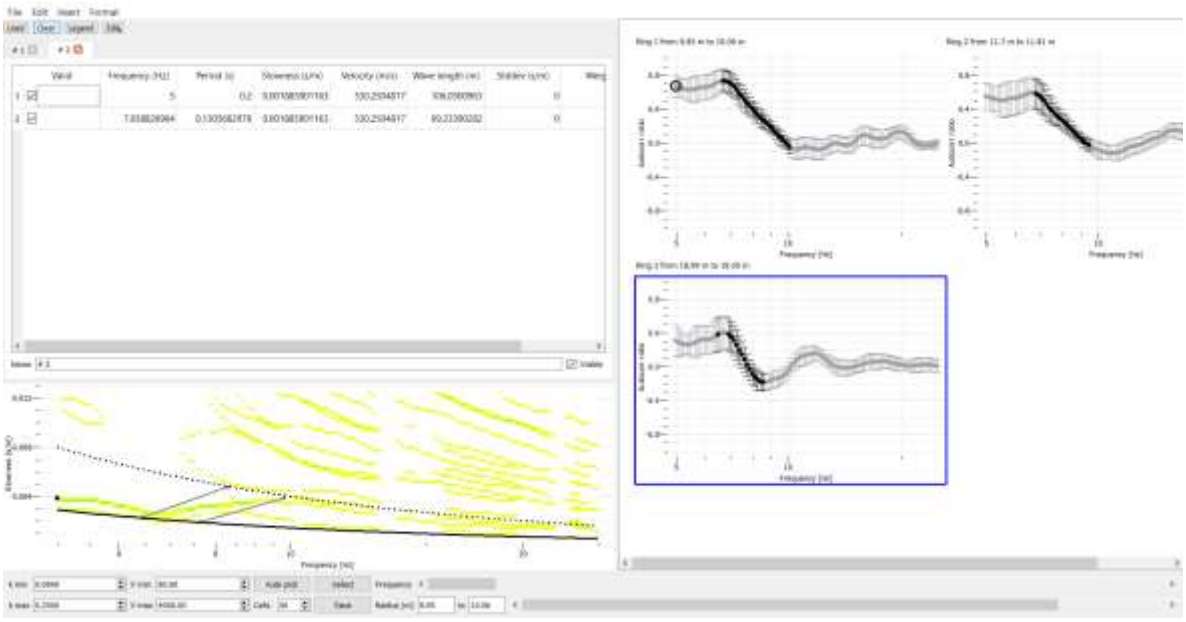


Figura 224. Histogramas de fase y curvas de auto correlación – Presa la Fe – 10.00 m

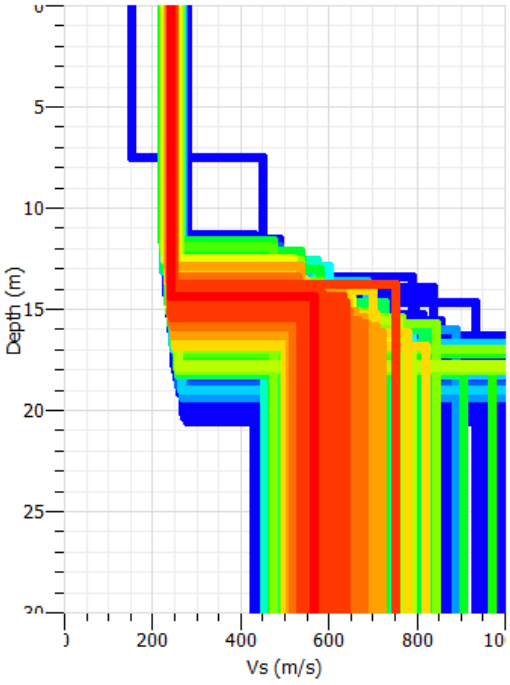


Figura 225. Perfil de velocidad de onda Vs – Presa la Fe – 10.00 m

1.9.6.4 Arreglo 15.00 m

1.9.6.4.1 H/V

F0 2.81+/-0.40Hz

A0 6.79

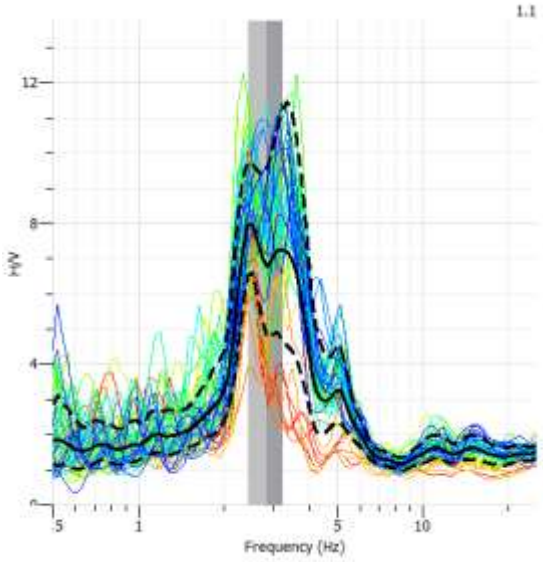


Figura 226. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 1.1

F0 2.77+/-0.40 Hz

A0 6.14

F0

A0

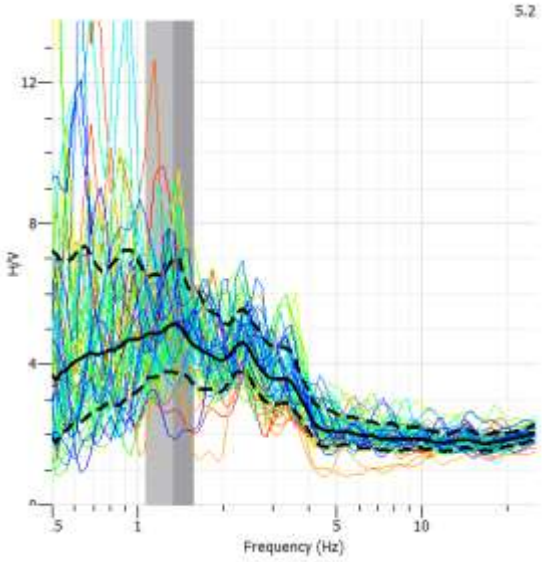


Figura 227. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 5.2

F0 2.63+/-0.43Hz

A0 5.80

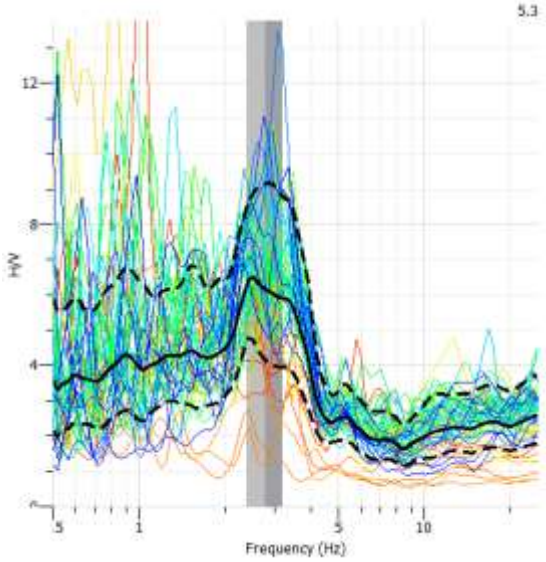


Figura 228. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 5.3

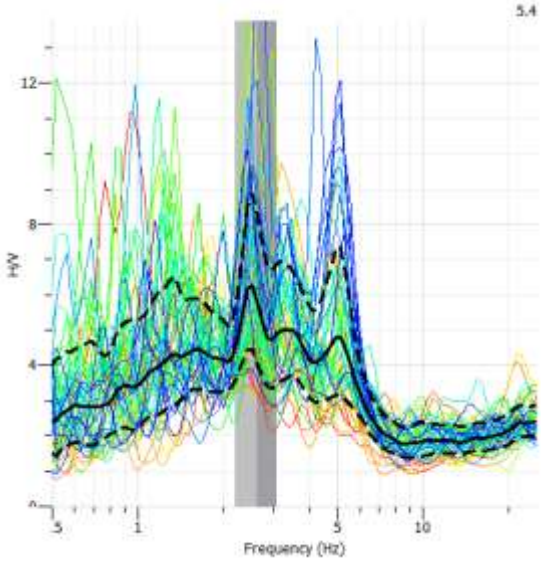


Figura 229. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 5.4

F0 2.66+/-0.41

A0 4.11

F0 2.66+/-0.36

A0 6.22

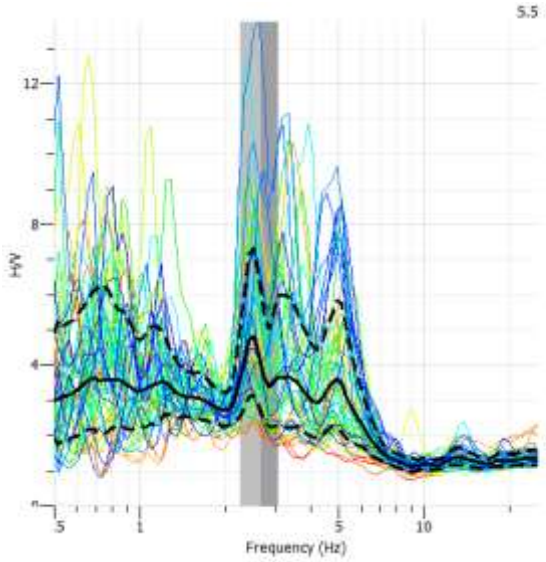


Figura 230. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 5.5

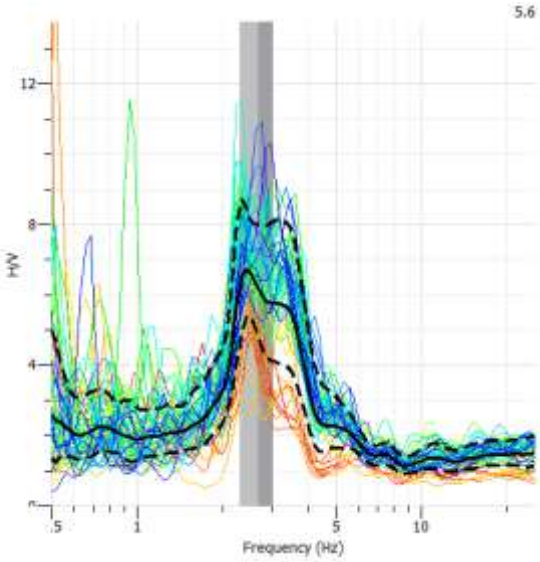


Figura 231. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 5.6

1.9.6.4.2 SPAC

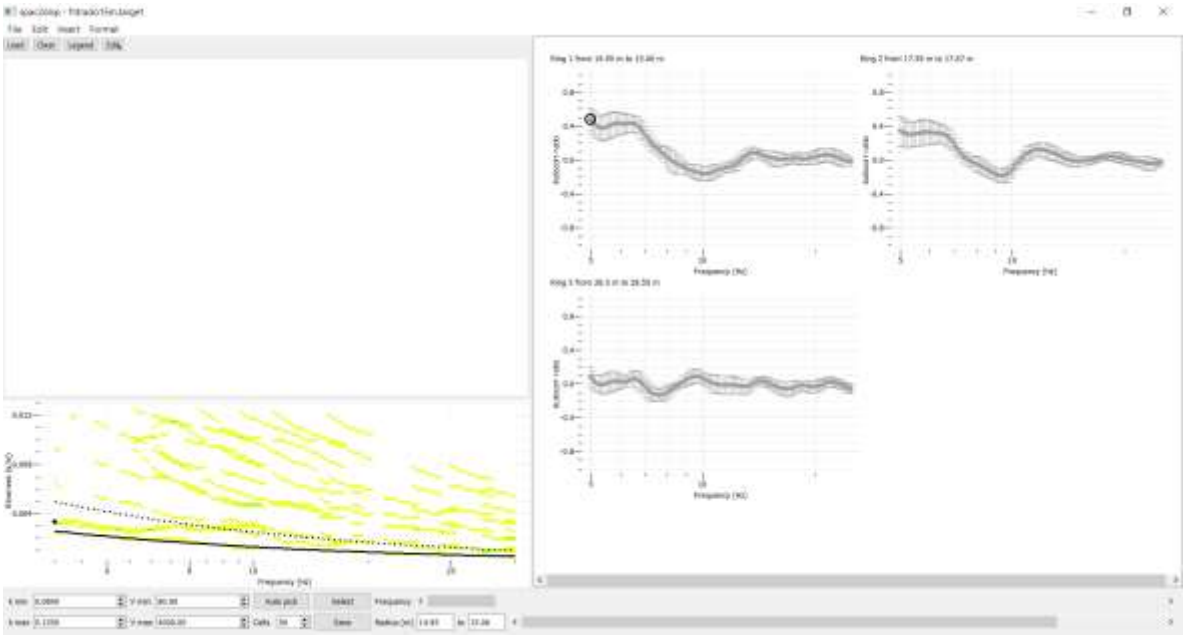


Figura 232. Histogramas de fase y curvas de auto correlación – Presa la Fe – 15.00 m

Debido a la tendencia descendiente de las curvas del histograma de fase, no se logra realizar la inversión de la curva y por ende obtener las velocidades de onda.

1.9.6.5 Arreglo 20.00 m

1.9.6.5.1 H/V

F0	2.83+/-0.35 Hz	F0
A0	8.00	A0

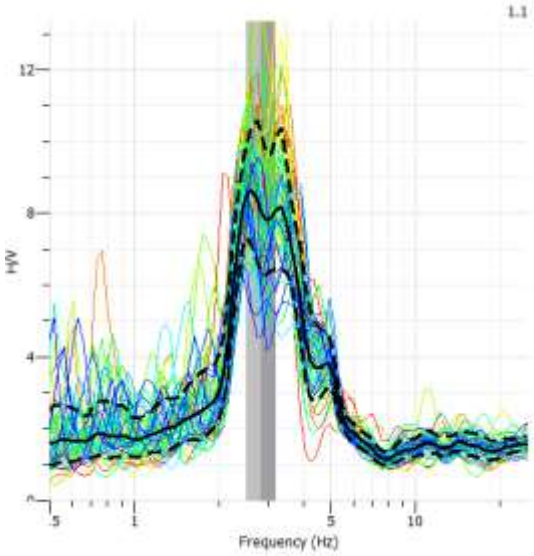


Figura 233. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 1.1

F0 2.82+/-0.49 Hz

A0 6.82

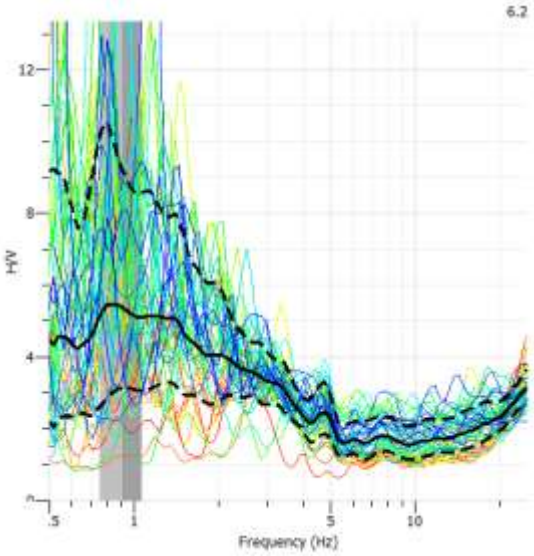


Figura 234. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 6.2

F0

A0

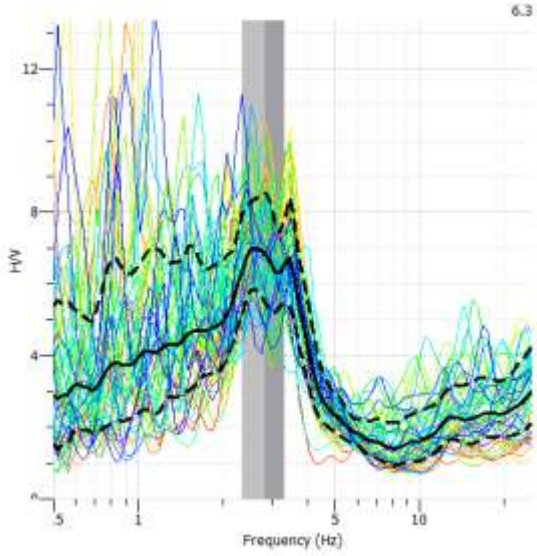


Figura 235. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 6.3

F0 2.64+/-0.51

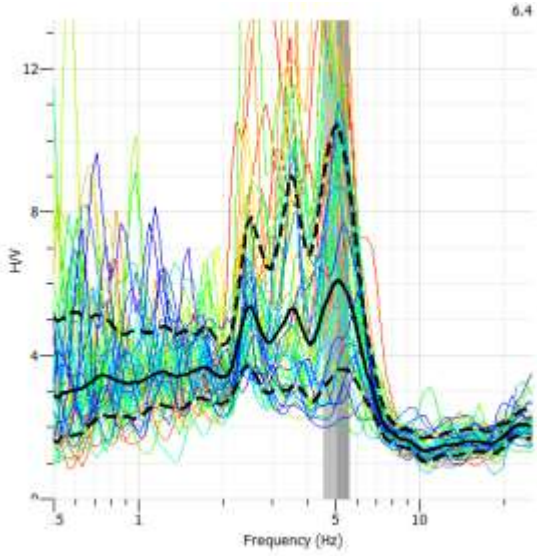


Figura 236. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 6.4

F0 2.73+/-0.36

A0 6.93

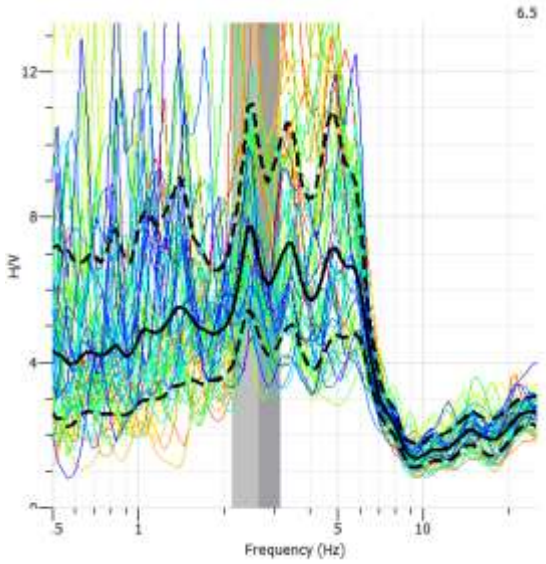


Figura 237. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 6.5

A0 4.17

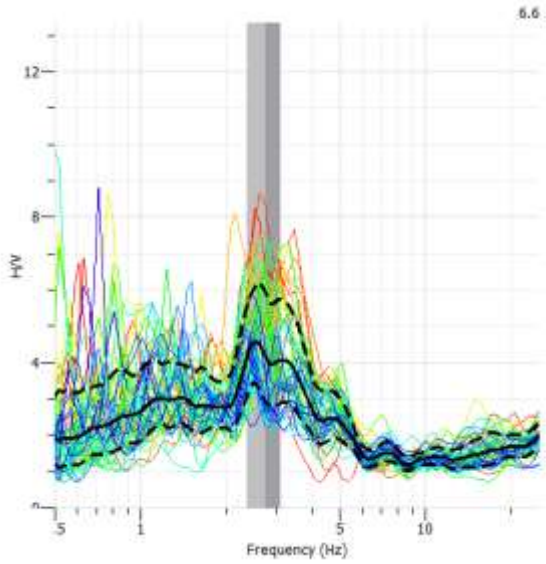


Figura 238. Frecuencia Vs H/V – Presa sensor 6.6

1.9.6.5.2 SPAC

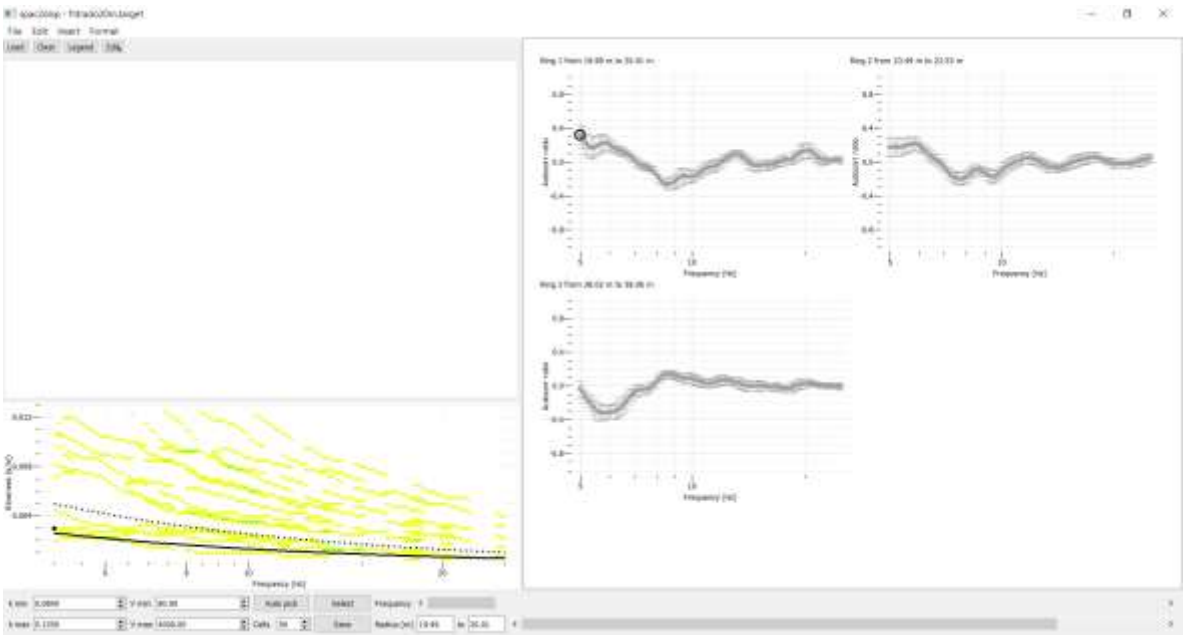


Figura 239. Histogramas de fase y curvas de auto correlación – Presa la Fe – 20.00 m

Debido a la tendencia descendiente de las curvas del histograma de fase, no se logra realizar la inversión de la curva y por ende obtener las velocidades de onda.