
**Aplicación del método de Nakamura H/V, para estudiar el
riesgo sísmico en la zona comprendida por el despliegue de
estaciones IMAD.**

por

Romina Ulloa

Profesor guía:
Matthew Miller.

DGEO Carrera de Geofísica

Departamento de Geofísica

Facultad de Cs. Físicas y Matemáticas

Universidad de Concepción

Av. Esteban Iturra s/n, Ciudad Universitaria

Casilla 160-C, Concepción,

CHILE

Marzo 2018

Copyright © 2018.

Aplicación del método de Nakamura H/V, para estudiar el riesgo sísmico en la zona comprendida por el despliegue de estaciones IMAD.

Romina Ulloa

Profesor guía:
Matthew Miller.

Departamento de Geofísica
Facultad de Cs. Físicas y Matemáticas
Universidad de Concepción

21 de marzo de 2018

1. Agradecimientos.

Por levantarme y alentarme a seguir cuando mis fuerzas flaqueaban le agradezco a Dios, le agradezco por las personas que puso a mi lado a lo largo de este camino. Gracias a mi esposo Rodrigo que conocí en esta universidad y el cuál me ha acompañado incondicionalmente, gracias por su ayuda, amor, paciencia y consejos, eres mi gran bendición. Gracias a mis padres y a mis hermanos por su cariño y por la ayuda que en diversas formas me han brindado a lo largo de mi vida, gracias por su confianza en mí, por librarme de tareas y preocupaciones con tal de que tuviera tiempo suficiente para sentirme segura con lo aprendido antes de cada certamen.

Gracias al profe Matt, mi profe guía por darse el tiempo de revisar esta tesis y hacer las correcciones necesarias, gracias por su paciencia y buen humor, hoy puede descansar de otra de las tantas tesis que ha precedido. Les agradezco también a la comisión evaluadora por dedicarse a leer esta tesis y estar presentes el día de mi presentación.

Gracias también a todos mis tíos a mis suegros y familiares que han estado pendientes de mi y me han ayudado. Desearía que mis cuatro abuelitos pudieran estar en mi presentación hoy pero dos de ustedes se fueron durante el transcurso de mi carrera, de todas formas estoy convencida que al igual que mi abuelita Teresita y mi abuelito Min estarían orgullosos y que ellos les representarán hoy.

Tampoco puedo dejar de agradecer a esos amigos que son la familia que cada uno puede elegir y que me han apoyado y alegraron mis días en esta universidad y fuera de ella, muchas gracias.

Feliz puedo decir que al fin llegó el día en que una nueva etapa, fruto no solo de mi esfuerzo sino que el de muchos, ha culminado y a todos les digo que ahora pueden decir libremente que su hija, esposa, nieta, hermana etc., es una Geofísica titulada en la Universidad de Concepción.

Índice

1	Agradecimientos.	II
2	Resumen	1
3	Introducción:	2
3.1	Hipótesis	4
3.2	Objetivos	4
3.2.1	Objetivo principal.	4
3.2.2	Objetivos secundarios.	5
4	Marco teórico	6
4.1	Teoría del método de Nakamura:	6
4.2	Elección de curvas H/V	9
4.2.1	Condiciones para la confiabilidad de la curva.	9
4.2.2	Condiciones para la claridad de la curva.	10
4.2.3	Espectros de potencia:	10
4.2.4	Ecuación para el cálculo de las curvas H/V:	11
4.2.5	Demostración matemática para calcular la varianza a través del promedio de varianzas muestrales.	11
5	Metodología:	14
5.1	Obtención de los datos:	14
5.2	Descripción importante de los datos descargados:	14
5.3	Software utilizados:	14
5.4	Procesamiento de los datos:	15

5.5	Selección de datos:	15
5.5.1	Limpieza de la señal y obtención de los espectros de potencia: . . .	17
5.6	Curvas H/V	18
5.6.1	Manipulación de las curvas H/V:	19
5.6.2	Cálculo de la curva H/V promedio por estación:	19
5.6.3	Cálculo de la desviación estándar entre las curvas H/V para cada estación:	20
5.6.3.1	Ejemplificación del cálculo de varianza mediante el promedio de varianzas muestrales	20
5.7	Efecto de sitio	21
6	Resultados y análisis	22
6.1	Roca Sedimentaria	22
6.2	Roca Volcanosedimentaria.	28
6.3	Roca Volcánica	30
6.4	Roca Intrusiva	33
6.5	Roca Metamórfica	36
6.6	Correlaciones	39
6.6.1	Frecuencia v/s H/V.	39
6.6.2	H/V v/s efecto de sitio.	41
6.6.3	Frecuencia y efecto de sitio.	44
6.6.4	H/V v/s V_{S30}	46
6.6.5	Frecuencia v/s V_{S30}	48
6.6.6	H/V v/s MRVBF.	51
6.6.7	Frecuencia v/s MRVBF.	53
7	Conclusión.	60

8 Bibliografía	62
Apéndices	64
A Apéndice Tablas	64
B Apéndice Tablas 2	70
C Apéndice Imágenes	76

Índice de cuadros

1	Esta tabla muestra las categorías de clasificación del suelo según el NEHRP asociadas a los rangos de V_{s30} elegidos por Allen y Wald (2007), para generar mapas de este parámetro, basados en modelos digitales de elevación (DEM).	9
2	Metadata de la estación L009	14
3	Valores de correlaciones calculados.	39
A.1	En este cuadro se observan los resultados obtenidos para los peak <1 Hz de aquellas estaciones con dos peak.	64
A.2	En este cuadro se observan los resultados obtenidos para los peak >1 Hz de aquellas estaciones con dos peak.	65
A.3	En este cuadro se observan los resultados obtenidos para las estaciones con 1 solo peak.	67
A.4	En este cuadro se observan los resultados obtenidos para los peak mayores, de mayor amplitud.	69
B.1	Valores encontrados para estaciones en roca sedimentaria con 1 peak. . . .	70
B.2	Valores encontrados para estaciones en roca sedimentaria, peak <1 Hz. . . .	71
B.3	Valores encontrados para estaciones en roca sedimentaria, peak >1 Hz. . . .	72
B.4	Valores encontrados para estaciones en roca volcanosedimentaria con 1 peak. . . .	72
B.5	Valores encontrados para estaciones en roca volcánica con 1 peak.	73
B.6	Valores encontrados para estaciones en roca volcánica, peak <1 Hz.	73
B.7	Valores encontrados para estaciones en roca volcánica, peak >1 Hz.	74
B.8	Valores encontrados para estaciones en roca intrusiva con 1 peak.	74
B.9	Valores encontrados para estaciones en roca metamórfica con 1 peak.	75

Índice de figuras

1	Ubicaciones de dos edificios adyacentes diseñados con el uso de diferentes condiciones del sitio en Concepción (mapa y vista aérea).	2
2	Distribución de las estaciones de la red IMAD utilizadas.	4
3	A- Espectro de potencia de una señal entre los límites de ruido sísmico. B- Espectro de potencia de una señal fuera de los límites de ruido sísmico (NHNM).	11
4	Ruido sísmico de cada componente, correspondiente al día 101 de la estación QC09.	15
5	A- Señales SAC con instantes sin datos registrados. B- Señales SAC unidas.	16
6	Señal correspondiente al día 101 de la estación QC09, componente HHE y acercamiento a modo de ejemplo de una hora entre los tiempos T1 y T2. .	17
7	Siete espectros H/V superpuestos de la estación QC09.	18
8	A- Curva H/V promedio \pm el doble de la desviación estandar. B- Ajuste polinomial para las curvas H/V promedio \pm el doble de la desviación estandar.	19
9	Esta imagen ejemplifica que la señal fue cortada en grupos de una hora y se trasladó cada un minuto, para calcular la varianza sistemática.	21
10	Histograma para las estaciones sobre suelo sedimentario con sólo 1 peak. .	22
11	Estación U55B y U09B. A la izquierda se indica en el mapa geológico sobre que tipo de roca se encuentran las estaciones, y a su derecha las curvas H/V respectivas para cada estación.	23
12	A la izquierda, las estaciones U43BF y U69B en roca sedimentaria (círculo verde) y la estación U62B perteneciente a roca volcanosedimentaria (círculo morado). A la derecha sus respectivas curvas H/V.	25
13	A la izquierda se observan las estaciones U74B y U65B (círculos verdes), sobre roca sedimentaria. A la derecha sus respectivas curvas H/V.	26
14	Histograma para las estaciones con 2 peak sobre suelo sedimentario. A- Casos de frecuencias peak menores que 1 Hz. B- Casos de frecuencias peak mayores que 1 Hz.	27
15	A la izquierda se ve a la estación U32B sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación.	28

16	Histograma para las estaciones sobre suelo volcano-sedimentario con sólo 1 peak.	28
17	Estaciones QC01 y U62B en roca volcano-sedimentaria. A su derecha sus respectivas curvas H/V.	29
18	Histograma para las estaciones sobre suelo volcánico con sólo 1 peak.	30
19	Estación L103 sobre una geología de roca volcánica. A su derecha el espectro de curva H/V de la estación.	31
20	Histograma para las estaciones con 2 peak sobre suelo volcánico. A- Casos de frecuencias peak menores que 1 Hz. B- Casos de frecuencias peak mayores que 1Hz.	32
21	Estaciones L106 y U11B en roca volcánica. A la derecha se observan sus respectivas curvas H/V.	33
22	Histograma para las estaciones sobre roca intrusiva con sólo 1 peak.	34
23	Estaciones QC10 y QF11 en roca intrusiva (círculos azules). A la derecha sus respectivos espectros H/V	35
24	Estaciones QF14 y QC06 en suelo intrusivo y sus respectivas curvas H/V.	36
25	Histograma para las estaciones sobre roca metamórfica con sólo 1 peak.	37
26	Estación U57B en suelo metamórfico y su respectivo espectro H/V.	37
27	Estación U16B en suelo metamórfico y a su derecha su espectro H/V.	38
28	Correlaciones Frecuencia(Hz) v/s H/V, Peak <1 Hz.	40
29	Correlaciones Frecuencia(Hz) v/s H/V, Peak >1 Hz.	40
30	Correlaciones Frecuencia(Hz) v/s H/V, 1 Peak.	41
31	Correlaciones Frecuencia(Hz) v/s H/V, Peak mayor.	41
32	Correlaciones H/V v/s Efecto de sitio, Peak <1 Hz.	42
33	Correlaciones H/V v/s Efecto de sitio, Peak >1 Hz.	43
34	Correlaciones H/V v/s Efecto de sitio, 1 Peak.	43
35	Correlaciones H/V v/s Efecto de sitio, Peak mayor.	44
36	Correlaciones Frecuencia(Hz) v/s Efecto de sitio, Peak <1 Hz.	45

37	Correlaciones Frecuencia(Hz) v/s Efecto de sitio, Peak >1 Hz.	45
38	Correlaciones Frecuencia(Hz) v/s Efecto de sitio, 1 Peak.	46
39	Correlaciones Frecuencia(Hz) v/s Efecto de sitio, Peak mayor.	46
40	Correlaciones H/V v/s V_{S30} , Peak <1 Hz.	47
41	Correlaciones H/V v/s V_{S30} , Peak >1 Hz.	47
42	Correlaciones H/V v/s V_{S30} , 1 Peak.	48
43	Correlaciones H/V v/s V_{S30} , Peak mayor.	48
44	Correlaciones Frecuencia(Hz) v/s V_{S30} , Peak <1 Hz.	49
45	Correlaciones Frecuencia(Hz) v/s V_{S30} , Peak >1 Hz.	49
46	Correlaciones Frecuencia(Hz) v/s V_{S30} , 1 Peak.	50
47	Correlaciones Frecuencia(Hz) v/s V_{S30} , Peak mayor.	50
48	Correlaciones H/V v/s MRVBF, Peak <1 Hz.	51
49	Correlaciones H/V v/s MRVBF, Peak >1 Hz.	52
50	Correlaciones H/V v/s MRVBF, 1 Peak.	52
51	Correlaciones H/V v/s MRVBF, Peak mayor.	53
52	Correlaciones Frecuencia(Hz) v/s MRVBF, Peak <1 Hz.	53
53	Correlaciones Frecuencia(Hz) v/s MRVBF, Peak >1 Hz.	54
54	Correlaciones Frecuencia(Hz) v/s MRVBF, 1 Peak.	54
55	Correlaciones Frecuencia(Hz) v/s MRVBF, Peak mayor.	55
56	Dispersión entre las variables MRVBF y H/V(F_{01}), peak <1 Hz	56
57	Dispersión entre las variables H/V(F_{02}) y F_{02} , peak >1 Hz.	57
58	Dispersión entre las variables efecto de sitio y H/V(F_{02}), 1 peak	58
59	Dispersión entre las variables efecto de sitio y H/V(F_0), peak mayor.	59
C.1	A la izquierda se ve a la estación QF12 sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 peak.	76

C.2	A la izquierda se ve a la estación U07B sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 peak.	77
C.3	A la izquierda se ve a la estación U09B sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 peak.	77
C.4	A la izquierda se ve a la estación U12B sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 peak.	78
C.5	A la izquierda se ve a la estación U26B sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 peak.	78
C.6	A la izquierda se ve a la estación U28B sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 peak.	79
C.7	A la izquierda se ve a la estación U36B sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 peak.	79
C.8	A la izquierda se ve a la estación U41B sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 peak.	80
C.9	A la izquierda se ve a la estación U43B sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 peak.	80
C.10	A la izquierda se ve a la estación U45B sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 peak.	81
C.11	A la izquierda se ve a la estación U54B sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 peak.	81
C.12	A la izquierda se ve a la estación U55B sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 peak.	82
C.13	A la izquierda se ve a la estación U60B sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 peak.	82
C.14	A la izquierda se ve a la estación U65B sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 peak.	83
C.15	A la izquierda se ve a la estación U69B sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 peak.	83
C.16	A la izquierda se ve a la estación U71B sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 peak.	84
C.17	A la izquierda se ve a la estación U74B sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 peak.	84

C.18 A la izquierda se ve a la estación L009 sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 2 peak.	85
C.19 A la izquierda se ve a la estación L104 sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 2 peak.	85
C.20 A la izquierda se ve a la estación L105 sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 2 peak.	86
C.21 A la izquierda se ve a la estación QC11 sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 2 peak.	86
C.22 A la izquierda se ve a la estación U32B sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 2 peak.	87
C.23 A la izquierda se ve a la estación U34B sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 2 peak.	87
C.24 A la izquierda se ve a la estación U35B sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 2 peak.	88
C.25 A la izquierda se ve a la estación U44B sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 2 peak.	88
C.26 A la izquierda se ve a la estación U46B sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 2 peak.	89
C.27 A la izquierda se ve a la estación U51B sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 2 peak.	89
C.28 A la izquierda se ve a la estación U52B sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 2 peak.	90
C.29 A la izquierda se ve a la estación U70B sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 2 peak.	90
C.30 A la izquierda se ve a la estación U72B sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 2 peak.	91
C.31 A la izquierda se ve a la estación L103 sobre roca volcánica, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.	92
C.32 A la izquierda se ve a la estación QC07 sobre roca volcánica, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.	92
C.33 A la izquierda se ve a la estación QF15 sobre roca volcánica, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.	93

C.34 A la izquierda se ve a la estación U03B sobre roca volcánica, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.	93
C.35 A la izquierda se ve a la estación U29B sobre roca volcánica, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.	94
C.36 A la izquierda se ve a la estación U64B sobre roca volcánica, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.	94
C.37 A la izquierda se ve a la estación U67B sobre roca volcánica, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.	95
C.38 A la izquierda se ve a la estación L002 sobre roca volcánica, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 2 peak.	96
C.39 A la izquierda se ve a la estación L003 sobre roca volcánica, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 2 peak.	96
C.40 A la izquierda se ve a la estación L106 sobre roca volcánica, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 2 peak.	97
C.41 A la izquierda se ve a la estación QC03 sobre roca volcánica, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 2 peak.	97
C.42 A la izquierda se ve a la estación QC05 sobre roca volcánica, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 2 peak.	98
C.43 A la izquierda se ve a la estación U11B sobre roca volcánica, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 2 peak.	98
C.44 A la izquierda se ve a la estación U30B sobre roca volcánica, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 2 peak.	99
C.45 A la izquierda se ve a la estación U53B sobre roca volcánica, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 2 peak.	99
C.46 A la izquierda se ve a la estación U56B sobre roca volcánica, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 2 peak.	100
C.47 A la izquierda se ve a la estación QC01 sobre roca volcanosedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak. . .	101
C.48 A la izquierda se ve a la estación U62B sobre roca volcanosedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.	101
C.49 A la izquierda se ve a la estación QC02 sobre roca intrusiva, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.	102

C.50 A la izquierda se ve a la estación QC04 sobre roca intrusiva, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.	102
C.51 A la izquierda se ve a la estación QC06 sobre roca intrusiva, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.	103
C.52 A la izquierda se ve a la estación QC09 sobre roca intrusiva, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.	103
C.53 A la izquierda se ve a la estación QC10 sobre roca intrusiva, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.	104
C.54 A la izquierda se ve a la estación QC12 sobre roca intrusiva, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.	104
C.55 A la izquierda se ve a la estación QC14 sobre roca intrusiva, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.	105
C.56 A la izquierda se ve a la estación QF05 sobre roca intrusiva, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.	105
C.57 A la izquierda se ve a la estación QF07 sobre roca intrusiva, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.	106
C.58 A la izquierda se ve a la estación QF11 sobre roca intrusiva, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.	106
C.59 A la izquierda se ve a la estación QF14 sobre roca intrusiva, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.	107
C.60 A la izquierda se ve a la estación QF17 sobre roca intrusiva, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.	107
C.61 A la izquierda se ve a la estación U01B sobre roca intrusiva, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.	108
C.62 A la izquierda se ve a la estación U02B sobre roca intrusiva, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.	108
C.63 A la izquierda se ve a la estación U04B sobre roca intrusiva, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.	109
C.64 A la izquierda se ve a la estación U05B sobre roca intrusiva, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.	109
C.65 A la izquierda se ve a la estación U08B sobre roca intrusiva, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.	110

C.66 A la izquierda se ve a la estación U27B sobre roca intrusiva, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.	110
C.67 A la izquierda se ve a la estación U37B sobre roca intrusiva, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.	111
C.68 A la izquierda se ve a la estación U40B sobre roca intrusiva, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.	111
C.69 A la izquierda se ve a la estación U42B sobre roca intrusiva, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.	112
C.70 A la izquierda se ve a la estación U58B sobre roca intrusiva, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.	112
C.71 A la izquierda se ve a la estación U59B sobre roca intrusiva, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.	113
C.72 A la izquierda se ve a la estación U63B sobre roca intrusiva, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.	113
C.73 A la izquierda se ve a la estación U73B sobre roca intrusiva, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.	114
C.74 A la izquierda se ve a la estación U75B sobre roca intrusiva, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.	114
C.75 A la izquierda se ve a la estación L006 sobre roca metamórfica, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.	115
C.76 A la izquierda se ve a la estación QC08 sobre roca metamórfica, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.	115
C.77 A la izquierda se ve a la estación U10B sobre roca metamórfica, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.	116
C.78 A la izquierda se ve a la estación U15B sobre roca metamórfica, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.	116
C.79 A la izquierda se ve a la estación U16B sobre roca metamórfica, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.	117
C.80 A la izquierda se ve a la estación U57B sobre roca metamórfica, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.	117
C.81 A la izquierda se ve a la estación U66B sobre roca metamórfica, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.	118

C.82 A la izquierda se ve a la estación U68B sobre roca metamórfica, a la derecha
la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak. 118

2. Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo determinar las frecuencias a la que una onda sísmica presenta una máxima amplificación. En éste estudio se utiliza el método de tasas espectrales H/V, para determinar dichas frecuencias y en función de ellas, realizando mediciones de ruido sísmico en la superficie, estudiar la vulnerabilidad de los suelos para conocer el comportamiento de un determinado lugar. Se utilizaron los datos otorgados libremente por IRIS recopilados en las estaciones que fueron instaladas tras el terremoto 8.8 Mw ocurrido en Chile el año 2010.

Se consideró en primera instancia alrededor de 4 Terabytes de almacenamiento para registros sísmicos diarios de las estaciones de la red IMAD, los cuales pasaron por un proceso de calidad, tomando señales de ruido de una hora de duración, que al final del trabajo se redujeron en 82 espectros de frecuencias. En cada espectro se seleccionó un peak y, en caso de presentar más de uno, se consideró el peak más relevante bajo 1 Hz y el más relevante sobre 1 Hz.

Según la ubicación de cada estación, se agruparon los espectros H/V obtenidos para su posterior análisis de acuerdo al tipo de roca sobre la cuál se encontraban, siendo estas de tipo sedimentaria, volcanosedimentaria, volcánica, intrusiva o metamórfica y se definió un rango de frecuencias donde se encontraron las máximas amplificaciones de la curva H/V, rango que fue particularmente claro para las estaciones sobre roca intrusiva (2.5-6.5 Hz).

Finalmente, se obtuvieron correlaciones entre la información proporcionada por los espectros H/V, con los índices de V_{s30} y MRVBF derivados de datos topográficos y con el efecto de sitio, cuyos mejores resultados se encontraron entre H/V y MRVBF para los peak menores a 1 Hz (47%) y entre el H/V y el efecto de sitio para las curvas con un sólo peak (42,7%) y para el peak de mayor amplificación (41,9%). Se sugiere que para entender bien los espectros H/V es necesario realizar estudios de campo para verificar la geología del lugar y medir índices como el V_{s30} directamente. Independientemente de lo anterior se demuestra que cálculos de H/V pueden caracterizar bien las frecuencias fundamentales de sitios de interés.

3. Introducción:

A lo largo de la historia diversos estudios han demostrado que los daños causados por un terremoto varían incluso en lugares cercanos (Figura 1), esto se atribuye a la modificación que experimenta la forma y la amplitud de la onda sísmica debido a la geología propia de la superficie de dicho lugar, es decir, al efecto de sitio (Arai y Tokimatsu, 2004). Debido a lo anterior es importante evaluar el efecto de sitio para prevenir los desastres que un terremoto podría ocasionar.



Figura 1: Ubicaciones de dos edificios adyacentes diseñados con el uso de diferentes condiciones del sitio en Concepción (mapa y vista aérea).

Es muy importante analizar el tipo de suelo de lugares en los que se desarrolla la población, es decir, en las ciudades y en todo suelo en el que se desee construir. En Chile, por ejemplo, existe una norma de construcción que clasifica el terreno por tipo de suelo, basado en el promedio de los primeros 30 metros de la velocidad de onda S (Cuadro 1). Sin embargo, también cabe destacar que el suelo tiene una frecuencia de vibración particular dependiendo de su composición y geología y, por ejemplo, el movimiento de los edificios depende de esta frecuencia a la que oscila el suelo, por lo que un edificio que posea una frecuencia de vibración similar generará resonancia, produciendo mayor daño, es decir, la reacción de movimiento de la construcción dependerá del lugar donde se haya edificado.

Además, otro factor que modifica el movimiento del suelo es el contraste de impedancia, este representa la estructura de la tierra bajo el sitio y determina cuán fuerte una onda en particular es multi-reflejada dentro de una capa de suelo de baja densidad. Esta capa atrapa la energía de la onda a la frecuencia de resonancia fundamental del suelo y en los armónicos mayores.

La respuesta de sitio es luego determinada por la velocidad de la onda S y por el ancho de la capa sedimentaria superficial el cual determina las frecuencias que se ven afectadas por la amplificación, mientras que el contraste de impedancia controla el nivel de amplificación. Además, es necesario mencionar que por lo general el ancho de esta capa no es constante, lo que implica una mayor complicación para determinar dichas frecuencias.

Dada la necesidad de caracterizar el suelo a través de los factores ya mencionados que influyen en su caracterización, nace el interés de realizar esta tesis, pues cada vez se incrementa la necesidad de realizar estudios de riesgo sísmico sobre grandes áreas urbanas que mejoren la confiabilidad de los resultados, como señala Parolai, S. (2012).

Los estudios que se suelen realizar se efectúan por promedios de simulaciones numéricas o por métodos experimentales. A su vez los métodos experimentales se subdividen en dos categorías, técnicas con un sitio de referencia (RSM) y técnicas sin un sitio de referencia (Bard, 1995). El primero en proponer el método con un sitio de referencia fue Borchardt, R. (1970). Sin embargo, no siempre es factible ubicar un sitio de referencia disponible (la estación por lo general es instalada sobre roca). Por lo anterior, se desarrollaron técnicas sin utilizar un sitio de referencia, aunque ellas entregan sólo información parcial de la respuesta de sitio. Una de esas técnicas que no requieren sitios de referencia es el método H/V y es precisamente el método utilizado en este estudio.

Nagoshi e Igarashi (1970) fueron los primeros en introducir esta técnica (Parolai, 2012), pero Nakamura (1989) la desarrolló como una herramienta para estimar la respuesta de sitio de la onda S, de aquí que se le conozca como método de Nakamura (Zaharia et al., 2008). Esta técnica fue inicialmente propuesta para ruido sísmico (NHV) y Lermo y Chavez-Garcia (1993) la aplicaron para ondas S de grabaciones de terremotos (EHV), desarrollando un fondo teórico para la técnica usando modelos numéricos de ondas Sv (Parolai, 2012). Tanto utilizando los métodos con una estación de referencia (RSM) y el método H/V con eventos sísmicos, se encuentran respuestas de sitio similares al considerar la onda S, los que entregan una frecuencia de resonancia consistente, pero difieren en el nivel de amplificación para frecuencias mayores que la fundamental. El NHV entrega una buena estimación de la frecuencia fundamental de resonancia de la onda S, pero subestima el nivel de amplificación respecto de los métodos con sitio de referencia.

De lo anterior se muestra que una gran ventaja del método de Nakamura es que aún sin haber un evento sísmico se puede utilizar el método. Entonces, con señales de ruido sísmico encontraremos la frecuencia característica del suelo a la cual se amplifica la onda, cuya amplitud nos hablará del contraste de impedancia entre las capas y podremos caracterizar el suelo.

Ocurrido el Terremoto 8.8 Mw del Maule en el 2010 y la poca cantidad de estaciones sismológicas de nuestro país en ese entonces, los sismólogos de Chile, Francia, Alemania, el Reino Unido y los Estados Unidos de inmediato se dieron cuenta de la importancia de aumentar drásticamente la densidad de estaciones sísmica en Chile.

Más de 50 personas contribuyeron con el despliegue de la red International Maule Aftershock Deployment (IMAD), la cuál demoró solo un mes en instalar más de 140 estaciones (Beck et al., 2014). Los datos obtenidos de estos esfuerzos han permitido realizar estudios para evaluar la respuesta de sitio en dichas estaciones y serán la fuente fundamental para este trabajo de tesis. Estos datos son de libre acceso y es posible descargarlos directamente de la página de IRIS (https://ds.iris.edu/mda/_IMAD).

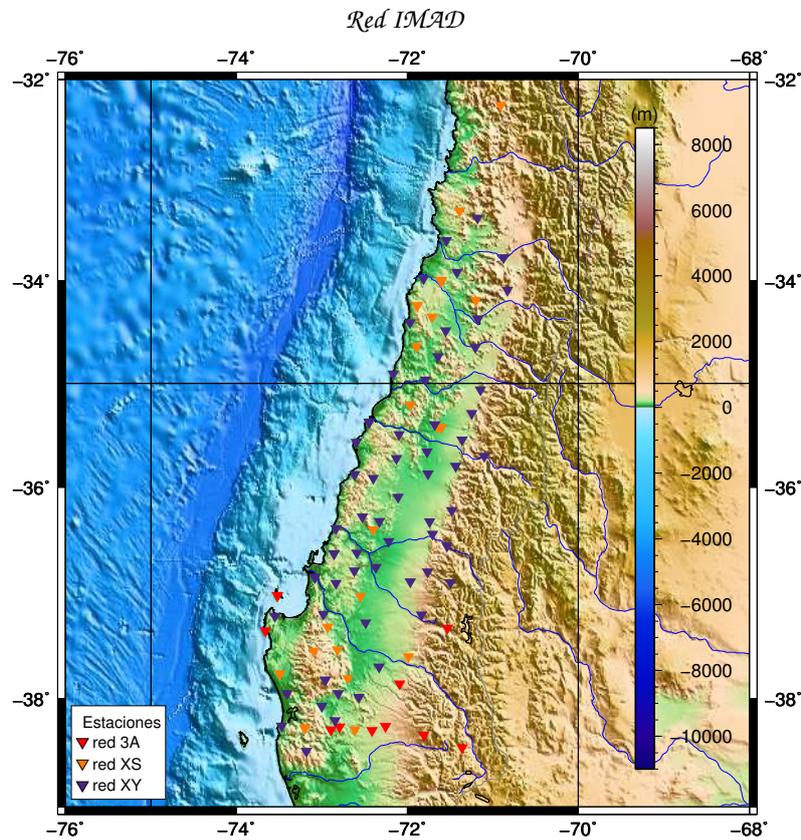


Figura 2: Distribución de las estaciones de la red IMAD utilizadas.

3.1. Hipótesis

Basados en estudios anteriores, es posible determinar la frecuencia de amplificación sísmica del suelo a partir de registros de ruido sísmico. Se espera que utilizando los datos obtenidos de la red IMAD (Figura 2) y considerando la mayor cantidad de datos posibles dentro del tiempo de operación de la red instalada, se encuentre una relación coherente entre la frecuencia a la que ocurre la máxima amplificación del suelo y la geología del lugar.

3.2. Objetivos

3.2.1. Objetivo principal.

- Utilizando la base de datos de aceleraciones de la red IMAD, crear una rutina que permita procesar la gran cantidad de información descargada para determinar las curvas H/V y la frecuencia fundamental de cada estación.

3.2.2. Objetivos secundarios.

- Relacionar las curvas H/V al mapa geológico (Sernageomin, 2003).
- Comparar los valores de H/V con diferentes valores de parámetros (efecto de sitio, MRVBF y V_{s30}) determinados en otros estudios (Villegas, 2018)).

4. Marco teórico

4.1. Teoría del método de Nakamura:

A diferencia de las señales sísmicas producidas por fuentes puntuales localizadas, las cuales tienen duración finita, son coherentes y la relación con sus fases está definida por su espectro de fases, el ruido sísmico es una señal continua, producida por muchas fuentes diferentes, las cuales no están relacionadas entre sí (Chávez-García y Montalva, 2014).

El método de Nakamura (Nakamura, 2000) permite conocer las características de amplificación del suelo en función de la frecuencia usando solo mediciones de ruido sísmico. Cuando la amplificación corresponde a la producida por la geología local, esta se denomina amplificación por efecto de sitio y las frecuencias a las cuales esta amplificación existe se denominan frecuencias naturales. La menor frecuencia a la cual se presenta un peak de amplificación es conocida como frecuencia fundamental. Las amplificaciones se dividen en dos tipos, la amplificación geométrica y la dinámica (Rosales, 2001).

Cuando una onda pasa a través de una interfase con un contraste de impedancia alto (I_C) desde una capa a otra de menor rigidez y compactación, la componente de la onda sísmica asociada a la frecuencia fundamental de la capa más superficial es amplificada en gran manera, produciéndose el efecto de resonancia.

Esto ocurre ya que cuando una onda elástica se propaga a través de un material, el flujo de energía transmitido se mantiene constante y al decrecer la velocidad de propagación de la onda producto de la menor rigidez y compactación de la nueva capa de suelo, la velocidad de partícula de dicha onda debe aumentar (Bommer, Salazar y Samayoa, 1998).

Función de Transferencia.

Una función de transferencia es un modelo matemático que, a través de un cociente, relaciona la respuesta de un sistema a una señal de entrada o excitación.

La función de transferencia para un lugar corresponde a S_T .

$$S_T = \frac{H_S}{H_B} \quad (1)$$

H_S = Espectro de Fourier horizontal de una estación superficial.

H_B = Espectro de Fourier horizontal del basamento.

En el espacio del tiempo, una señal sísmica estocástica se puede definir como el resultado de la convolución entre las señales que la provocan (o entre las señales fuentes). Si lo llevamos al espacio de las frecuencias, esta queda simplemente representada por la multiplicación de dichas señales.

Definiendo $(*)$ como el operador de convolución e (\cdot) como la multiplicación, tene-

mos:

$$H_S(t) = F_H(t) * F_R(t) * S(t) \quad (2)$$

$$\implies H_S(f) = F_H(f) \cdot F_R(f) \cdot S(f) \quad (3)$$

Y

$$H_B(f) = F_H(f) \quad (4)$$

Donde:

F_H = Espectro de Fourier de ondas de cuerpo polarizadas horizontal (Fuentes lejanas).

F_R = Espectro de Fourier de ondas Rayleigh (Fuente cercana).

S = Espectro de Fourier del efecto de sitio.

Nakamura (1989) supone una componente vertical superficial libre de efectos de sitio y una componente vertical del basamento, tal como sigue:

$$V_S(f) = F_V(f) \cdot F_R(f) \quad (5)$$

$$V_B(f) = F_V(f) \quad (6)$$

Donde:

V_S = Espectro de Fourier vertical de una estación superficial.

F_V = Espectro de Fourier de ondas de cuerpo polarizadas vertical (Fuentes lejanas).

F_R = Espectro de Fourier de ondas Rayleigh (Fuente cercana).

V_B = Espectro de Fourier vertical del basamento.

Al suponer que las componentes superficiales horizontal y vertical del movimiento son alteradas por ondas Rayleigh en la misma medida, se propone una función de efecto de sitio modificada que compense la alteración sufrida producto de las ondas superficiales:

Se puede obtener de lo anterior que:

$$\frac{\frac{H_S}{H_B}}{\frac{V_S}{V_B}} = \frac{\frac{F_H \cdot F_R \cdot S}{F_H}}{\frac{F_V \cdot F_R}{F_V}} = S(f) \quad (7)$$

De la ecuación anterior, tenemos:

$$\frac{H_S}{V_S} \cdot \frac{1}{\frac{H_B}{V_B}} = R_S \cdot \frac{1}{R_B} = S(f) \quad (8)$$

Donde R_S y R_B son las tasas espectrales H/V superficial y en el basamento, respectivamente.

- La tasa $\frac{H_S}{H_B}$ permite eliminar el efecto de las fuentes lejanas polarizadas horizontal.
- La tasa $\frac{V_S}{V_B}$ permite eliminar el efecto de las fuentes lejanas polarizadas vertical.

- La razón entre las dos tasas señaladas elimina el efecto de las fuentes cercanas, de este modo prevalece sólo el efecto de sitio $S(f)$.
- En base a observaciones se ha obtenido que para suelos rocosos, el espectro $\frac{H}{V} \approx 1$, ya que las amplitudes de las componentes vertical y horizontal de los microtemores son similares en la base rocosa ($R_B \approx 1$, para un amplio rango de frecuencias donde existe sustrato firme).

Se define así la función de transferencia modificada S_{TT} como:

$$S_{TT} = R_S \cdot \frac{1}{R_B} \approx R_S \quad (9)$$

En base a esto, podemos observar que la función de transferencia de capas sedimentarias superficiales puede estimarse con observaciones de microtrepidaciones en superficie.

Hay muchos estudios que demuestran teóricamente la relación entre el máximo peak del espectro $\frac{H}{V}$ y la frecuencia fundamental o de resonancia del suelo (Lachet y Bard, 1994; Lermo y Chavez, 1994). Además, se puede estimar la profundidad (H) de la capa sedimentaria utilizando información de estratigrafía del suelo, como sigue:

$$H = \frac{V_S}{4F_0} \quad (10)$$

Donde:

V_S = Velocidad de onda de cizalle en todo el depósito.

F_0 = Frecuencia fundamental.

Se menciona que la amplitud del espectro $\frac{H}{V}$ se relaciona con el contraste de impedancia (I_C) entre los materiales presentes, pero su relación con la amplificación del sitio aún no es conocida totalmente.

$$I_C = \frac{\rho_B \nu_B}{\rho_S \nu_S} \quad (11)$$

Donde ρ_S representa la densidad del suelo y ρ_B la del sustrato rocoso, por otra parte, ν_S y ν_B representan las velocidades de onda sísmica en el suelo y en el sustrato rocoso respectivamente.

Como se explica por Nakamura (1989), el rango de frecuencias asociado al peak del espectro de H/V de ruido superficial se puede explicar con la componente transversal de ondas de cizalle, entonces, el objetivo es la estimación del factor de amplificación causada por las múltiples ondas de cizalle transversales incidentes. Para este propósito, la onda Rayleigh contenida por el ruido superficial debe eliminarse al interior del proceso de H/V .

Es importante considerar que:

- Para afloramientos rocosos no hay amplificación dominante en ninguna dirección.

- Para movimientos en suelos más blandos, esta amplificación se debe a la producida por las mismas capas de suelo blando.

Clasificación del suelo	Rango de $V_{s30}(\frac{m}{s})$
E	<180
D	180 - 240
	240 - 300
	300 - 360
C	360 - 490
	490 - 620
	620 - 760
B	>760

Cuadro 1: Esta tabla muestra las categorías de clasificación del suelo según el NEHRP asociadas a los rangos de V_{s30} elegidos por Allen y Wald (2007), para generar mapas de este parámetro, basados en modelos digitales de elevación (DEM).

4.2. Elección de curvas H/V

Según la guía de interpretación del proyecto SESAME (Acerra et al. 2004), se debe verificar la confiabilidad de las curvas espectrales H/V y luego de lograr determinar una curva característica para el lugar se puede clasificar el peak de la curva según su claridad. Es importante que la curva sea confiable, es decir, que sea estable y representativa, una forma de corroborar esto es encontrando una curva similar con otros instrumentos de adquisición y selección de ventanas o logrando que la desviación estándar entre las curvas seleccionadas para cada estación sea baja.

4.2.1. Condiciones para la confiabilidad de la curva.

- Con el propósito de obtener al menos 10 ciclos significativos en cada ventana se debe cumplir la siguiente condición.

$$F_0 > \frac{10}{l_w} \quad (12)$$

Donde F_0 corresponde a la frecuencia fundamental de la estación en Hertz y l_w al ancho de la ventana en segundos.

Además, se puede verificar la condición $F_0 > \frac{20}{l_w}$ para una mayor confiabilidad de la curva, aunque esto no es obligatorio.

- En una selección automática de las ventanas de medición de ruido, el número de ciclos significativos (n_c) debe ser mayor que 200, ya que se necesita un gran número de ciclos significativos y de ventanas. El número de ciclos significativos se define de la siguiente forma.

$$n_c = l_w * n_w * F_0 \quad (13)$$

Donde n_w corresponde al número de ventanas seleccionadas por estación.

Cuando la selección de ventanas es automática todo transiente es tomado en cuenta, por lo que se recomienda un número mínimo de ciclos significativos de la señal aumentado alrededor de 2 veces a bajas frecuencias y sobre 4 a 5 veces a altas frecuencias, ya que en las altas frecuencias es donde es más común la presencia de estas perturbaciones.

- Grandes desviaciones estándar frecuentemente significan que las vibraciones ambientales son fuertemente no estacionarias y se someten a algún tipo de perturbación, lo que puede afectar el significado físico de la frecuencia peak. Debido a lo anterior es que se requiere verificar que el nivel de dispersión entre todas las ventanas sea bajo.

Hay que tener en cuenta que los valores de amplitud de la curva H/V deberían tomar valores mayores a 1, pero en caso de no ser así, es decir, que sean superiores a 10 o inferiores a 0.1 reflejarían, por ejemplo, un mal funcionamiento del sensor o ruido puntual provocado por fuentes artificiales cercanas de gran magnitud y se recomienda revisar las mediciones.

4.2.2. Condiciones para la claridad de la curva.

Para que la curva sea considerada clara, existen algunas condiciones referente a la amplitud y a la estabilidad del peak.

Condiciones de amplitud

- Existe una frecuencia f^- , ubicada en el rango de frecuencia $[\frac{F_0}{4}, F_0]$, tal que la tasa $\frac{A_0}{A_{H/V}(f^-)} > 2$.

Donde A_0 es la amplitud de la curva H/V en la frecuencia F_0 , además, $A_{H/V}(f^-)$ y $A_{H/V}(f^+)$ corresponden a la amplitud de la misma curva en el rango de frecuencias respectivo.

- Existe una frecuencia f^+ , ubicada en el rango de frecuencia $[F_0, 4F_0]$, tal que la tasa $\frac{A_0}{A_{H/V}(f^+)} > 2$.

- Finalmente $A_0 > 2$.

4.2.3. Espectros de potencia:

De un estudio del USGS utilizando su red mundial (Peterson, 1993), se definieron los límites para ruido alto y bajo en estaciones sísmicas, llamados New High Noise Model

(NHNM) y New Low Noise Model (NLNM) los cuales sirven para limitar los rangos de las amplitudes máximas y mínimas que se deben considerar para decidir si los datos registrados corresponden a ruidos sísmico y no a eventos sísmicos transientes o fallas en el instrumento de medición.

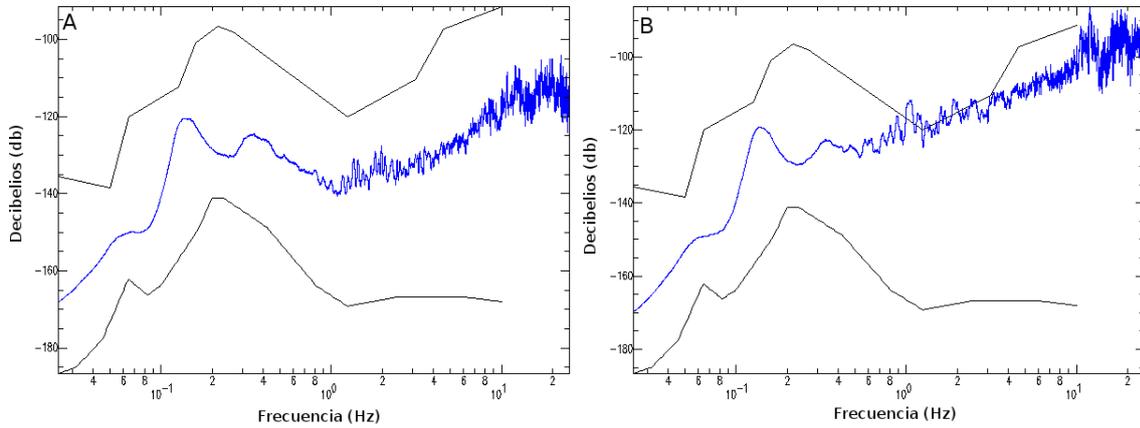


Figura 3: A- Espectro de potencia de una señal entre los límites de ruido sísmico. B- Espectro de potencia de una señal fuera de los límites de ruido sísmico (NHNM).

4.2.4. Ecuación para el cálculo de las curvas H/V:

Las curvas H/V se obtuvieron de la siguiente forma:

$$\frac{H}{V}(f) = \sqrt{\frac{H_N(f)^2 + H_E(f)^2}{V(f)^2}} \quad (14)$$

Se tiene que $H_N(f)$ y $H_E(f)$ son los espectros de Fourier de las componentes horizontales norte y este respectivamente, y $V(f)$ corresponde al espectro de Fourier de la componente vertical.

4.2.5. Demostración matemática para calcular la varianza a través del promedio de varianzas muestrales.

Si tenemos una muestra de n elementos x_1, x_2, \dots, x_n , la varianza de dicha muestra será:

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \bar{x}^2$$

Lamentablemente, para muestras muy grandes Matlab no es capaz de procesar dicha expresión en una operación y debemos separar la muestra en k grupos, de los cuales sí podemos obtener información con Matlab.

Para obtener la varianza de la muestra total en función de las varianzas de cada grupo, utilizamos la igualdad

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^k n_j S_j^2 + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^k n_j (\bar{x}_j - \bar{x})^2$$

donde S_j^2 es la varianza del j -ésimo grupo, \bar{x}_j es el promedio de los elementos del j -ésimo grupo, \bar{x} es el promedio de la muestra total y n_j es la cantidad de elementos del j -ésimo grupo.

Para ver que lo anterior es cierto, notemos que

$$S_j^2 = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} x_i^2 - \bar{x}_j^2$$

Así

$$n_j S_j^2 = \sum_{i=1}^{n_j} x_i^2 - n_j \bar{x}_j^2$$

De esa manera tenemos:

$$\begin{aligned} \frac{1}{n} \sum_{j=1}^k n_j S_j^2 + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^k n_j (\bar{x}_j - \bar{x})^2 &= \frac{\sum_{j=1}^k n_j S_j^2 + \sum_{j=1}^k n_j (\bar{x}_j - \bar{x})^2}{n} \\ &= \frac{n_1 S_1^2 + n_2 S_2^2 + \dots + n_k S_k^2 + \sum_{j=1}^k n_j (\bar{x}_j^2 - 2\bar{x}\bar{x}_j + \bar{x}^2)}{n} \\ &= \frac{\left(\sum_{i \in n_1} x_i^2 - n_1 \bar{x}_1^2 \right) + \dots + \left(\sum_{i=1}^{n_k} x_i^2 - n_k \bar{x}_k^2 \right) + \sum_{j=1}^k n_j (\bar{x}_j^2 - 2\bar{x}\bar{x}_j + \bar{x}^2)}{n} \\ &= \frac{\sum_{j=1}^k x_j^2 - \sum_{j=1}^k n_j \bar{x}_j^2 + \sum_{j=1}^k n_j \bar{x}_j^2 - 2\bar{x} \sum_{j=1}^k n_j \bar{x}_j + \sum_{j=1}^k n_j \bar{x}^2}{n} \\ &= \frac{\sum_{j=1}^k x_j^2 - 2\bar{x} \sum_{j=1}^k n_j \bar{x}_j + n\bar{x}^2}{n} \end{aligned}$$

Pero

$$\frac{\sum_{j=1}^k n_j \bar{x}_j}{n} = \bar{x}$$

así

$$n\bar{x} = \sum_{j=1}^k n_j \bar{x}_j$$

por lo tanto, de lo anterior tenemos

$$\begin{aligned} \frac{1}{n} \sum_{j=1}^k n_j S_j^2 + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^k n_j (\bar{x}_j - \bar{x})^2 &= \frac{\sum_{j=1}^k x_j^2 - 2\bar{x}n\bar{x} + n\bar{x}^2}{n} \\ &= \frac{\sum_{j=1}^k x_j^2}{n} - \bar{x}^2 \\ &= S^2 \end{aligned}$$

Como queremos obtener cuán dispersos están los datos respecto del promedio, calcularemos la desviación estandar S , que corresponde matemáticamente a la raíz cuadrada positiva de la varianza muestral.

Sin embargo, el teorema del límite central nos dice que si x_1, x_2, \dots, x_n es una muestra aleatoria de una población infinita que tiene media μ y varianza S^2 , entonces, la distribución límite (cuando n tiende a ∞) de Z_n , donde $Z_n = \frac{\sum x_i - n\mu}{S\sqrt{n}}$, es la distribución normal estandar. De este modo la distribución de la variable se aproxima a la de una normal tipificada $N(0,1)$, mejorando la calidad de la aproximación a medida que n aumenta.

Por consiguiente, cada vez que tengamos un número de muestras (n) lo suficientemente grande utilizaremos el teorema central del límite calculando, $S_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{n}}$.

5. Metodología:

5.1. Obtención de los datos:

Se descargaron los datos correspondientes a las estaciones de la red IMAD que registraron ruido sísmico durante la mayor parte del periodo de interés (Vera, 2014). Por lo tanto, este análisis parte considerando sólo 91 de las 140 estaciones antes mencionadas, esto porque tenían los mejores periodos de operación durante el tiempo de funcionamiento de la red. Los datos fueron obtenidos desde la página de IRIS, que se encuentran abiertamente disponibles. Particularmente para este trabajo se usaron series de tiempo diarias entre los días 58 y 365 del año 2010. Dentro del periodo de tiempo elegido algunas estaciones no registraron bien los datos y fueron descartadas en el camino.

5.2. Descripción importante de los datos descargados:

Los datos descargados vienen en formato mseed, que es un subconjunto estándar de SEED usado para datos de series de tiempo, éstos vienen diferenciados según su “Red” (3A, XS y XY), las “Estaciones” (Ver estaciones en el apéndice, tabla A.4), y la cantidad de “días” correspondientes al año 2010, que cambian de acuerdo a la disponibilidad de datos descargados para cada estación.

Además, también se descargaron archivos metadata, datos altamente estructurados que describen información del contenido, la calidad, la condición y otras características de los datos. Son “datos sobre los datos” (Cuadro 2).

A modo de ejemplo:

net	sta	loc	chan	lat	lon
3A	L009	–	HHN	-37.030319	-73.520477
elev	depth	azimuth	dip	instrument	scale
16.0	0.0	0.0	0.0	NMX-TRIL120P	1.2583E9
scalefreq	scaleunits	samplerate	start	end	
8-9	1 M/S	100	2010-04-02T00:00:00	2012-12-30T23:59:59	

Cuadro 2: Metadata de la estación L009

5.3. Software utilizados:

Se utilizó el programa informático Bash de Linux para crear la mayoría de los scripts, el software Seismic Analysis Code (SAC) distribuido para investigaciones científicas utilizando datos de IRIS, la herramienta de software matemático MATrix LABoratory (MATLAB).

El software utilizado para la generación de los mapas a partir de los datos distribuidos espacialmente Generic Mapping Tools (GMT), el software de información geográfica SAGA. Además del editor gráfico GIMP.

5.4. Procesamiento de los datos:

En primer lugar se tomaron los datos de cada día de las 91 estaciones en sus 3 componentes HHZ, HHE y HHN (Figura 4) y se cambió el formato desde mseed a SAC, utilizando los archivos metadata descargados también para cada día.

Fueron descartados los intervalos de medición en que no existía el metadata de alguna componente en alguna estación en particular.

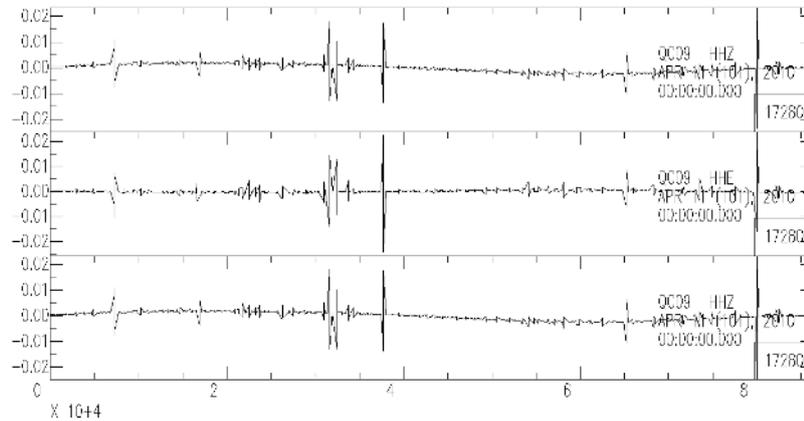


Figura 4: Ruido sísmico de cada componente, correspondiente al día 101 de la estación QC09.

5.5. Selección de datos:

Posteriormente, se eliminaron todos los días cuyos archivos no fueron transformados a SAC por lo que disminuyó la cantidad de días de cada estación con los que se siguió trabajando.

Al pasar los archivos desde el formato mseed a SAC en los casos en los que habían instantes de tiempo de medición sin registro se obtuvo una cantidad aleatoria de archivos SAC para las distintas componentes, sin embargo, sólo se debía obtener uno por día para cada componente, entonces se procedió a unir todos los SAC de cada componente en un sólo archivo y, además, a descartar todos los días a los que les faltaban más de cinco minutos de datos (Figura 5).

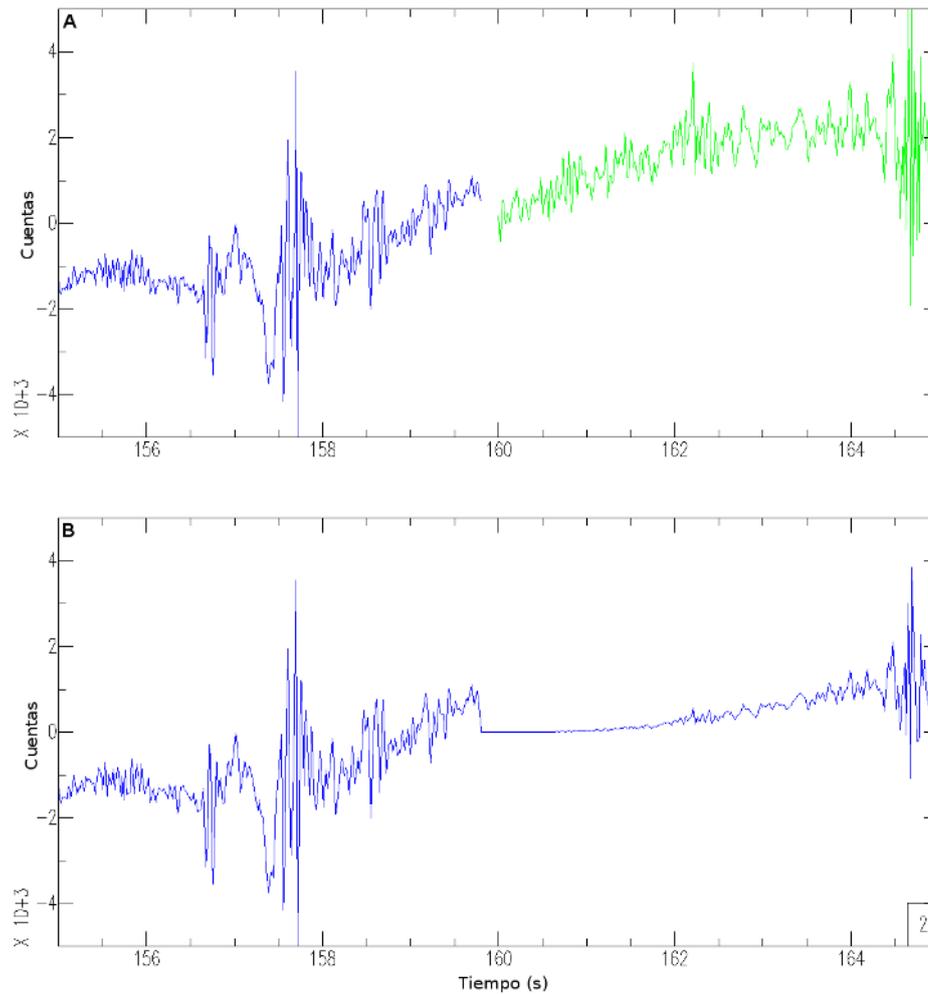


Figura 5: A- Señales SAC con instantes sin datos registrados. B- Señales SAC unidas.

Dado que en algunas estaciones el instrumento de medición fue cambiado en dos o tres oportunidades, sus polos y ceros también cambiaron. Por lo anterior, se eliminó el día exacto en que se realizó ese cambio de instrumento.

Finalmente, para tener una mayor densidad de señales por estación se decidió subdividir los días en horas, desde la hora 1 a la 24 (Figura 6).

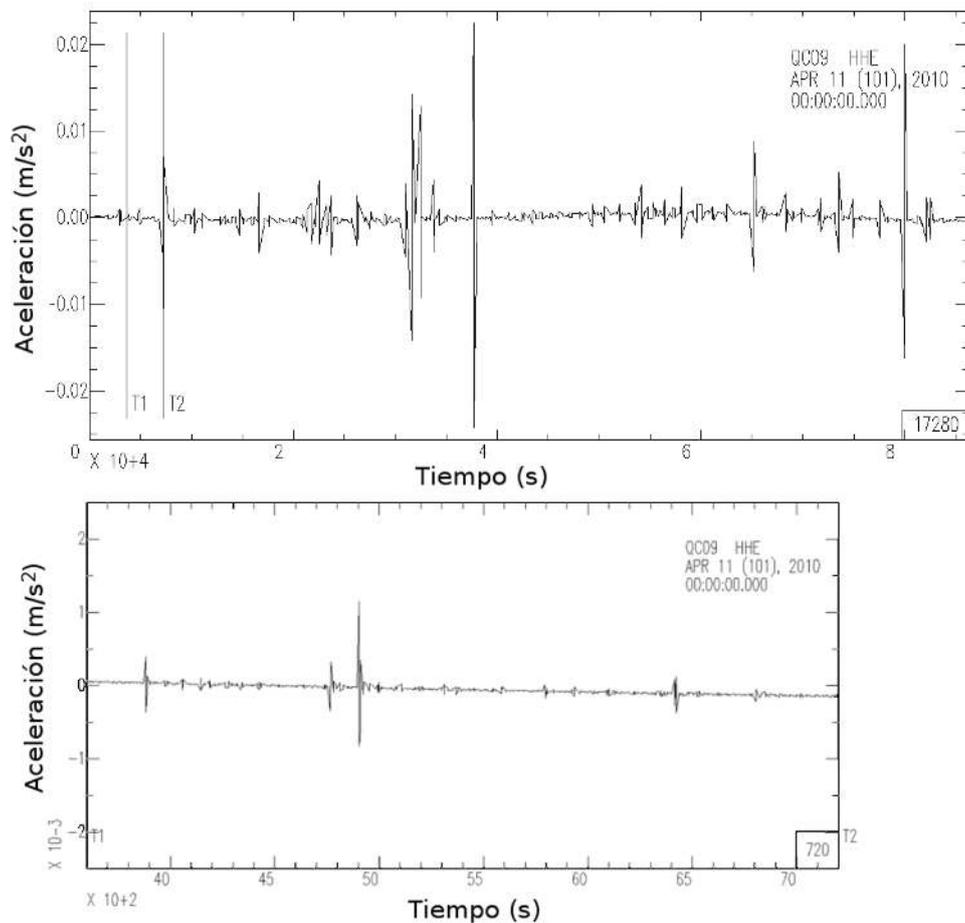


Figura 6: Señal correspondiente al día 101 de la estación QC09, componente HHE y acercamiento a modo de ejemplo de una hora entre los tiempos T1 y T2.

5.5.1. Limpieza de la señal y obtención de los espectros de potencia:

Para esta parte del trabajo se utilizaron rutinas del programa SAC dentro de scripts en bash.

Al principio es necesario limpiar la señal, eliminando la tendencia y el promedio de la serie de tiempo y, en este caso, se le aplicó además una función “taper” para dar una forma creciente, suave al principio y decreciente y suave al final de la señal, con un ancho de 0.001 Hz. Luego, utilizando el comando “transfer” y los archivos de los polos y ceros de cada instrumento se eliminó la respuesta de los instrumentos.

Para no tener problemas con las altas frecuencias ni en la frecuencia cero, se fijaron algunos límites de frecuencias entre los 0.025 y 40 Hz, rango que fue elegido basado en el rango de operación de los instrumentos y su muestreo, dando mayor énfasis a la información entre los 0.05 y 20 Hz. Luego tomamos la transformada rápida de Fourier (“fft”) y utilizamos el comando “keepam”, ya que estamos interesados sólo en la información de las amplitudes. Posteriormente ya se puede convertir el espectro de la serie a un espectro de potencia con unidades de decibelios siguiendo la metodología del USGS (Peterson, 1993) realizando algunas operaciones.

Se eleva el espectro de la señal al cuadrado, se multiplica por un factor de 2 para tomar en

cuenta la contribución de frecuencias negativas, se divide por el largo de la serie de tiempo en segundos para normalizarlo, además, se toma el logaritmo base 10 del espectro y se multiplica por 10 para obtener el resultado en decibelios.

Se realizó una interpolación para comparar los modelos de ruido (New High Noise Model (NHNM) y New Low Noise Model (NLNM), (Peterson, 1993)) con nuestro espectro de potencias y verificar que se encuentre dentro de estos límites, ya que ambas series tienen diferentes dimensiones, esto se realizó para cada componente (Figura 3).

En esta tesis sólo se utilizó el modelo de ruido superior, NHNM, principalmente por un asunto de tiempo y porque a simple vista la gran mayoría de los espectros de potencia se escapaban de éste límite y no del límite inferior.

5.6. Curvas H/V

Si el espectro de potencia de la señal de cada componente (HHN, HHE, HHZ) estaba bajo el modelo de ruido superior se creaba el espectro de amplitudes de Fourier de cada componente, los cuales se utilizaron para obtener las curvas H/V, que fueron calculadas mediante la ecuación 14.

Recordemos que éste procesamiento se realizó para cada hora, por lo tanto, hasta aquí sólo obtuvimos los espectros H/V por hora, sin embargo, buscamos obtener uno por estación (Figura 7).

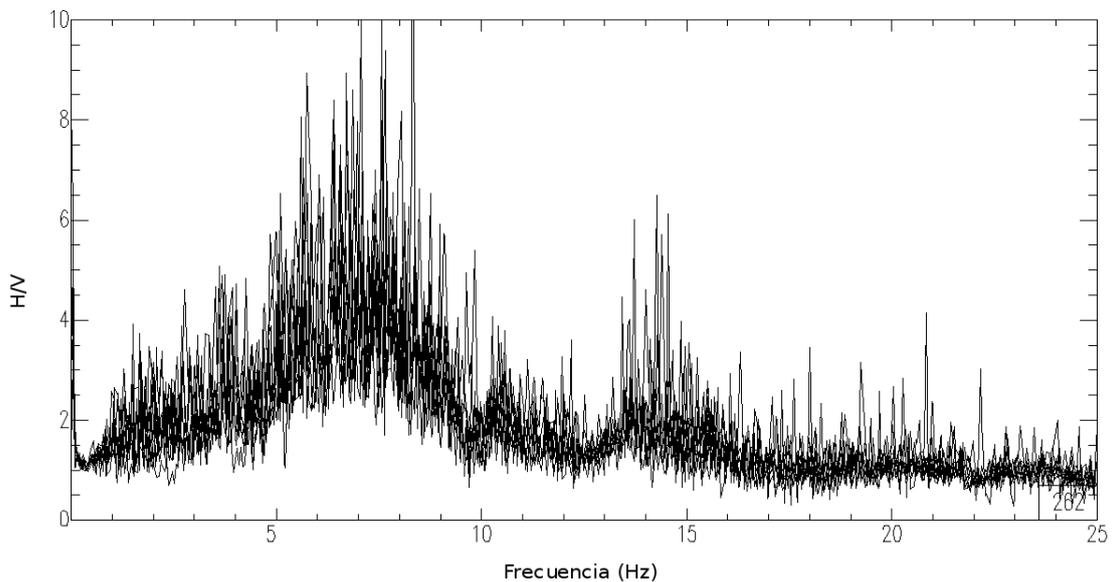


Figura 7: Siete espectros H/V superpuestos de la estación QC09.

5.6.1. Manipulación de las curvas H/V:

Se tomaron los archivos que contienen las curvas H/V por hora creados en la etapa previa.

Dado que se necesitaba leer los archivos con Matlab, estos debían estar en un formato de texto, por lo que fue necesario utilizar el programa “SAC2XY” con lo que se obtuvo archivos con una columna de frecuencias y otra de amplitudes. A dichos archivos se les nombró con una extensión “xy”.

Luego se generó una matriz cuyas filas corresponden a cada uno de los espectros H/V y las columna contienen los valores de amplificación que están asociados a una frecuencia en particular. Además, se guardó en un archivo las frecuencias que están asociadas a las amplitudes, que van entre 0,0001 y 50 Hz.

Posteriormente se deben promediar todos los espectros H/V de cada estación, para obtener una curva H/V característica en cada lugar (Figura 8).

5.6.2. Cálculo de la curva H/V promedio por estación:

Para las diferentes estaciones existe una cantidad variable de señales, las cuales fluctúan entre 4 y 4345, por lo que un número variable de curvas involucra distintos procesamientos:

- Caso en que número de curvas es menor o igual a 500: Se hizo un promedio normal entre todas las curvas.
- Caso en que el número de curvas es mayor a 500: Debido a que el programa MATLAB no permite cargar estas matrices tan grandes, es necesario cortarlas para luego promediarlas por grupo. Esto fue posible de realizar debido a que el promedio de una serie de datos es equivalente a calcular el promedio en grupos más pequeños y luego promediarlos con una ponderación correspondiente al número de curvas que se consideró en cada uno.

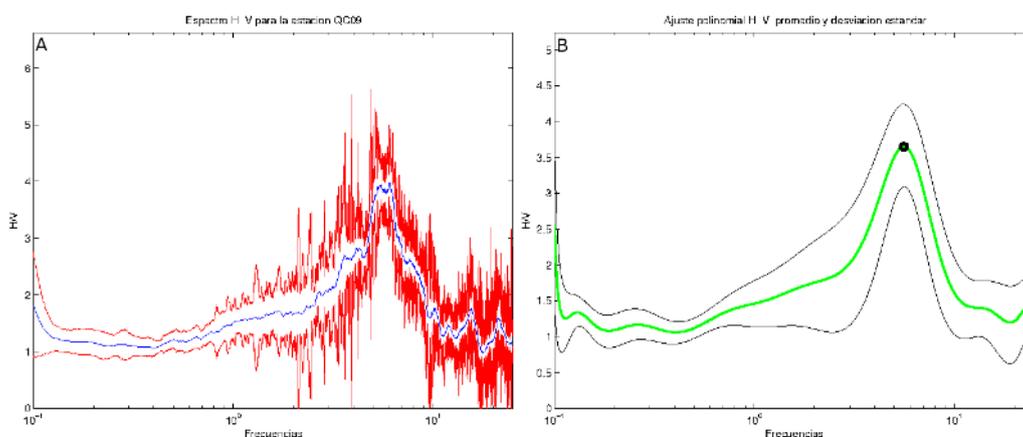


Figura 8: A- Curva H/V promedio \pm el doble de la desviación estándar. B- Ajuste polinomial para las curvas H/V promedio \pm el doble de la desviación estándar.

5.6.3. Cálculo de la desviación estándar entre las curvas H/V para cada estación:

Análogamente a la sección anterior se consideraron dos procesamientos, uno para estaciones con menos de 500 curvas H/V y otro para estaciones con más de 500 curvas H/V.

Para el primer caso se procedió a calcular la varianza directamente, sin embargo, para el caso de muchas curvas H/V se calculó las varianzas por grupo y luego se calculó el promedio de las varianzas para obtener la característica de cada estación.

El segundo procedimiento será respaldado por una ejemplificación en los próximos párrafos.

Fue necesario ajustar cada una de las curvas H/V promedio y desviaciones estándar a través de un polinomio para obtener gráficos suaves y con peak claros (Figura 8).

5.6.3.1 Ejemplificación del cálculo de varianza mediante el promedio de varianzas muestrales

Si consideramos la estación QC09, la cual contiene 1963 series de H/V tendremos 3 grupos de 500 y uno de 463 series, entonces

$$\begin{aligned} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k n_i S_i^2 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k n_i (\bar{x}_i - \bar{x})^2 &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^4 n_i S_i^2 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^4 n_i (\bar{x}_i - \bar{x})^2 \\ &= \frac{(n_1^2 S_1^2 + n_2^2 S_2^2 + n_3^2 S_3^2 + n_4^2 S_4^2)}{n} + \frac{(n_1(\bar{x}_1 - \bar{x})^2 + \dots + n_4(\bar{x}_4 - \bar{x})^2)}{n} \end{aligned}$$

Con $n_1=500$, $n_2=500$, $n_3=500$, $n_4=463$, $n=1963$ y \bar{x}_i , S_i^2 y \bar{x} , el valor promedio y la varianza de cada grupo y el promedio de todas las series respectivamente. Éstos últimos valores se obtienen para cada frecuencia. La varianza para ésta estación estará dada por:

$$\frac{1}{1963} \sum_{i=1}^4 n_i S_i^2 + \frac{1}{1963} \sum_{i=1}^4 n_i (\bar{x}_i - \bar{x})^2 = \frac{(500^2 S_1^2 + \dots + 463^2 S_4^2)}{1963} + \frac{(500(\bar{x}_1 - \bar{x})^2 + \dots + 463(\bar{x}_4 - \bar{x})^2)}{1963}$$

El rango de frecuencia de interés está entre los 0,1 y 25 Hz, rango entre el cual fue cortada la señal.

Además, puesto que el mismo procesamiento de los datos va generando errores propios dado que las series de tiempo no son infinitas ni continuas, debemos agregar a la varianza calculada la varianza sistemática. La varianza sistemática se calcula a partir de los espectros H/V obtenidos de las respectivas señales por componentes, se tomó en consideración la estación QC01 tomando una hora de datos, y se trasladó el cálculo del H/V cada un minuto, es decir, desde el segundo 0 al 3600, seguido desde el segundo 60 al 3660, luego del 120 al 3720 y así sucesivamente (Figura 9), finalmente a éstas nuevas curvas H/V obtenidas se les calculó la varianza, llamada varianza sistemática, que fue luego sumada a la varianza ya calculada en cada estación. La varianza sistemática ayuda a estimar de mejor manera los errores reales en el proceso.

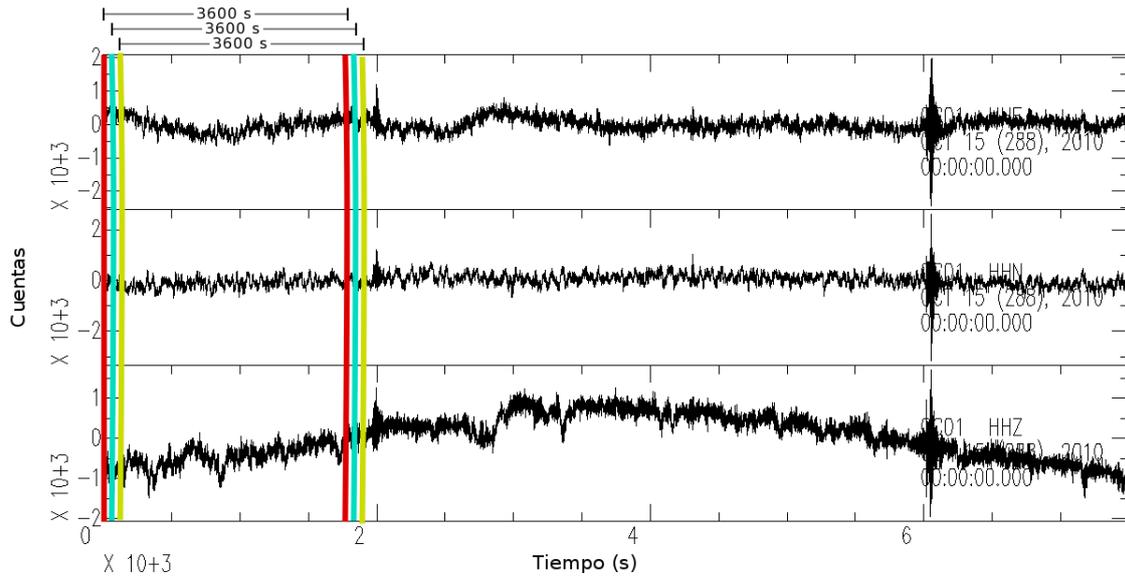


Figura 9: Esta imagen ejemplifica que la señal fue cortada en grupos de una hora y se trasladó cada un minuto, para calcular la varianza sistemática.

5.7. Efecto de sitio

En la ecuación 15 se relacionan el valor de amplificación medido en una estación (y_{es}) en función de la amplificación predicha por un modelo de atenuación en la misma estación (μ_{es}) más un valor que mejora la predicción, calculado como el promedio de las diferencias entre el valor observado y el valor predicho en todas las estaciones para un evento (δB_e) (Rodríguez-Marek et al., 2014).

$$y_{es} = \mu_{es} + \delta W_{es} + \delta B_e \quad (15)$$

Por otra parte, se incluye un nuevo factor δW_{es} que permite compensar la amplificación predicha y corregida ($\mu_{es} + \delta B_e$) para igualarla al valor de amplificación observado en la estación (y_{es}). Este factor representa la amplificación local para un evento, sin embargo, a medida que la base de datos de los eventos aumenta es posible promediar esta amplificación local obtenida para cada evento con el fin de obtener un factor de amplificación ocasionado por la geología local. Finalmente, este último factor es conocido como el efecto de sitio $\delta S2S_s$ y se define de la siguiente forma:

$$\delta S2S_s = \frac{1}{NE_s} \sum_{e=1}^{NE_s} \delta W_{es}, \quad (16)$$

6. Resultados y análisis

Con el objetivo de dar a conocer los resultados obtenidos de la mejor forma, ésta sección contará con una serie de imágenes, histogramas, y en algunos casos tablas para su mayor comprensión. Se analizarán principalmente aquellos resultados que se alejen de los resultados obtenidos para la mayoría de las estaciones, según se encuentren en roca sedimentaria, volcánosedimentaria, volcánica, intrusiva o metamórfica.

Debido a que hay estaciones que presentan un peak secundario, se separaron en estaciones con un peak y estaciones con dos peak, las cuales a su vez y para analizar cada uno de esos dos peak, se dividen en Peak <1 Hz y Peak >1 Hz. Además, al momento de hacer las correlaciones que se señalan más adelante, se agregó otra agrupación en donde se juntaron todas las estaciones considerando los peak con mayor H/V para todas las estaciones, llamada Peak mayor.

6.1. Roca Sedimentaria

Las secuencias sedimentarias se forman por la acumulación de sedimentos en una cuenca estos provienen de la erosión de rocas pre-existentes (Nichols, 2009).

Los espectros H/V de las estaciones encontradas sobre una geología de tipo sedimentaria cuentan con 1 y 2 peak. Si consideramos los histogramas y los datos señalados en las tablas podremos analizar los resultados obtenidos. En general, para los casos en que las estaciones cuenten con 2 peak se hicieron 2 histogramas, uno para el primer peak, es decir con valores de frecuencia menores a 1 Hz y otro para el segundo peak, con valores mayores a 1Hz.

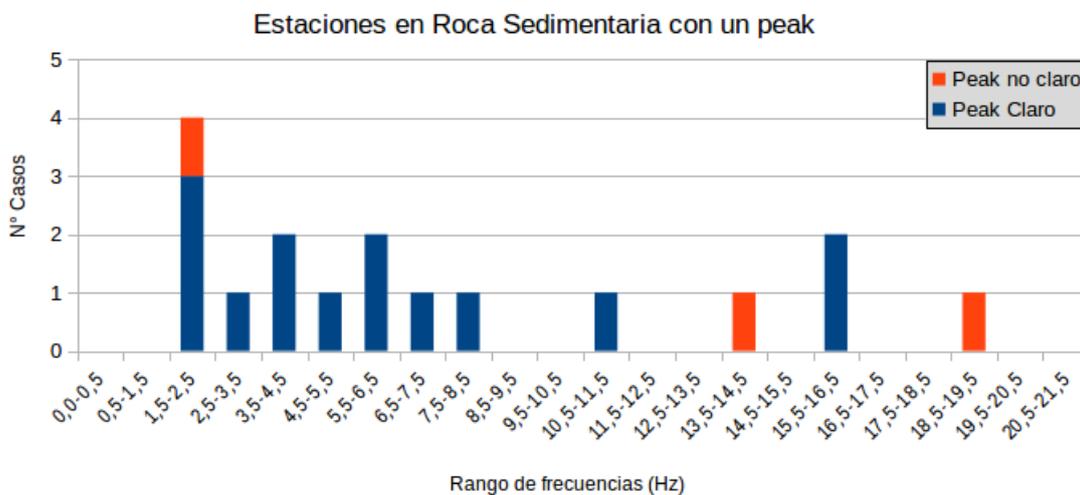


Figura 10: Histograma para las estaciones sobre suelo sedimentario con sólo 1 peak.

Observando las amplitudes de las estaciones que solo tienen 1 peak (Figura 10), vemos que dos de ellas tienen peak con valores de amplitudes muy por sobre el resto, de 16,38 y 19,49, para la estación U55B y U09B respectivamente, lo anterior considerando que la amplitud del peak que les antecede es de solo 8,51. Ambos peak tienen una incertidumbre en frecuencia σ_f baja y valores de σ_A de 0,93 y 1,70 respectivamente.

Al observar la imagen de la estación U55B en el mapa geológico apreciamos que esta se encuentra al limite entre suelo sedimentario e intrusivo, y la estación U09B se encuentra rodeada de suelo de tipo metamórfico (Figura 11.)

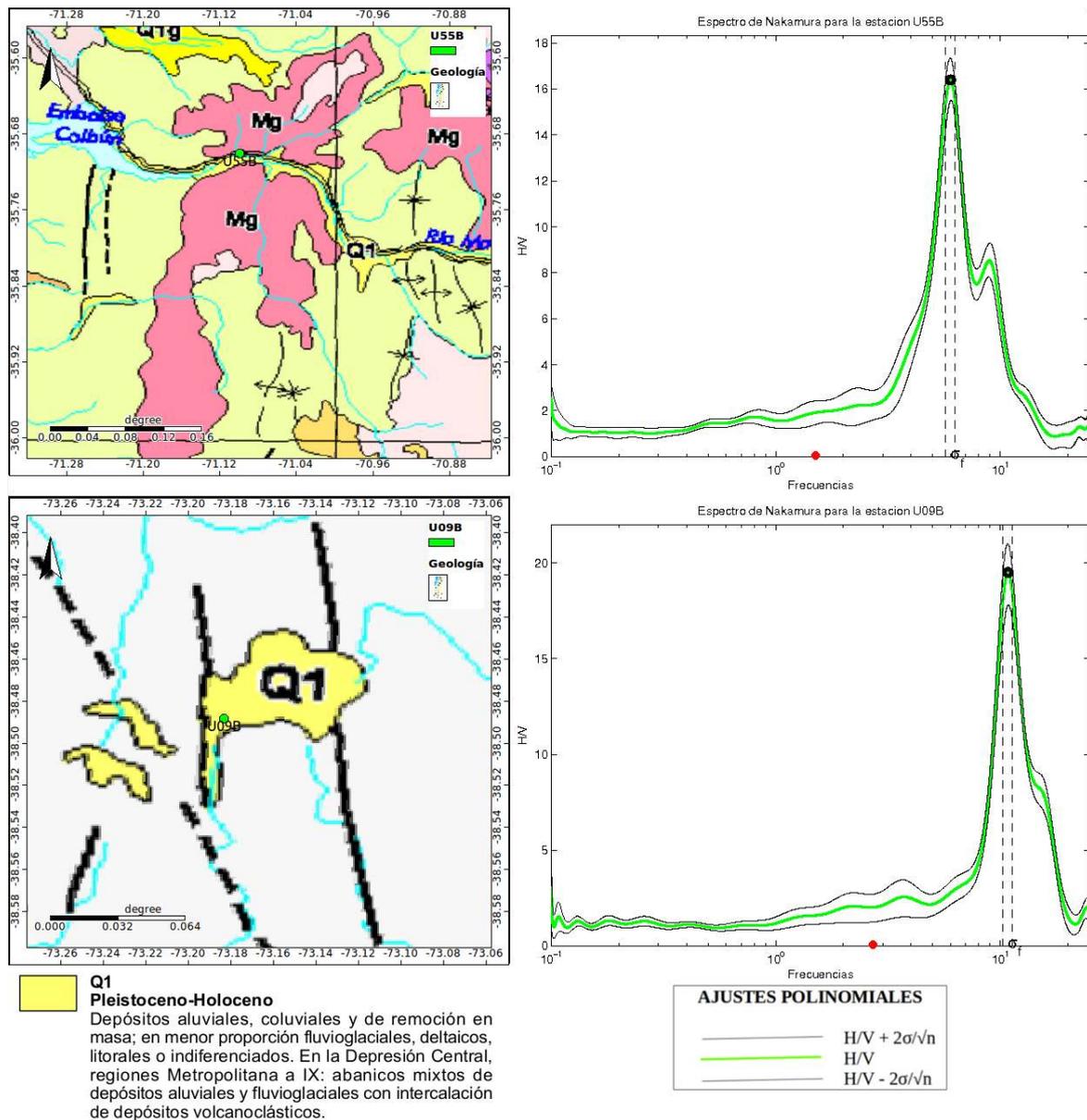


Figura 11: Estación U55B y U09B. A la izquierda se indica en el mapa geológico sobre que tipo de roca se encuentran las estaciones, y a su derecha las curvas H/V respectivas para cada estación.

Cómo vemos en el histograma, las estaciones que tienen un peak comprenden un rango de frecuencia muy amplio, entre 1,5 a 19,5 Hz.

Las estaciones cuyo peak se encuentra entre 10,5 a 19,5 Hz son estaciones que están cerca, al límite o rodeadas por otro tipo de suelo, siendo estos de tipo metamórfico, como en el caso de la estación U09B, volcanosedimentario para el caso de las estaciones U69B y U43B, para las cuales el peak encontrado está en el rango de 15,5 a 16,5 Hz al igual que la estación U62B que efectivamente pertenece a ese tipo de suelo (Figura 12).

La estación U74B está rodeada de suelo de tipo intrusivo y en el gráfico de la estación U65B podemos apreciar que se encuentra rodeada de una compleja geología. En el caso de las estaciones mencionadas, como se encuentran cerca de roca más densa que la sedimentaria podría tener una capa de sedimento muy delgada, por ejemplo, lo que sucede en las faldas de los cerros, en estos casos la capa sedimentaria tendrá una menor influencia, dicho en otras palabras, si la capa es más delgada que una longitud de onda esta capa será imperceptible para dicha onda. Reiteramos que los peak de las estaciones mencionadas se encuentran en los rangos de frecuencia de 10,5 a 19,5 Hz (Figura 13).

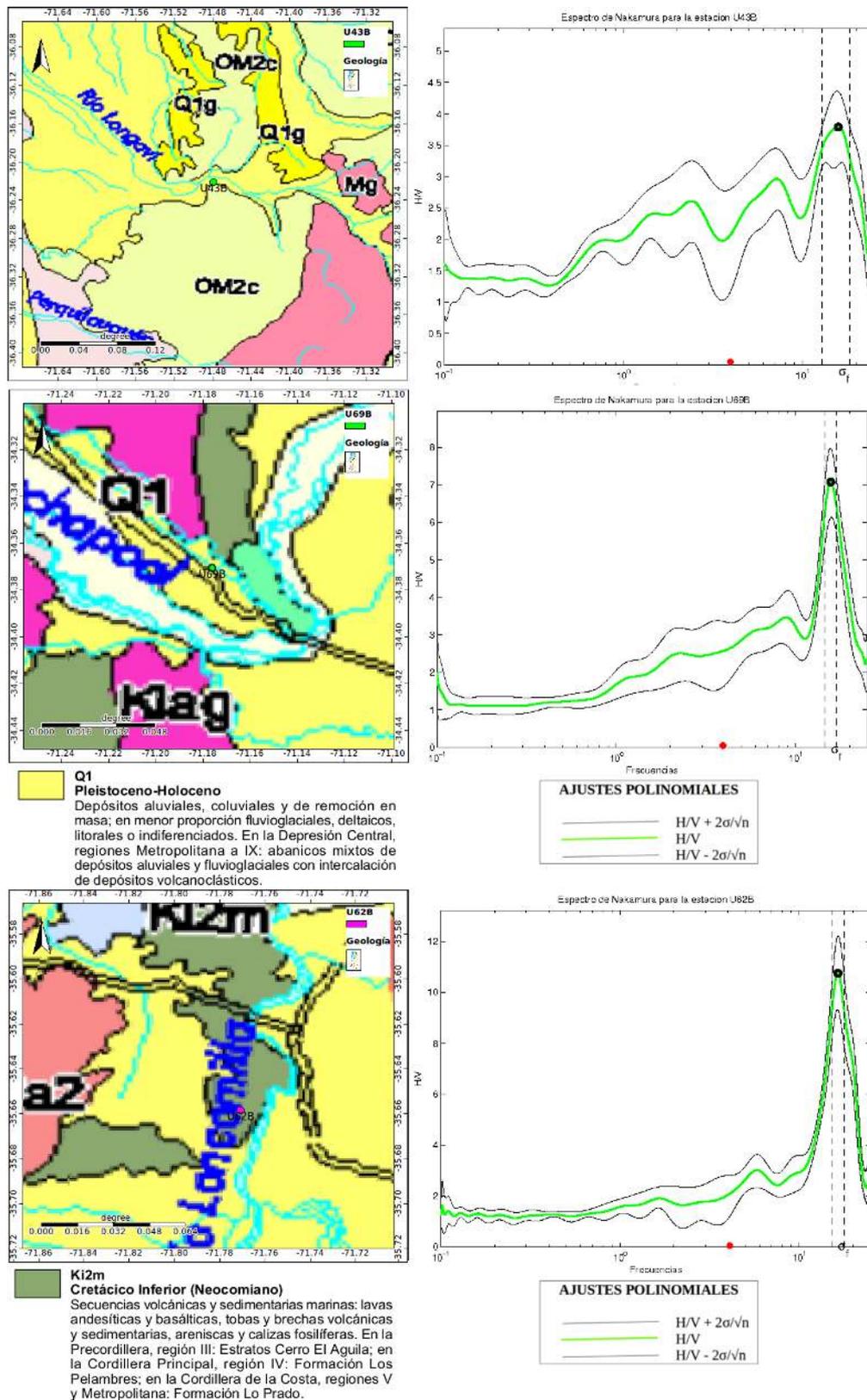


Figura 12: A la izquierda, las estaciones U43BF y U69B en roca sedimentaria (círculo verde) y la estación U62B perteneciente a roca volcanosedimentaria (círculo morado). A la derecha sus respectivas curvas H/V.

El resto de las estaciones que se encuentran bajo los 8,5 Hz tienen valores bajos de σ_f y σ_A y sus peak promedian 6,28 en amplitud, este valor no considera las estaciones U55B que se encuentra a los 6 Hz.

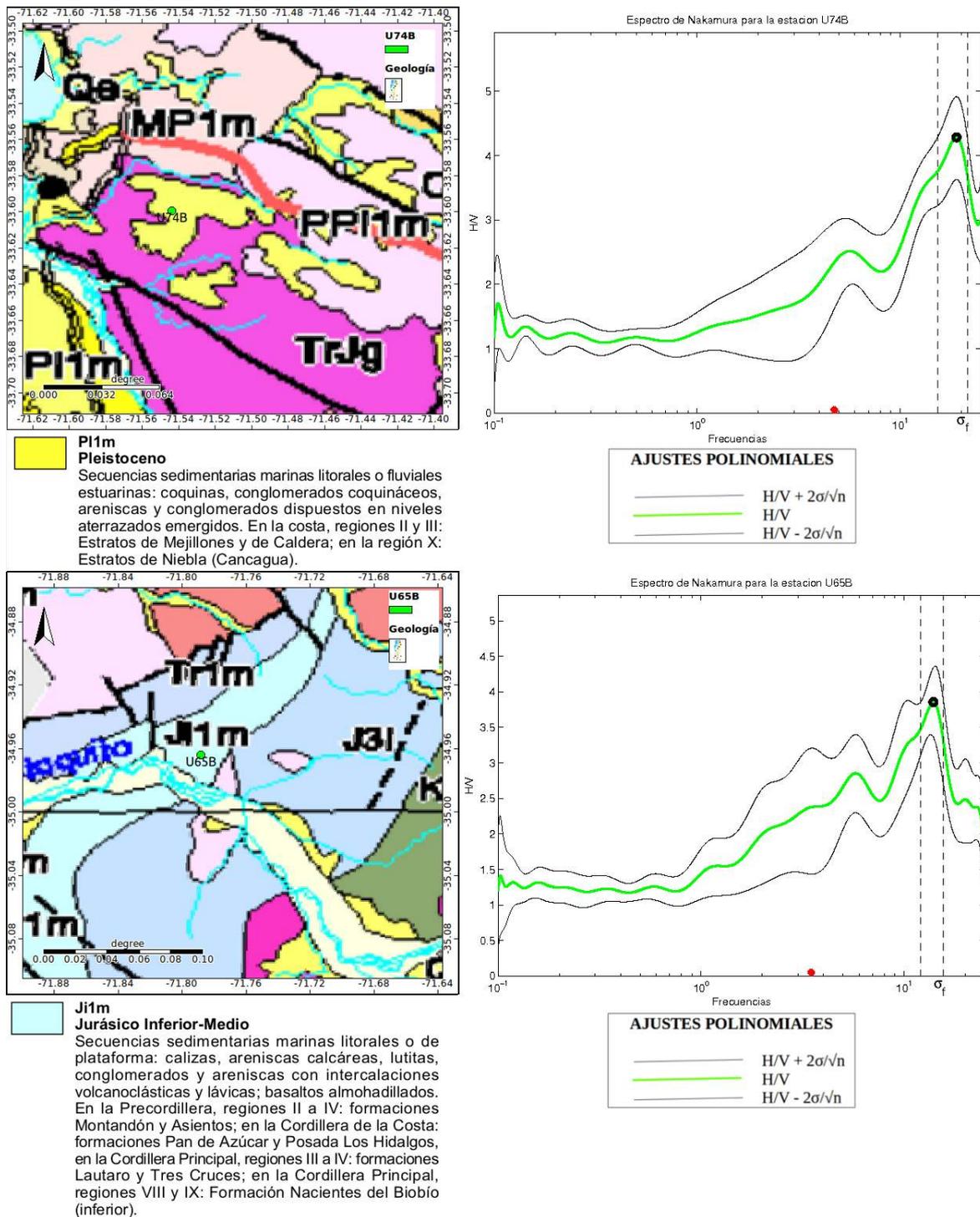
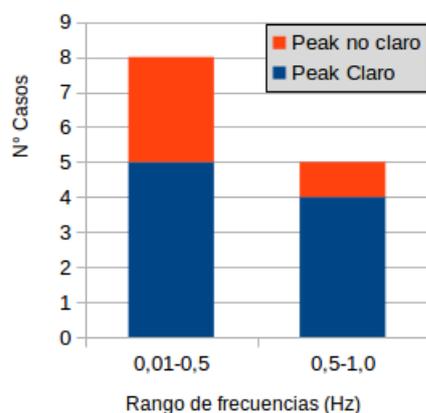


Figura 13: A la izquierda se observan las estaciones U74B y U65B (círculos verdes), sobre roca sedimentaria. A la derecha sus respectivas curvas H/V.

Para el caso del peak menor a 1 Hz de las estaciones que tienen 2 peak (Figura 14), se calculó un valor mínimo de σ_f de 0,02 y máximo de 1,19, un valor mínimo de 0,09 para σ_A y uno máximo de 1,36, los 13 primeros peak de las estaciones promediaron 4,60 de amplitud H/V.

Estaciones en Roca Sedimentaria con dos peaks, Peak < 1 Hz



Estaciones en Roca Sedimentaria con dos peaks, Peak > 1 Hz

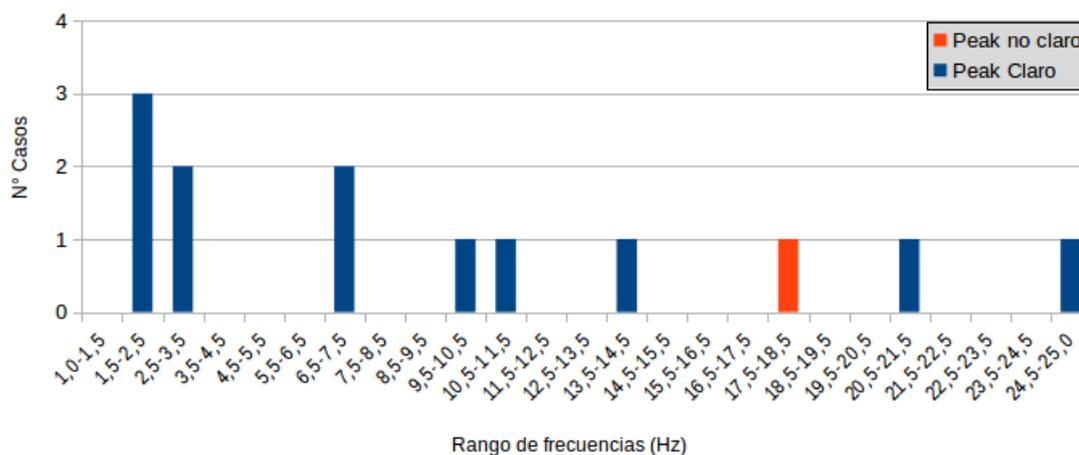


Figura 14: Histograma para las estaciones con 2 peak sobre suelo sedimentario. A- Casos de frecuencias peak menores que 1 Hz. B- Casos de frecuencias peak mayores que 1 Hz.

Ahora enfocándonos en los segundos peak (Figura 14), el grupo de estaciones cuyo peak fue encontrado entre 10,5 a 21,5 Hz, hablamos de la estación L105, L009, U51B y QC11, se calcularon valores de σ_f de 2,38, 4,32, 4,66 y 9,95 respectivamente, valores que indican un amplio rango de variación de la posible ubicación del peak. Del mismo modo, esto ocurre con la estación U52B cuyo peak se encuentra en el rango de frecuencia entre 1,5 a 2,5 Hz y la estación U46B con su segundo peak en el intervalo de frecuencia 2,5 a 3,5 Hz, cuyos σ_f respectivos son, 3,08 y 2,85. De lo anterior se concluye que los peak encontrados para las estaciones mencionadas, tienen un rango de error en su ubicación mayor que el resto de las estaciones, cuyo σ_f máximo es de 1,29. La estación que se encuentra en el rango de 24,5 a 25,5 Hz, es la estación U32B (figura 15), es una estación que no se puede explicar aún cuando no se puedan sacar conclusiones de si cumple o no con el segundo criterio de claridad del peak ya que no se puede ver en la imagen obtenida.

Independientemente de lo anterior, los segundos peak de las 13 estaciones promedian 4,25 en amplitud del peak, siendo la amplitud del peak menor de 2,22 y del peak máximo de 6,10.

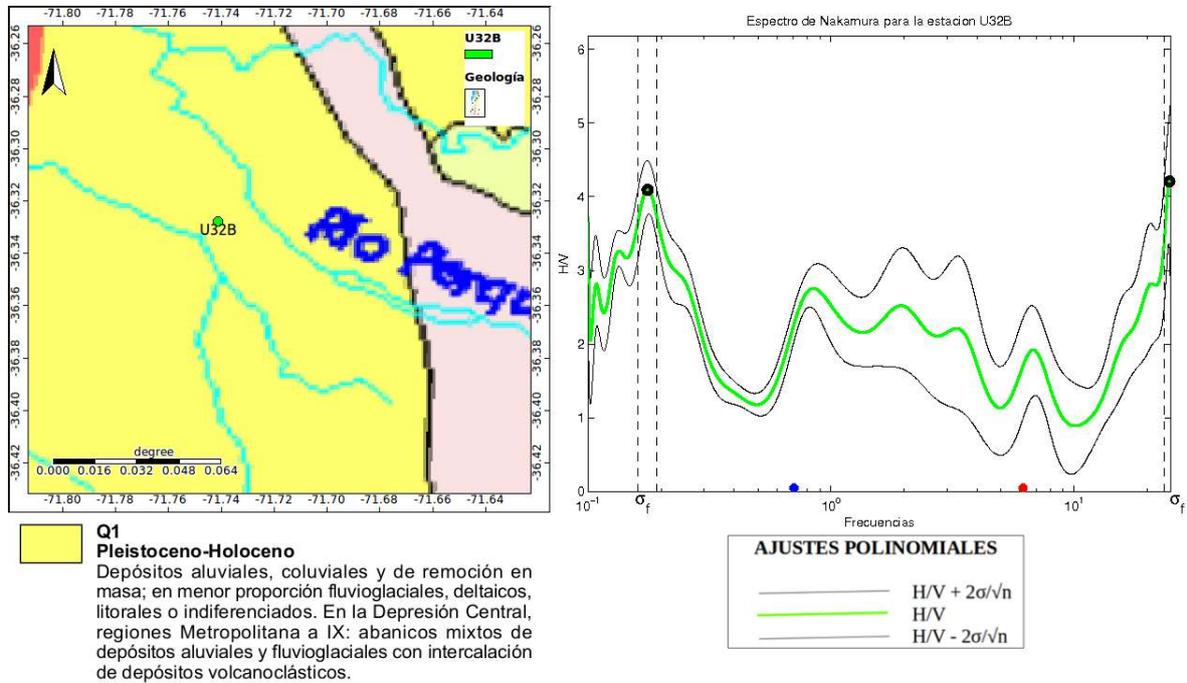


Figura 15: A la izquierda se ve a la estación U32B sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación.

6.2. Roca Volcanosedimentaria.

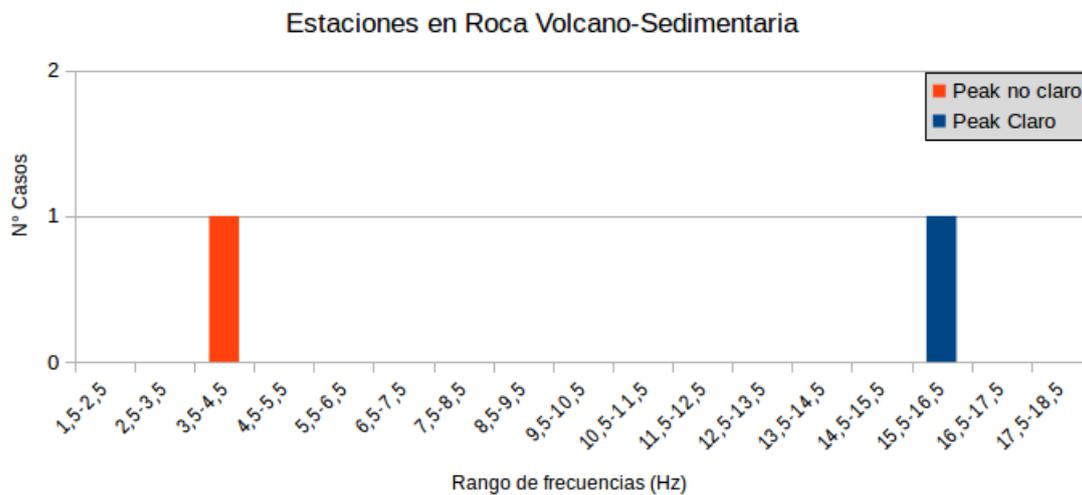


Figura 16: Histograma para las estaciones sobre suelo volcano-sedimentario con sólo 1 peak.

Las volcanosedimentarias, son secuencias formadas por la acumulación de material proveniente de la actividad volcánica, pero que se acumulan y forman rocas, siguiendo los mismos procesos de las rocas sedimentarias por ejemplo, la acumulación de ceniza volcánica producirá la roca: toba (Nichols, 2009).

Sólo 2 de las estaciones se encuentran dentro de la secuencia volcanosedimentaria las cuales tienen

sólo 1 peak (Figura 16), la estación QC01 y la estación U62B, serán analizadas igualmente a pesar de que por ser solo dos no darán resultados concluyentes para este tipo de suelo.

Ambos peak se encuentran en frecuencias muy diferentes (Figura 17).

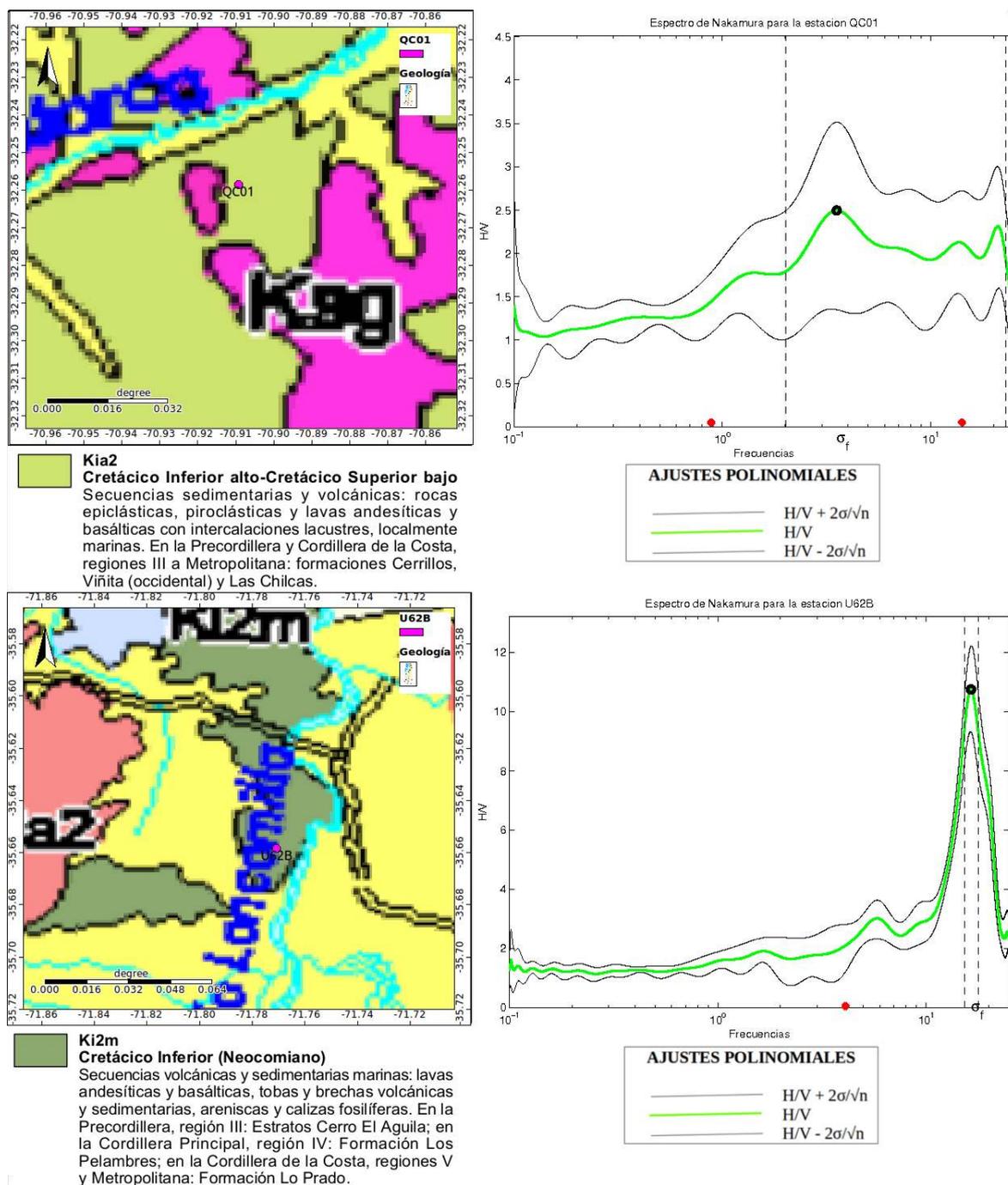


Figura 17: Estaciones QC01 y U62B en roca volcano-sedimentaria. A su derecha sus respectivas curvas H/V.

La estación U62B se encuentra en un terreno volcanosedimentario rodeado por otro de naturaleza sedimentaria, ésta estación tiene un peak en el intervalo de frecuencia entre 15,5 y 16,5 Hz cuya amplitud alcanza el valor de 10,75, su σ_f es 1,31 y su σ_A es 1,46. Además cumple con el criterio I, II y III de claridad.

Ahora analizando la estación QC01, nos damos cuenta que sólo cumple con el criterio III de

claridad, su σ_f es de 19 valor extremadamente alto que nos indica que el peak tiene muy poca precisión, además considerando que el σ_A es de 1,14 y la amplitud del peak es 2,49 el peak elegido en realidad podría ser poco significativo.

6.3. Roca Volcánica

Se le denomina secuencias volcánicas a las formadas por rocas volcánicas, esto es, rocas formadas por el enfriamiento de coladas de lava (Glosario RECEFN, 2010).

En este caso encontramos ocho estaciones que tienen 1 peak y otras nueve que tienen un peak secundario mayor que 1 Hz.

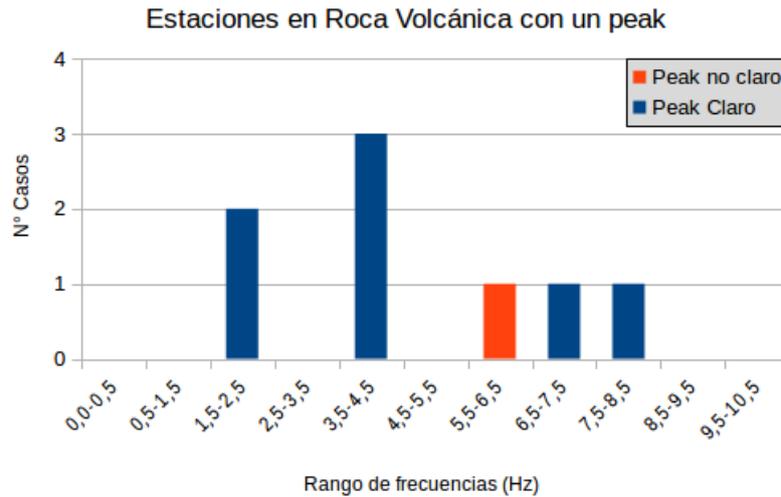


Figura 18: Histograma para las estaciones sobre suelo volcánico con sólo 1 peak.

De las estaciones con 1 peak (Figura 18) la única que presenta un valor de σ_f de 3,9 es la estación L103, ésta se encuentra cerca de un terreno de tipo intrusivo, con un valor de amplificación del peak de 2,34 y un σ_A de 0,43 (Figura 19).

Todas las demás estaciones con 1 peak en terreno volcánico presentaron σ_f y σ_A pequeños. Si promediamos las amplitudes de todos los peak se obtiene un valor de 5,32, teniendo una amplitud mínima de 2,34 y máxima de 6,78.

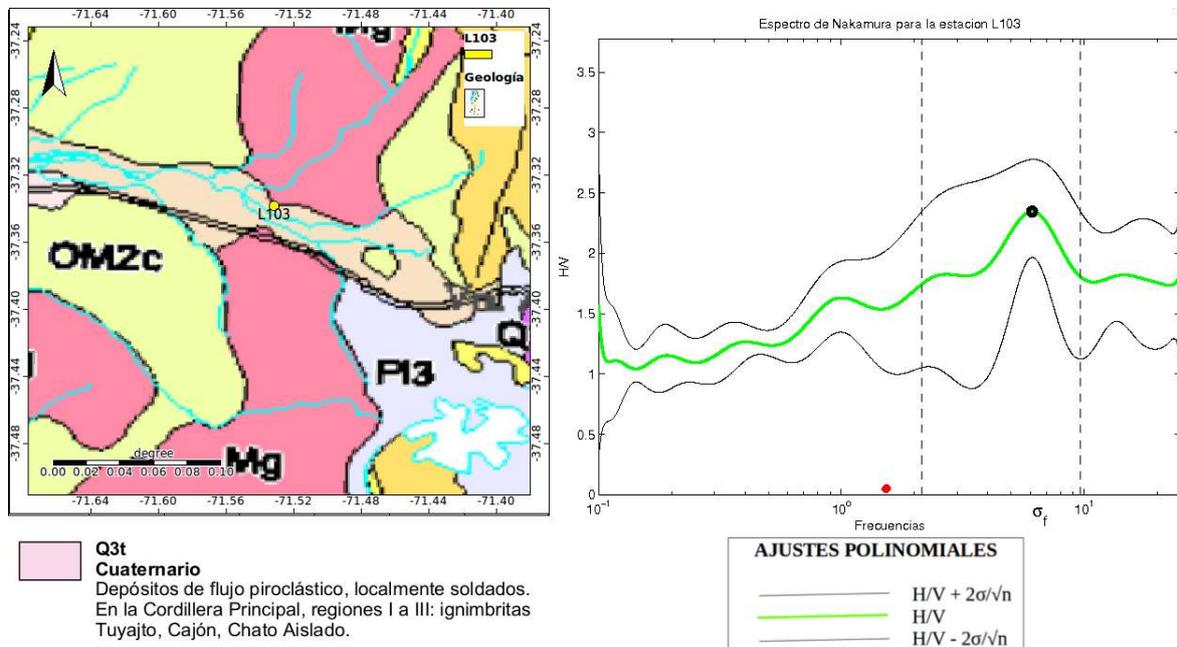


Figura 19: Estación L103 sobre una geología de roca volcánica. A su derecha el espectro de curva H/V de la estación.

Nueve estaciones presentaron 2 peak (Figura 20), un caso singular es el de la estación L106, cuyo primer peak en el intervalo 0,5 a 1 Hz presentó un σ_f con un valor de 15, un σ_A de 0,48 y una amplitud del peak de sólo 2,33. En el caso del segundo peak hallado para la estación en el intervalo de frecuencia de 7,5 a 8,5 Hz, el valor de σ_f es de 1,13 y de σ_A de 0,32, aquí la amplitud del peak es de 6,46 por lo que podríamos decir que el segundo peak está mejor representado en esta estación (Figura 21).

De manera similar, la estación U11B si bien presenta valores de σ_f de 0,27 y 0,03 para el peak hallado a baja y alta frecuencia respectivamente, el valor de σ_A para el segundo peak es de 7,60, lo que explica la alta amplitud que presenta el segundo peak con un valor de 19,20 muy alejado del resto de las demás estaciones, por lo tanto esté si es un peak relevante pero cuya amplitud medida tiene un error alto (Figura 21).

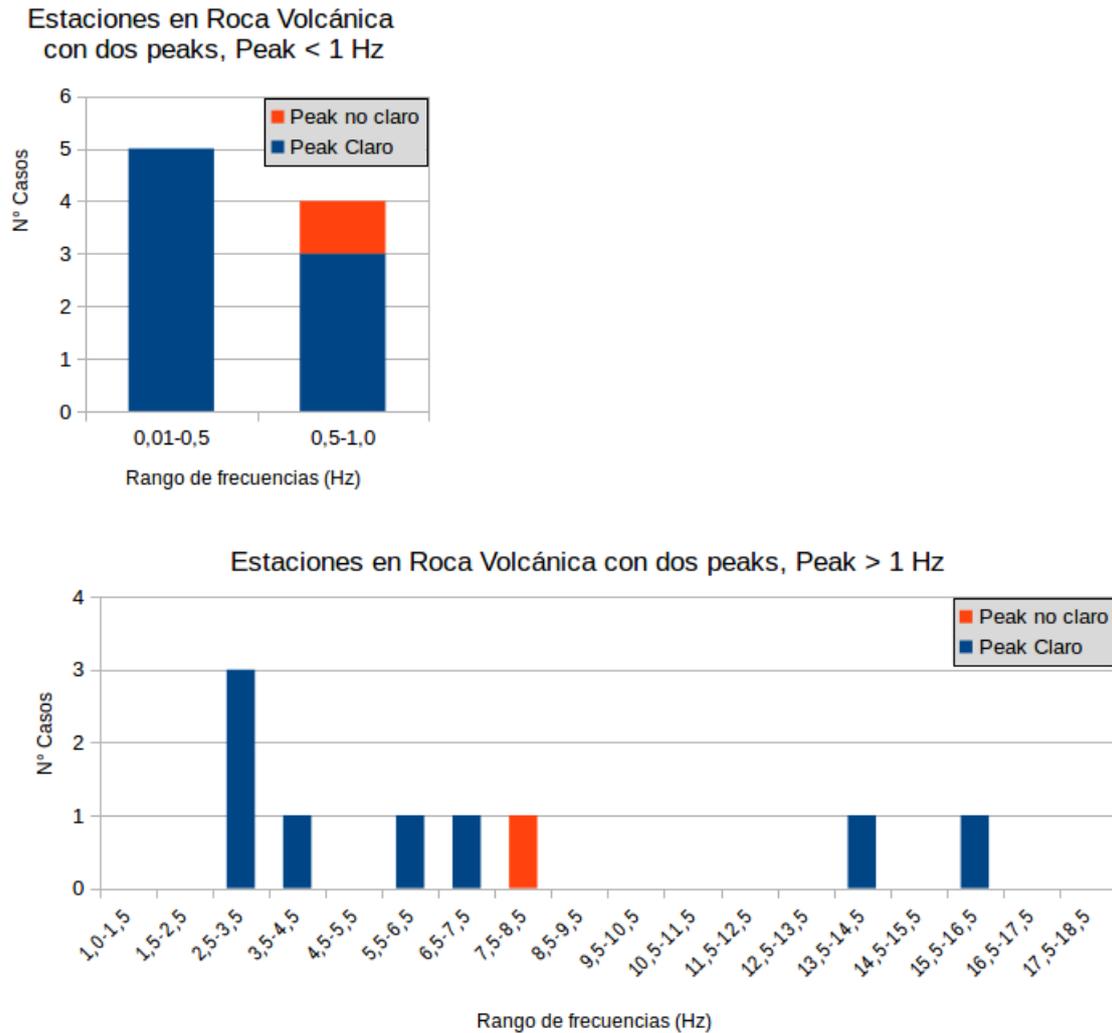


Figura 20: Histograma para las estaciones con 2 peak sobre suelo volcánico. A- Casos de frecuencias peak menores que 1 Hz. B- Casos de frecuencias peak mayores que 1Hz.

Considerando la información de la estación L106 sólo para el segundo peak y de la estación U11B para el primero tenemos lo siguiente.

Para los peak menores que 1Hz, el menor σ_f es de 0,02 y el mayor de 1,39, las amplitudes de los peak promedian 3,96 con un σ_A menor de 0,16 y mayor de 1,23.

Para los peak encontrados en frecuencias mayores a 1 Hz, el menor σ_f es de 0,02 y el mayor de 1,75, las amplitudes de los peak promedian 5,04 con un σ_A menor de 0,16 y mayor de 0,60.

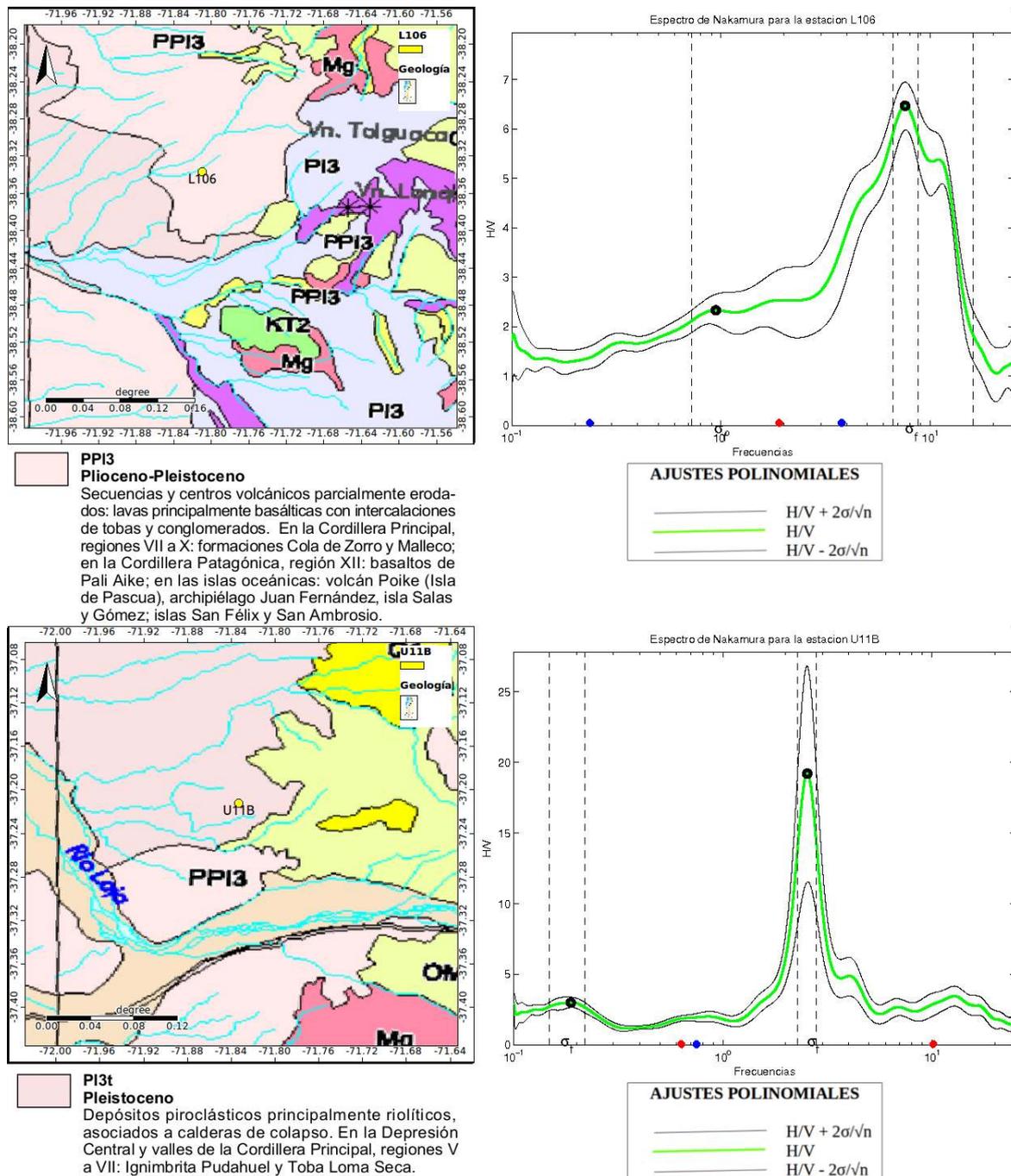


Figura 21: Estaciones L106 y U11B en roca volcánica. A la derecha se observan sus respectivas curvas H/V.

6.4. Roca Intrusiva

Las rocas plutónicas o rocas intrusivas son las que se forman a partir de un enfriamiento lento (permitiendo así el crecimiento de grandes cristales de minerales puros y resultando obtener una textura heterogénea,), a gran profundidad y en grandes masas del magma (Dorado, 2015).

Todas las estaciones que se encuentran sobre roca intrusiva tienen sólo 1 peak (Figura 22) y éste es relativamente claro; estas cumplen con el criterio I, II y III de claridad exceptuando por la estación QF14 que no cumple con el criterio I y la estación U75B que cumple los cuatro

criterios de claridad.

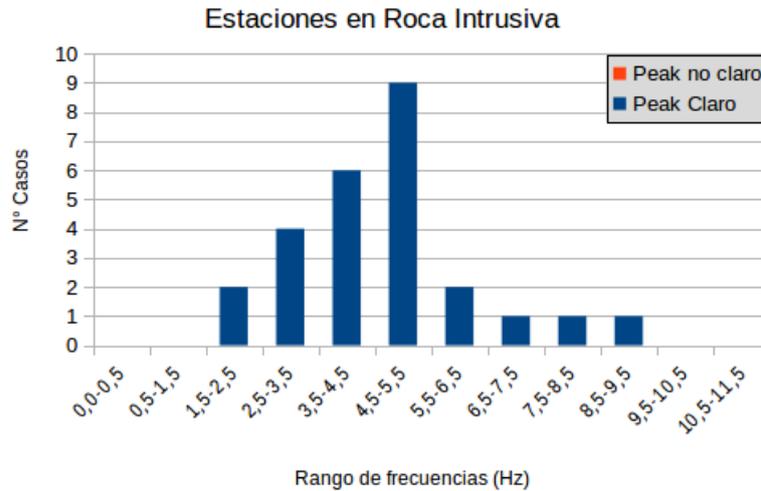


Figura 22: Histograma para las estaciones sobre roca intrusiva con sólo 1 peak.

Se observa que la mayor cantidad de estaciones se encuentran entre los 2,5 y 6,5 Hz.

Las estaciones cuyo peak se encontró entre las frecuencias de 3,5 y 4,5 Hz, tienen una incertidumbre en frecuencia σ_f mínimo de 0,34 y máximo de 0,82 y una incertidumbre de amplitud σ_A mínima de 0,75 y máximo de 1,28, con amplitudes del peak entre 4,94 y 8,25, promediando entre todos 6,95.

Del mismo modo las estaciones que son mayoría y se encuentra su peak en el intervalo de frecuencia 4,5 y 5,5 tienen un σ_f mínimo de 0,21 y máximo de 1,86; un σ_A mínimo de 0,38 y máximo de 0,80, las amplitudes del peak varían entre 4,01 y 9,04 promediando 5,96. Entre 5,5 y 6,5 Hz se encuentran las estaciones QC09 y QC12 también con bajos valores de σ_f y σ_A (Apéndice B).

De las estaciones QC10 y QF11 que encontraron sus peak en una frecuencia más baja, entre 1,5 y 2,5 Hz, podríamos decir que se debe a que se promediaron 26 y 18 curvas H/V, siendo este un número relativamente bajo (Figura 23), sin embargo, considerando los datos de σ_f y σ_A que son muy pequeños, en ambas estaciones, diremos que los peak se encuentran bien posicionados e incluso, no se alejan tanto de estaciones como la U37B, U40B o QC02 donde fueron promediados 176, 333 y 2073 curvas H/V y cuyos peak se encuentran en el intervalo de frecuencia siguiente es decir de 2,5 a 3,5 Hz.

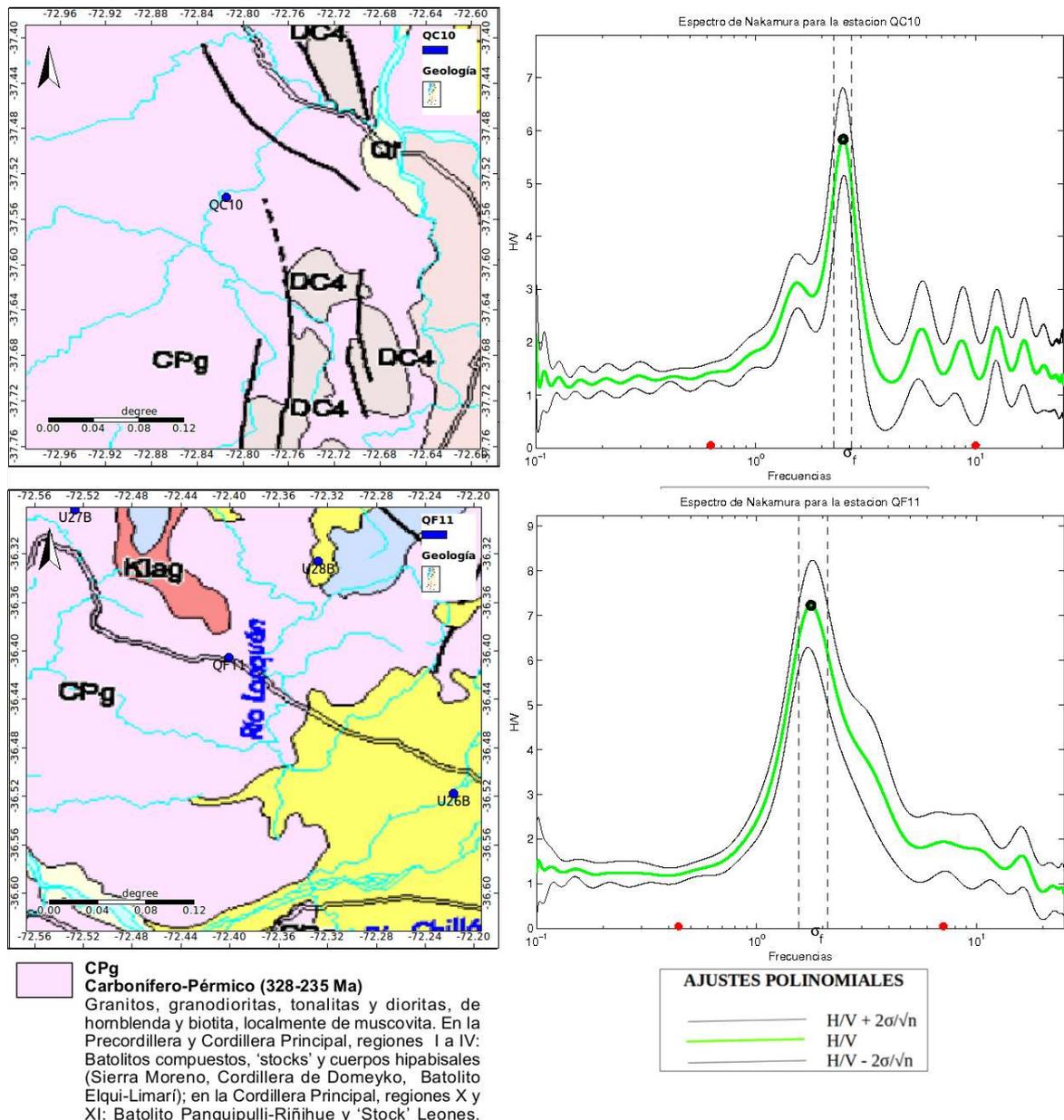


Figura 23: Estaciones QC10 y QF11 en roca intrusiva (círculos azules). A la derecha sus respectivos espectros H/V

Ahora bien las estaciones QF14 y QC06 cuyos peak fueron encontrados entre los 7,5 y 9,5 Hz si tienen un σ_f alto, de 6,42 y 3,9 por lo que sus peak podrían encontrarse en otro intervalo de frecuencias (Figura 24).

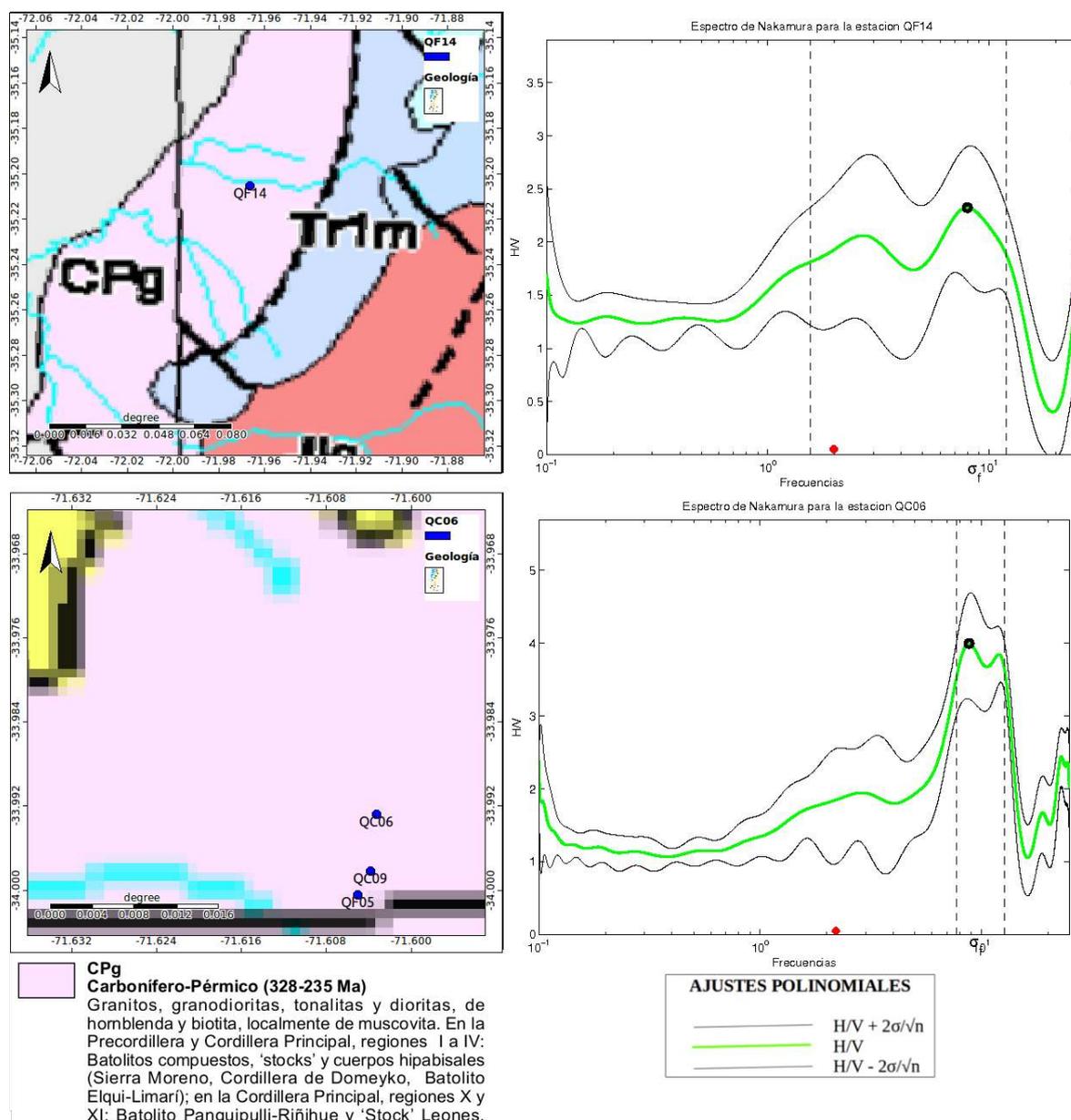


Figura 24: Estaciones QF14 y QC06 en suelo intrusivo y sus respectivas curvas H/V.

6.5. Roca Metamórfica

La roca metamórfica es el resultante de las transformaciones ocurridas en los minerales y en las rocas mismas, pre-existentes, por acción del proceso de metamorfismo. Las rocas pre-existentes pueden ser ígneas, sedimentarias y metamórficas de menor grado de metamorfismo (Dorado, 2015).

Al analizar las estaciones sobre roca metamórfica nos damos cuenta que al igual que las estaciones sobre roca intrusivas tienen solo un peak (Figura 25).

Según el histograma la mayoría de los peak están entre los 1,5 y 3,5 Hz, sin embargo, tenemos estaciones alejadas, como la estación U57B cuyo peak se encuentra a 18 Hz por lo que requiere un análisis en particular (Figura 26). En este caso se promediaron 1780 curvas H/V, si vemos el mapa geológico podemos observar que se encuentra en el límite entre un suelo de tipo metamórfico y uno intrusivo, si bien los peak de las estaciones sobre suelo intrusivo se

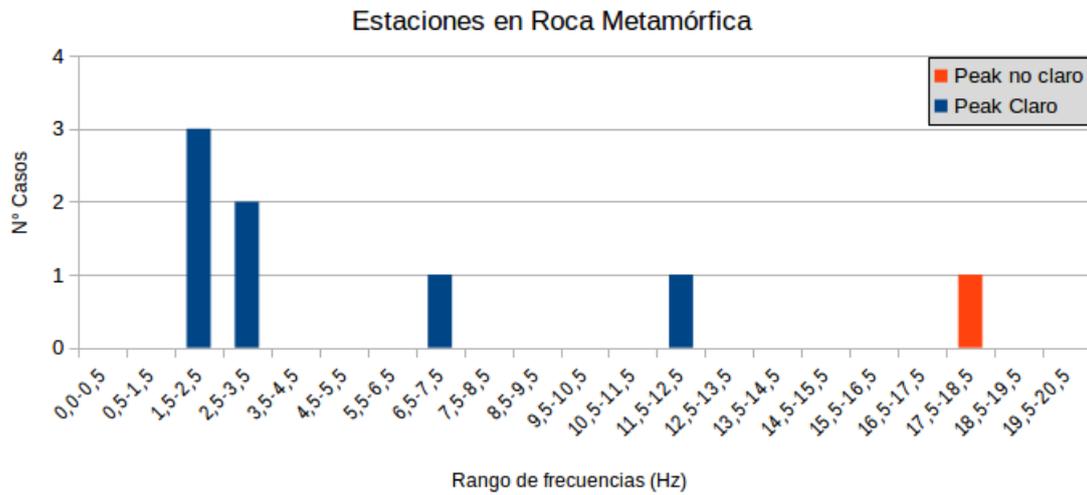


Figura 25: Histograma para las estaciones sobre roca metamórfica con sólo 1 peak.

encuentran a valores altos, como analizamos anteriormente, éstas se encontraron en su mayoría alrededor de los 5 Hz.

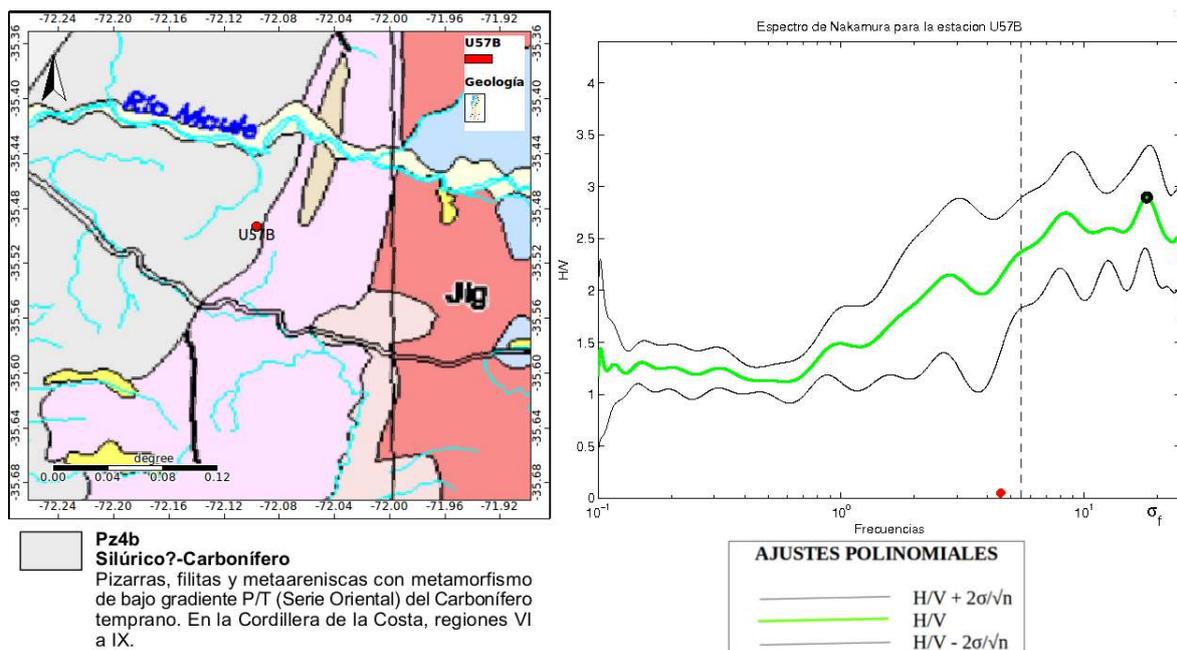


Figura 26: Estación U57B en suelo metamórfico y su respectivo espectro H/V.

Ahora bien analizando los datos de la estación encontramos que tiene un σ_f de 12, valor muy alto que nos indica que el peak en realidad podría encontrarse 12 unidades más abajo o más arriba de la detectada, si consideramos que el valor del peak es de 2,89 y que el σ_A es de 0,49 podríamos decir que incluso podría no haber un peak significativo. Ésta estación cumple sólo con el criterio de claridad III.

La otra estación que vemos un poco aislada es la estación U16B cuyo σ_f es de 3,72, un valor alto que nos indica que el peak seleccionado en este caso en realidad no fue muy preciso (Figura 27).

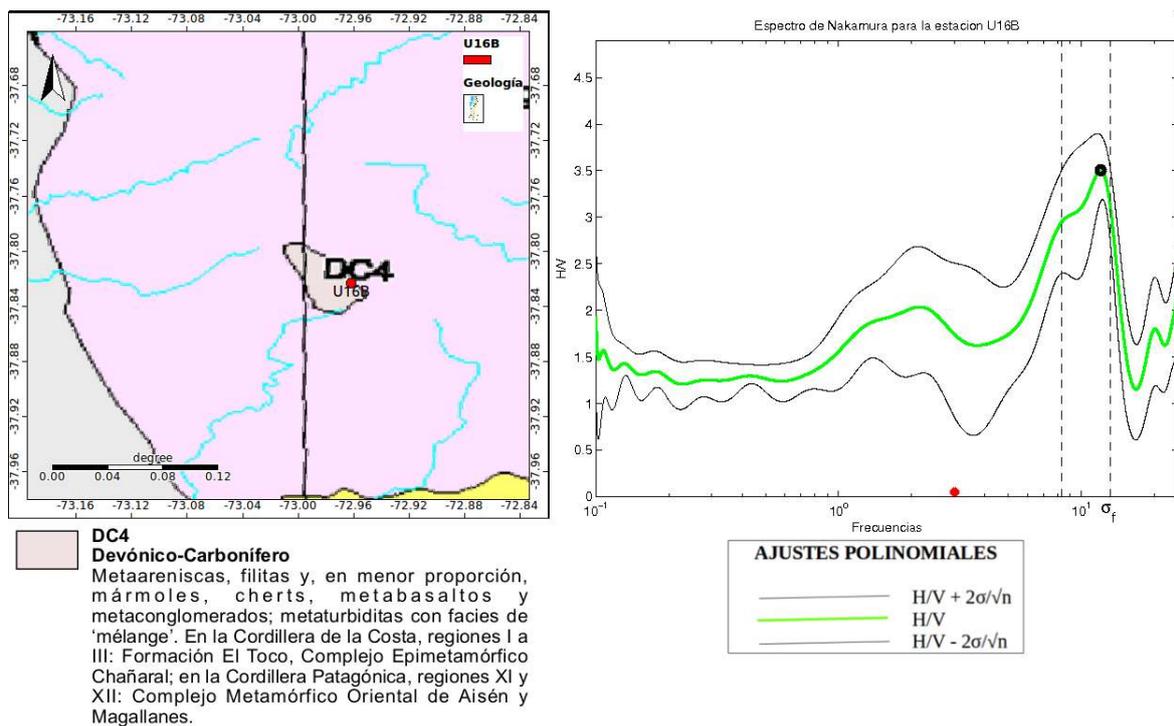


Figura 27: Estación U16B en suelo metamórfico y a su derecha su espectro H/V.

Todas las demás estaciones tienen números altos de curvas H/V promediadas, bajos σ_f y σ_A cuyos peak entre todos promedian 5,62.

6.6. Correlaciones

En base a los datos con los que hemos contado, para el desarrollo de esta tesis, para cada estación, que son la frecuencia peak, el valor de H/V en dicha frecuencia peak, los valores de efecto de sitio, V_{s30} e índice de multiresolución de llanura del valle (MRVBF). Se procedió a correlacionarlos encontrando las siguientes relaciones 3.

	Peak<1 Hz	Peak>1 Hz	1 Peak	Peak mayor
Frecuencia(Hz) v/s H/V	0,1630	-0,3333	-0,0570	-0,0641
H/V v/s Efecto de sitio	-0,3256	0,0174	0,4271	0,4190
Frecuencia(Hz) v/s Efecto de sitio	-0,3097	-0,099	-0,1420	-0,1139
H/V v/s V_{s30}	-0,3173	-0,2283	-0,0322	-0,0105
Frecuencia(Hz) v/s V_{s30}	0,1805	0,2441	0,0847	0,0826
H/V v/s MRVBF	0,4708	0,1316	0,0396	-0,0092
Frecuencia(Hz) v/s MRVBF	0,1085	-0,1939	-0,1615	-0,2539
Número de estaciones	22	22	60	82

Cuadro 3: Valores de correlaciones calculados.

6.6.1. Frecuencia v/s H/V.

En general se espera que los sitios con mayor contraste de impedancia (H/V grandes) estén asociados a frecuencias de sitio más bajas, relacionadas con capas de suelo de mayor espesor, sin embargo, también existen sitios donde hay gran contraste de impedancia y la capa de suelo superficial es más reciente y sería más delgada, lo que se asocia a una frecuencia alta. Por lo anterior, las correlaciones en este caso no siempre serán negativas.

Se encuentran correlaciones negativas para todas las clasificaciones de peak, menos para el caso de frecuencias peak menores a 1 Hz (Figura 28 y la mejor correlación se obtiene para el Peak >1 Hz de las estaciones con 2 peak, con un valor de un -33,33 % (Figura 29).

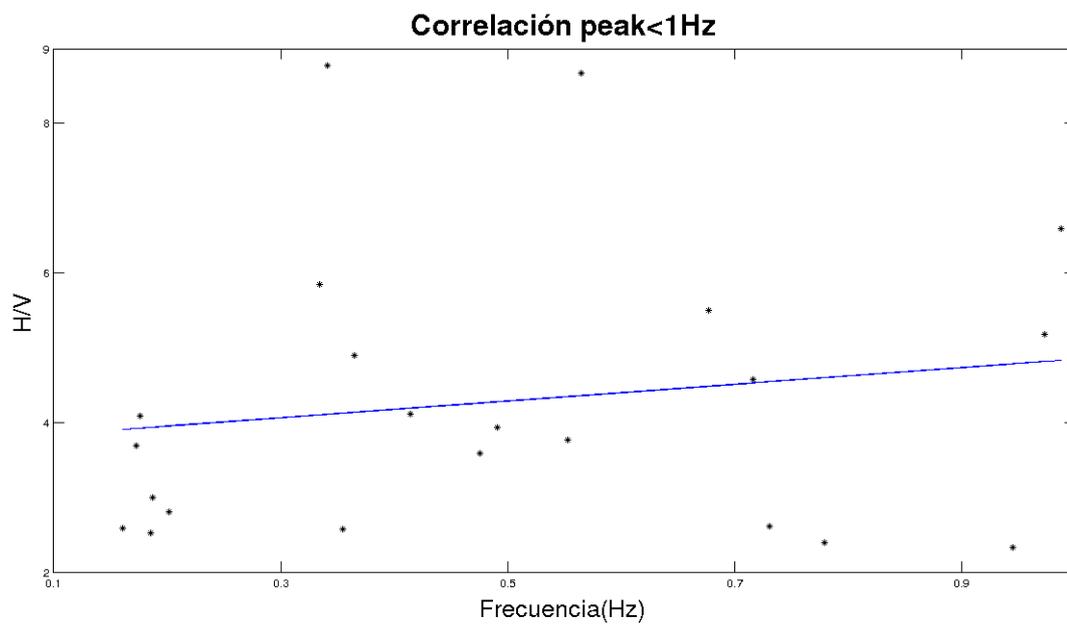


Figura 28: Correlaciones Frecuencia(Hz) v/s H/V, Peak < 1 Hz.

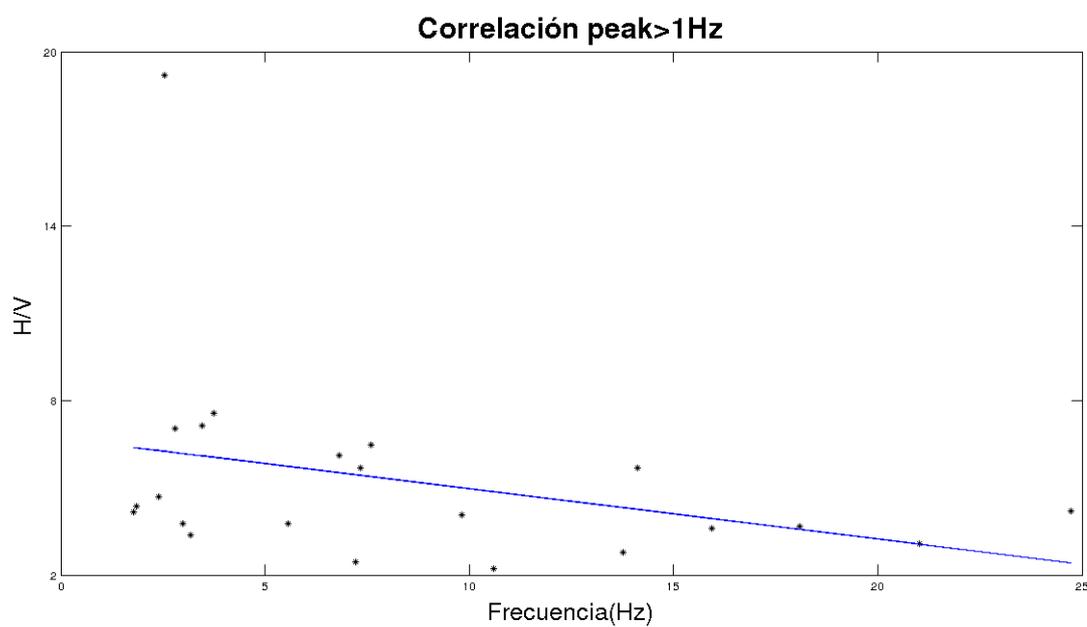


Figura 29: Correlaciones Frecuencia(Hz) v/s H/V, Peak > 1 Hz.

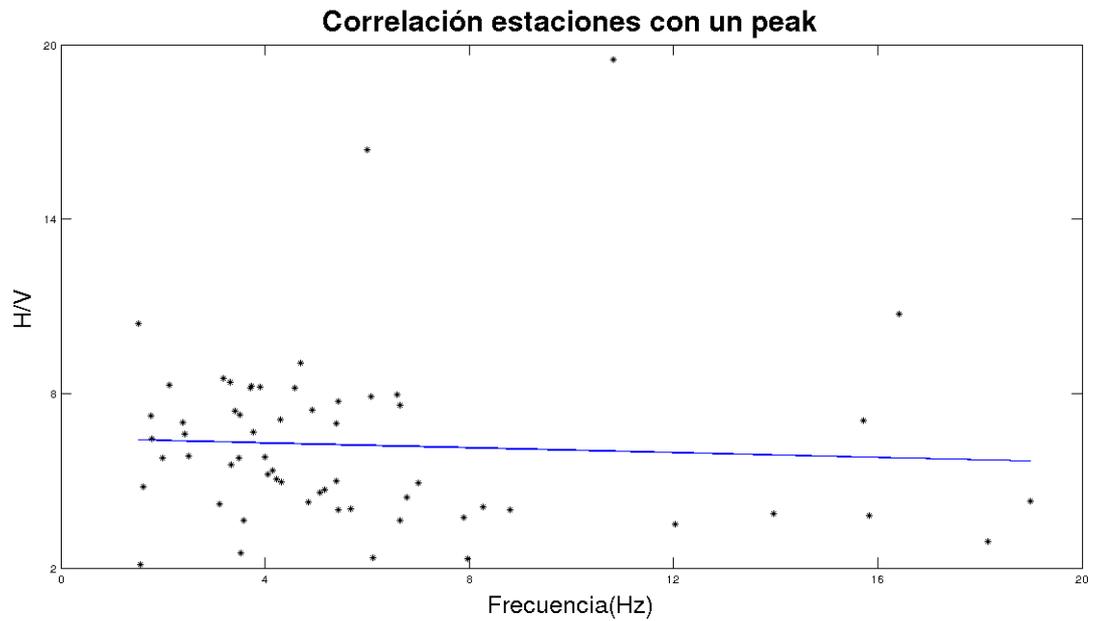


Figura 30: Correlaciones Frecuencia(Hz) v/s H/V, 1 Peak.

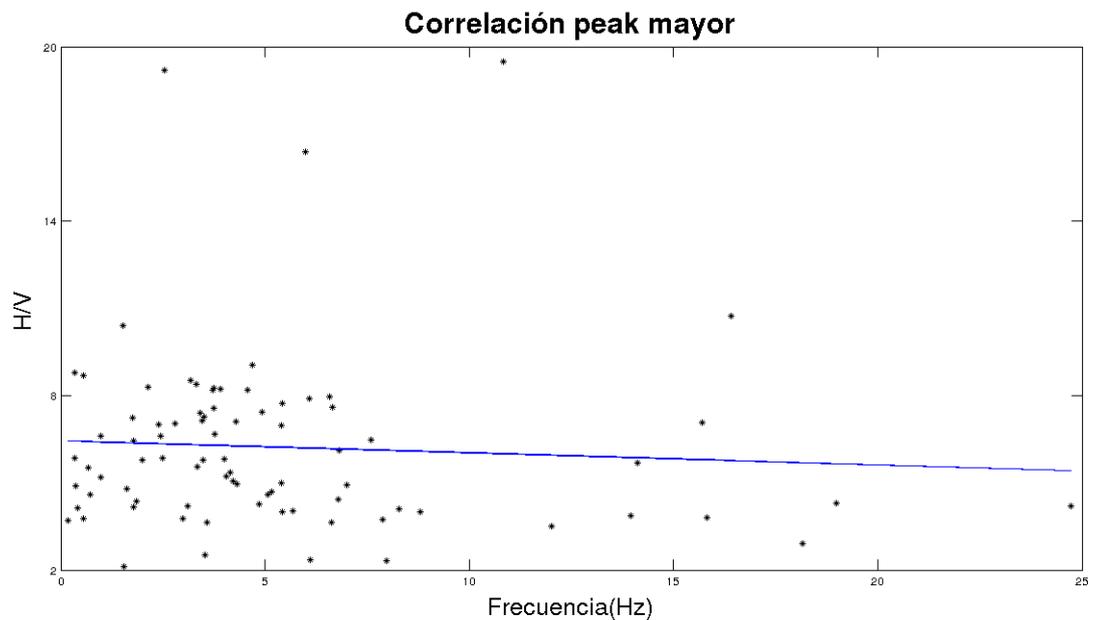


Figura 31: Correlaciones Frecuencia(Hz) v/s H/V, Peak mayor.

6.6.2. H/V v/s efecto de sitio.

La relación esperada entre el efecto de sitio y el valor de H/V en la frecuencia peak es que a medida que aumenta el contraste de impedancia aumente también la amplificación natural del sitio, ésta relación esperada tampoco se cumple para el caso de frecuencias peak menores a 1 Hz y es prácticamente nula para el caso de los peak mayores a 1 Hz, por lo que las curvas H/V con dos peak no obtienen buenas correlaciones debido a que se asocian a una estructura más compleja bajo la estación (Figuras 32 y 33). Por otra parte, se obtienen ligeras correlaciones de 42,71 % y 41,9 % para las clasificaciones de un solo peak y la de los mayores peak respectivamente

(Figuras 34 y 35). Las curvas H/V con un peak se asocian a una estructura más simple debajo de la estación y, por eso, quizás se notan mejores correlaciones entre estos parámetros, ya que no habrían complicaciones a esta teoría.

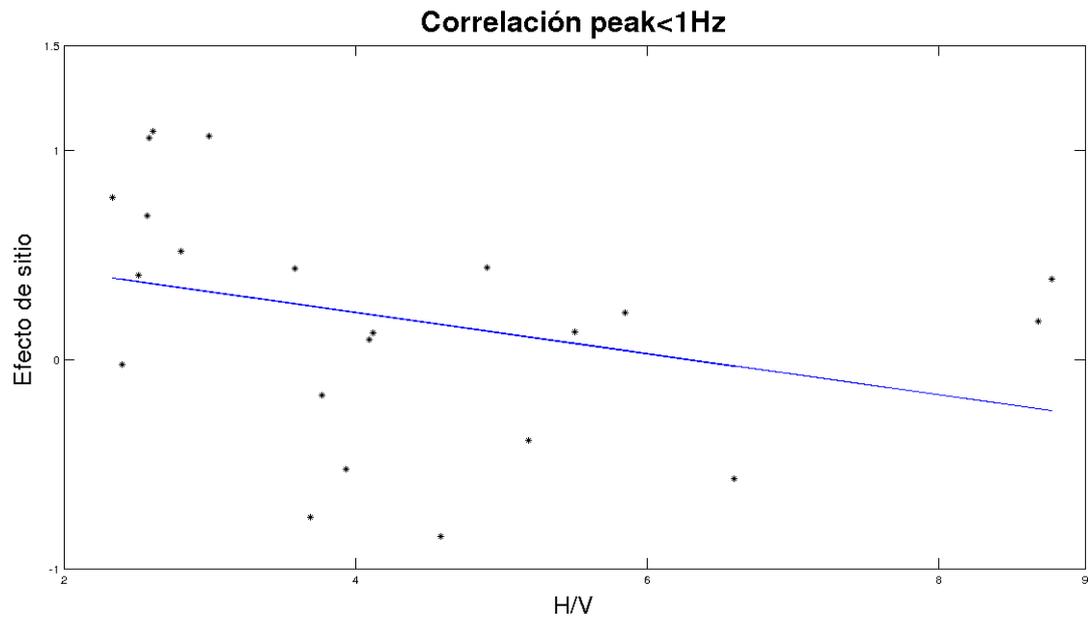


Figura 32: Correlaciones H/V v/s Efecto de sitio, Peak <1 Hz.

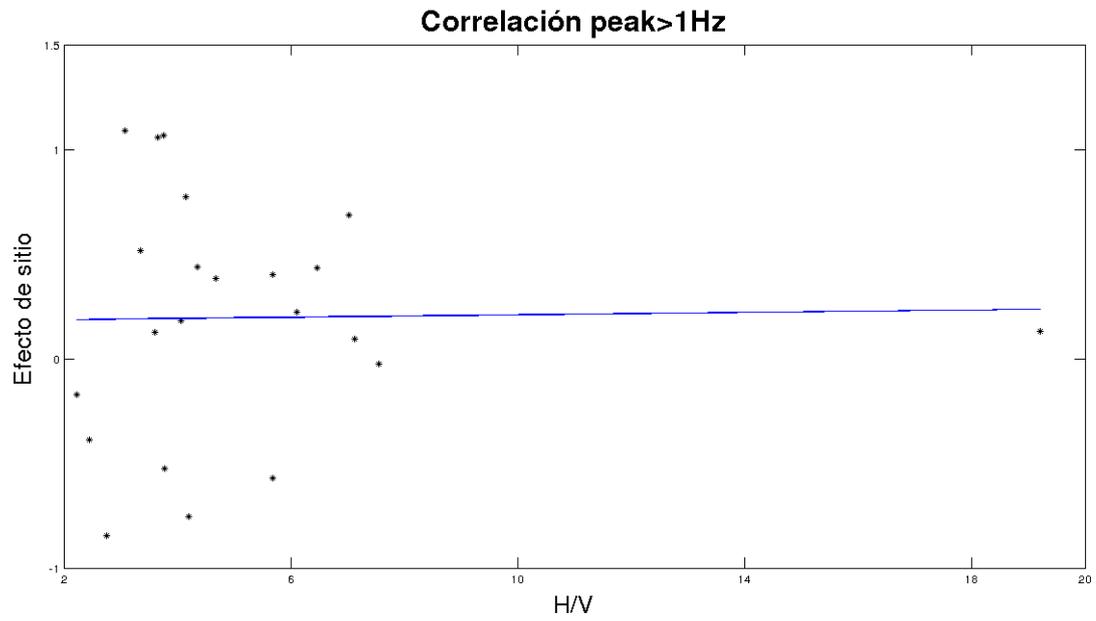


Figura 33: Correlaciones H/V v/s Efecto de sitio, Peak >1 Hz.

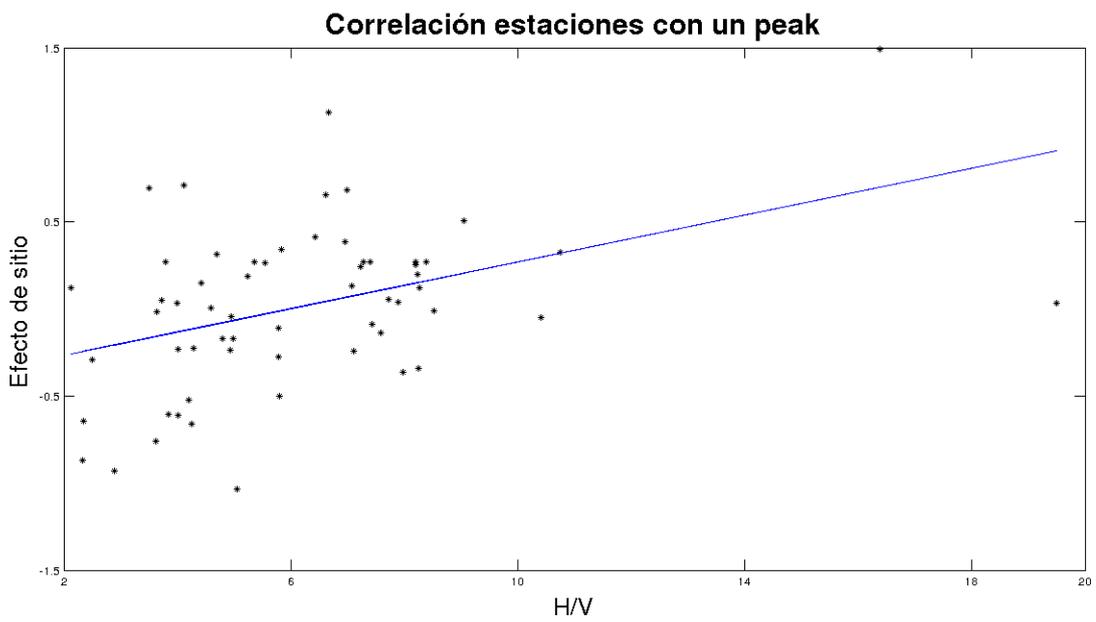


Figura 34: Correlaciones H/V v/s Efecto de sitio, 1 Peak.

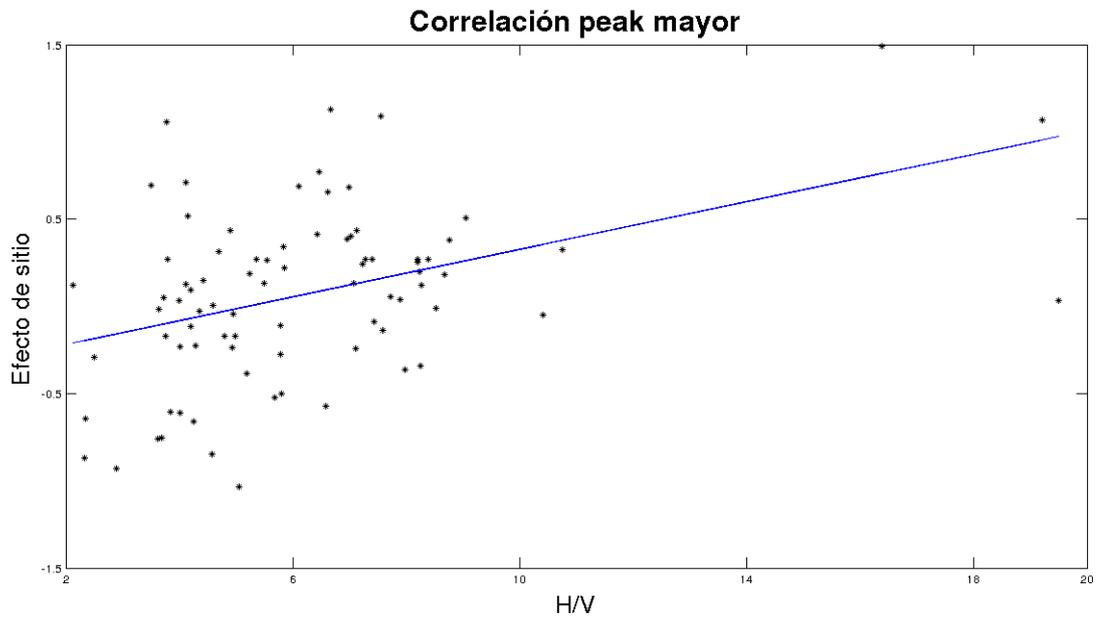


Figura 35: Correlaciones H/V v/s Efecto de sitio, Peak mayor.

6.6.3. Frecuencia y efecto de sitio.

La relación entre la frecuencia y el efecto de sitio debería ser inversa, ya que menores frecuencias, asociadas a capas de atrapamiento de la energía de mayor espesor, deberían estar correspondidas a una mayor amplificación natural del sitio (Figuras 36, 37, 38, y 39). Aunque las correlaciones halladas fueron inversas estadísticamente no son suficientemente relevantes para confiar. Como se mencionó anteriormente esta baja relación quizás se puede deber a que como lo frecuencia está asociada al espesor y el efecto de sitio depende en cierta medida del contraste de impedancia entonces, si no hay una relación fuerte entre el contraste de impedancia y el espesor, entonces tampoco será posible encontrar una buena correlación entre estos parámetros.

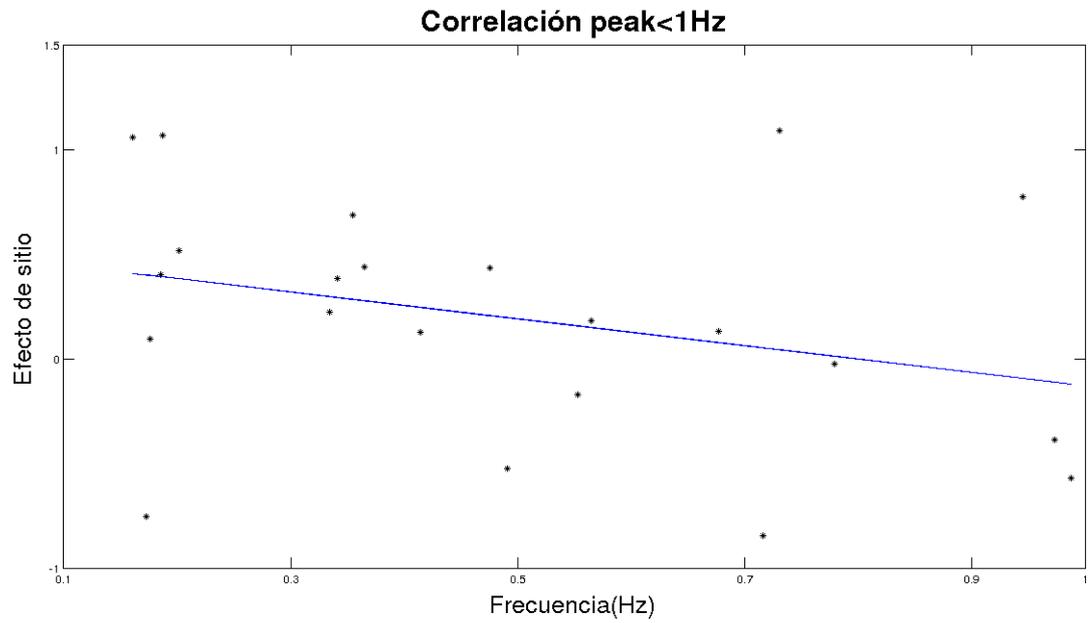


Figura 36: Correlaciones Frecuencia(Hz) v/s Efecto de sitio, Peak <1 Hz.

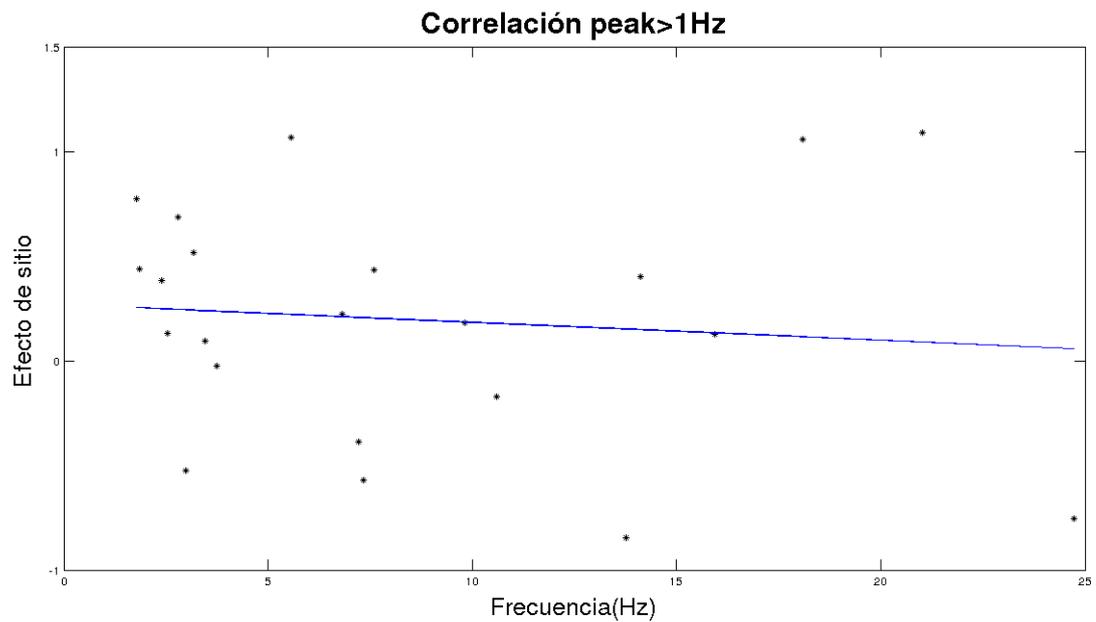


Figura 37: Correlaciones Frecuencia(Hz) v/s Efecto de sitio, Peak >1 Hz.

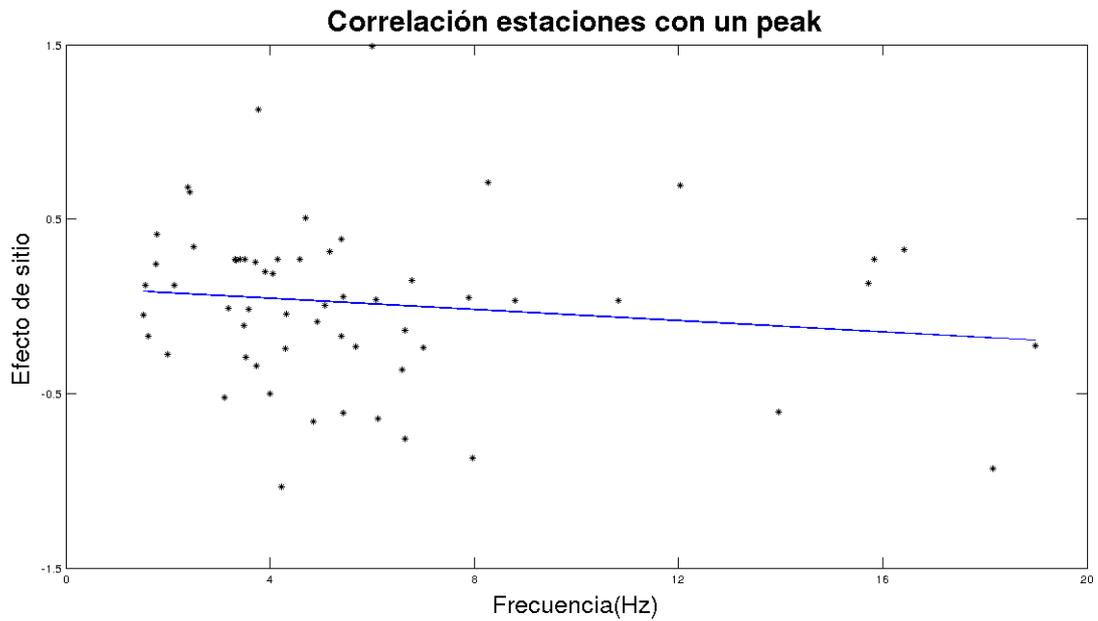


Figura 38: Correlaciones Frecuencia(Hz) v/s Efecto de sitio, 1 Peak.

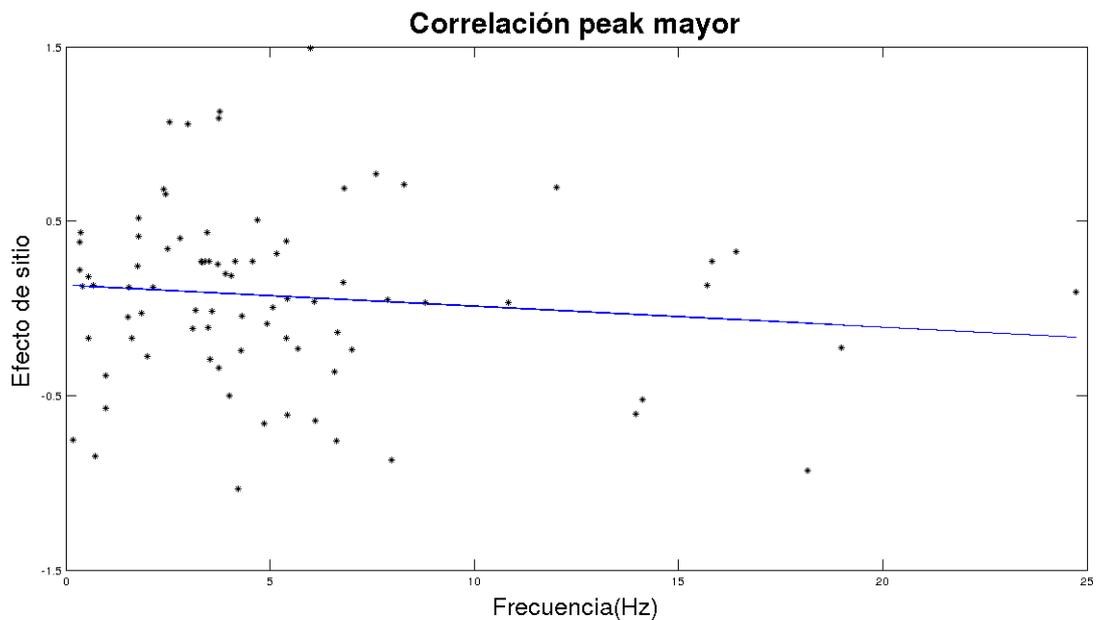


Figura 39: Correlaciones Frecuencia(Hz) v/s Efecto de sitio, Peak mayor.

6.6.4. H/V v/s V_{S30}

Como el V_{S30} es un parámetro que nos advierte del nivel de compactación del suelo, se espera que a medida que éste sea mayor, el suelo esté compuesto por materiales más densos. Por otra parte el H/V nos indica el contraste entre las capas que componen el suelo, por lo que mayores valores de H/V deberían estar asociados a capas superficiales de menor compactación que el basamento y, por lo tanto, a menores valores de V_{S30} .

Se observa que todas las clasificaciones de peak muestran esta relación negativa, siendo las

correlaciones más altas las obtenidas por los peak menores que 1 Hz de un -31,73 % (Figura 40) y seguidas por el -22,83 % de los peak mayores a 1 Hz (Figura 41).

El V_{s30} , fue calculado a partir de datos topográficos (Villegas, 2018), por lo que el valor es sólo una estimación, debido a las limitaciones del método, es posible que tenga mucho error (Allen y Wald, 2007). Si se utilizaran mediciones de V_{s30} las tendencias en las figuras 40-43 serían más claras.

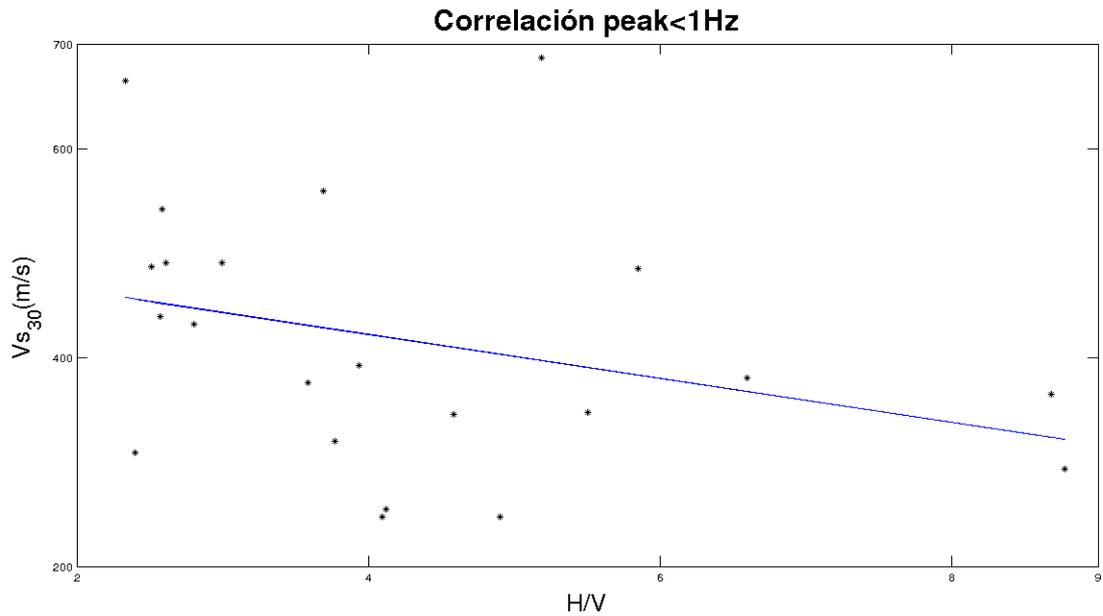


Figura 40: Correlaciones H/V v/s V_{s30} , Peak <1 Hz.

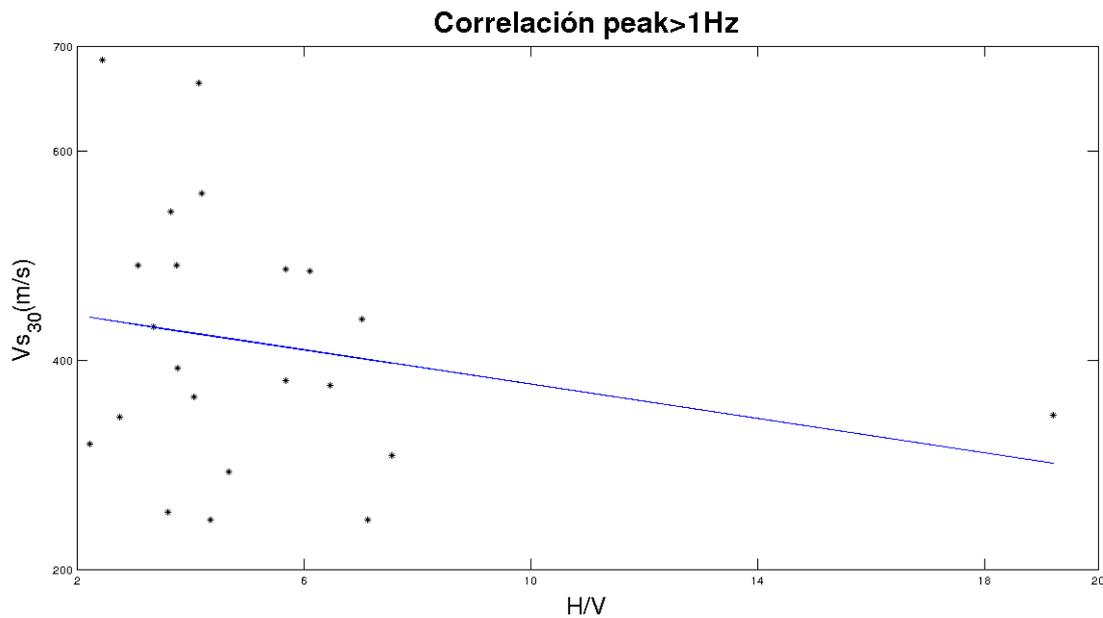


Figura 41: Correlaciones H/V v/s V_{s30} , Peak >1 Hz.

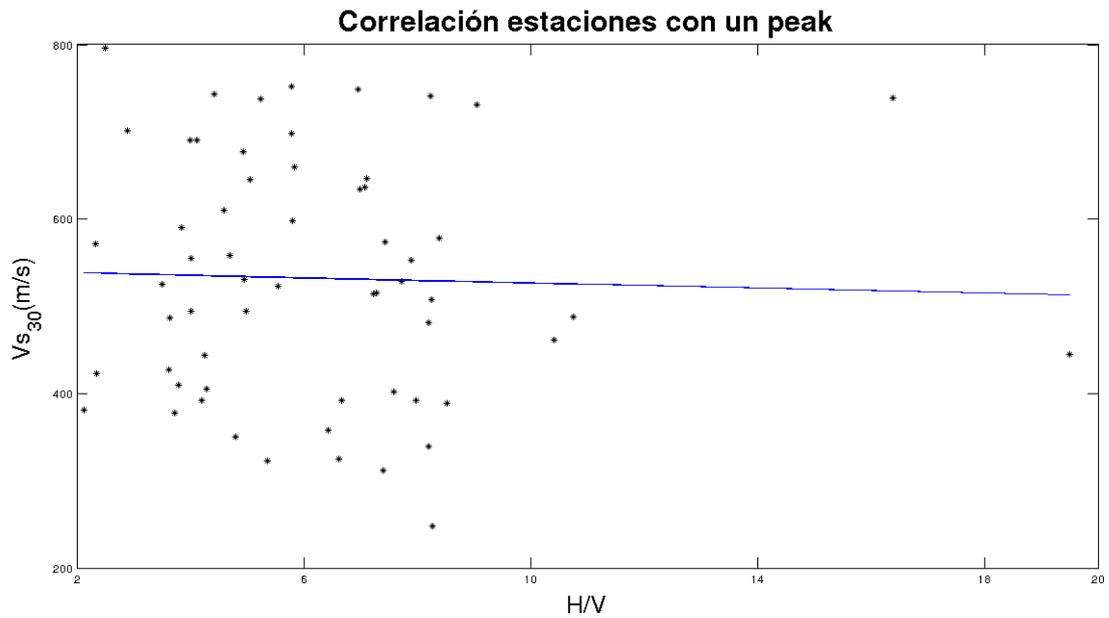


Figura 42: Correlaciones H/V v/s V_{s30} , 1 Peak.

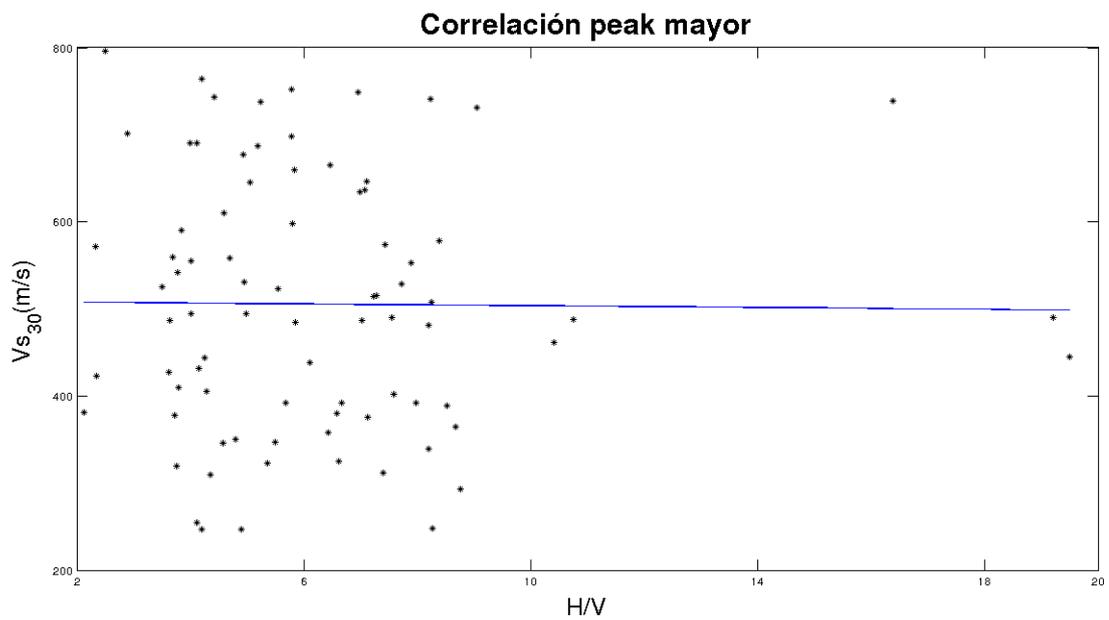
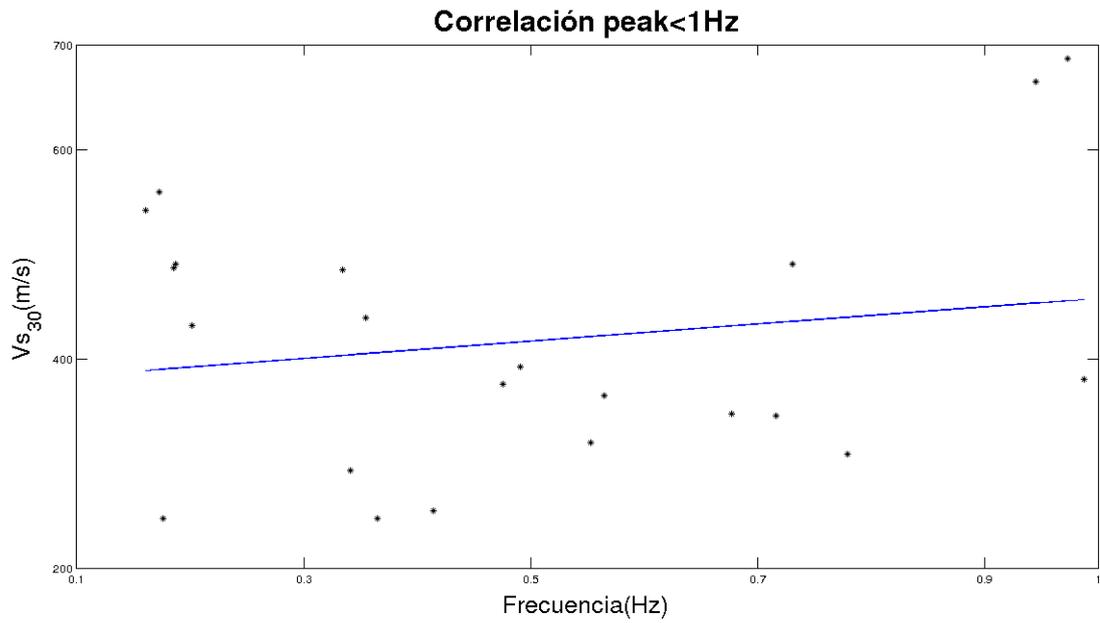
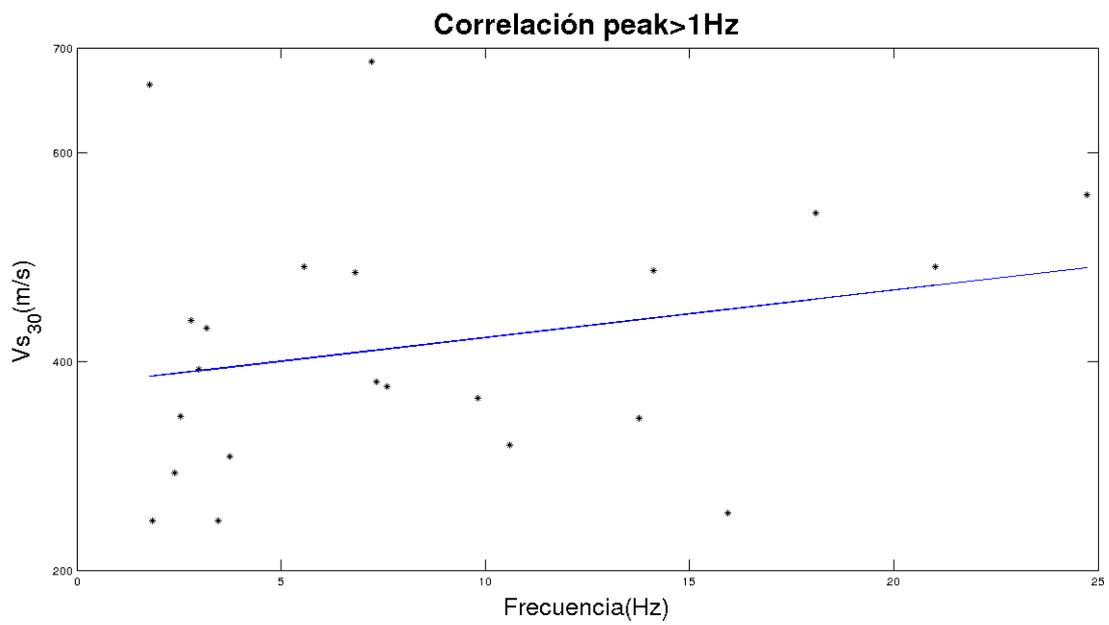


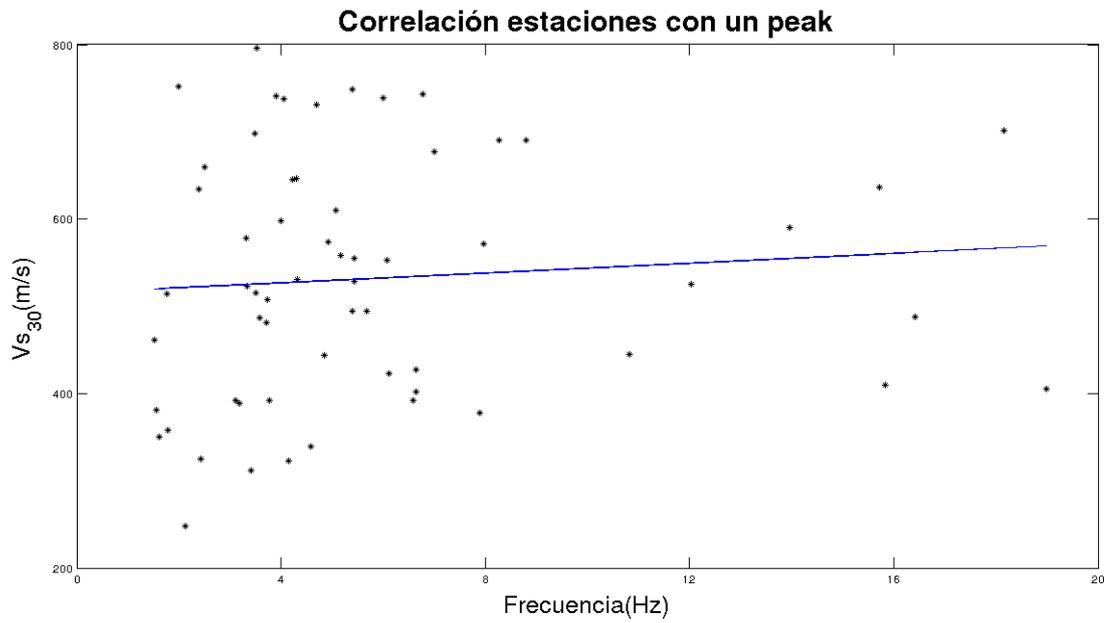
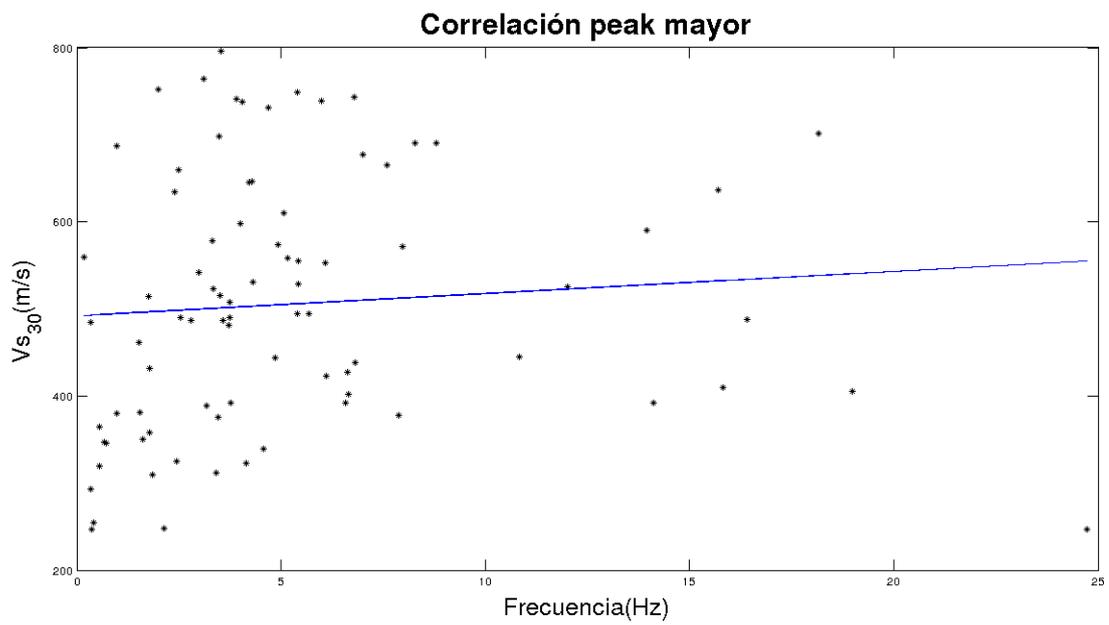
Figura 43: Correlaciones H/V v/s V_{s30} , Peak mayor.

6.6.5. Frecuencia v/s V_{s30} .

De acuerdo a lo indicado anteriormente mayores V_{s30} indican mayor compactación del suelo y, por lo tanto, menor diferencia entre el basamento y el material de la superficie. Similarmente mayores valores de frecuencia fundamental del suelo están asociadas a capas más delgadas, por lo que éstos parámetros deberían presentar una relación directa.

Todas las clasificaciones de peak muestran esta relación siendo la mayor correlación obtenida por los peak mayores a 1 Hz de un 24,41 % (Figura 45).

Figura 44: Correlaciones Frecuencia(Hz) v/s Vs₃₀, Peak <1 Hz.Figura 45: Correlaciones Frecuencia(Hz) v/s Vs₃₀, Peak >1 Hz.

Figura 46: Correlaciones Frecuencia(Hz) v/s Vs_{30} , 1 Peak.Figura 47: Correlaciones Frecuencia(Hz) v/s Vs_{30} , Peak mayor.

6.6.6. H/V v/s MRVBF.

El índice de multiresolución de llanura del fondo del valle (MRVBF), a partir de datos satelitales de topografía busca identificar los valles, en la superficie terrestre (Villegas, 2018). Estos lugares presentan zonas donde los sedimentos son depositados de forma natural debido a los procesos de erosión. Mayores valores de este índice están asociados a lugares con mayor acumulación de sedimentos, lo que produce un aumento en el contraste entre las capas de suelo más superficiales y el basamento y, por lo tanto, mayores valores de H/V.

Hay que considerar que la confiabilidad del índice MRVBF depende totalmente del modelo de elevaciones a considerar, siendo en este caso el modelo obtenido por el satélite SRTM con una resolución de 3 arcosegundos (≈ 90 metros en el Ecuador).

Se observan valores de correlación positivos en todas las clasificaciones de peak salvo en el caso de los peak de mayores amplitudes (Figura 51). La mayor correlación se obtiene para el caso de los peak menores a 1 Hz correspondiente al 47,08 % (Figura 48). En este último caso, los peak están asociados con estructuras más profundas, lo que implica una mayor correlación con el MRVBF, el cual busca destacar valles grandes.

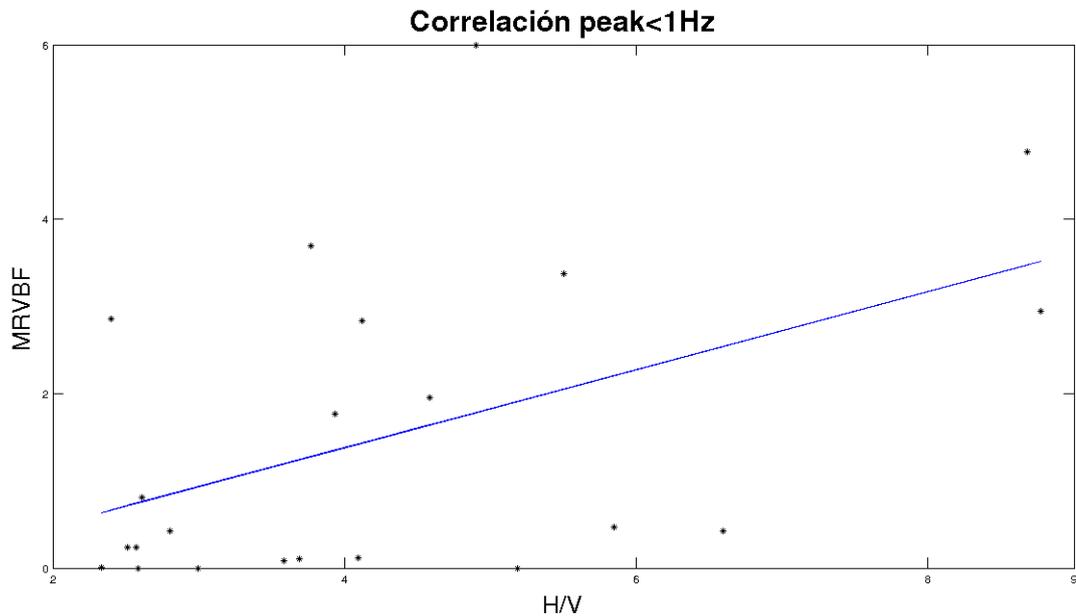


Figura 48: Correlaciones H/V v/s MRVBF, Peak <1 Hz.

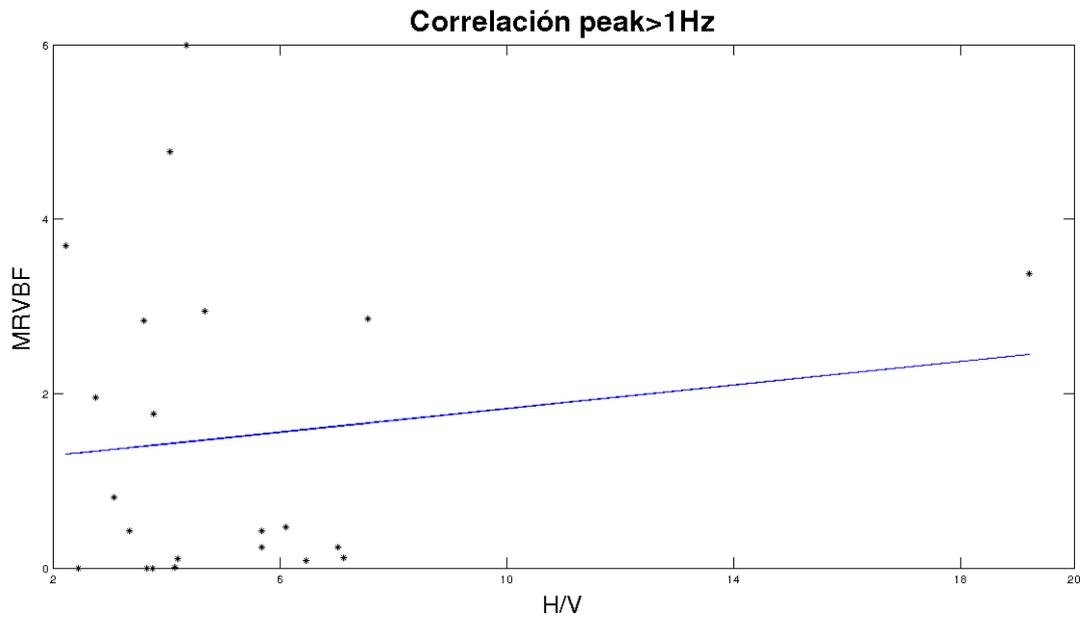


Figura 49: Correlaciones H/V v/s MRVBF, Peak >1 Hz.

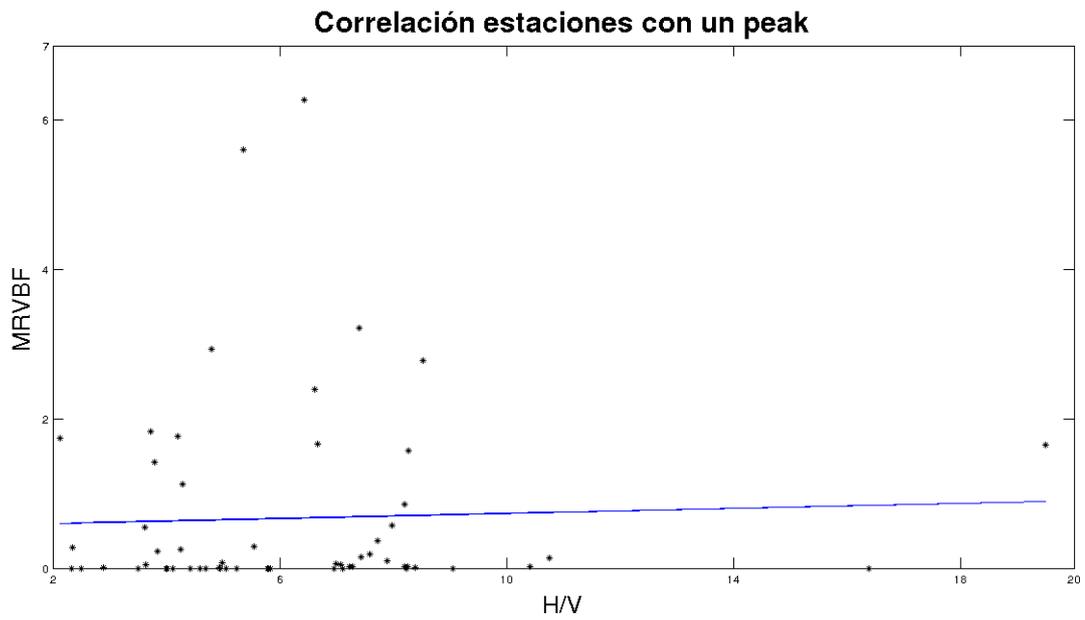


Figura 50: Correlaciones H/V v/s MRVBF, 1 Peak.

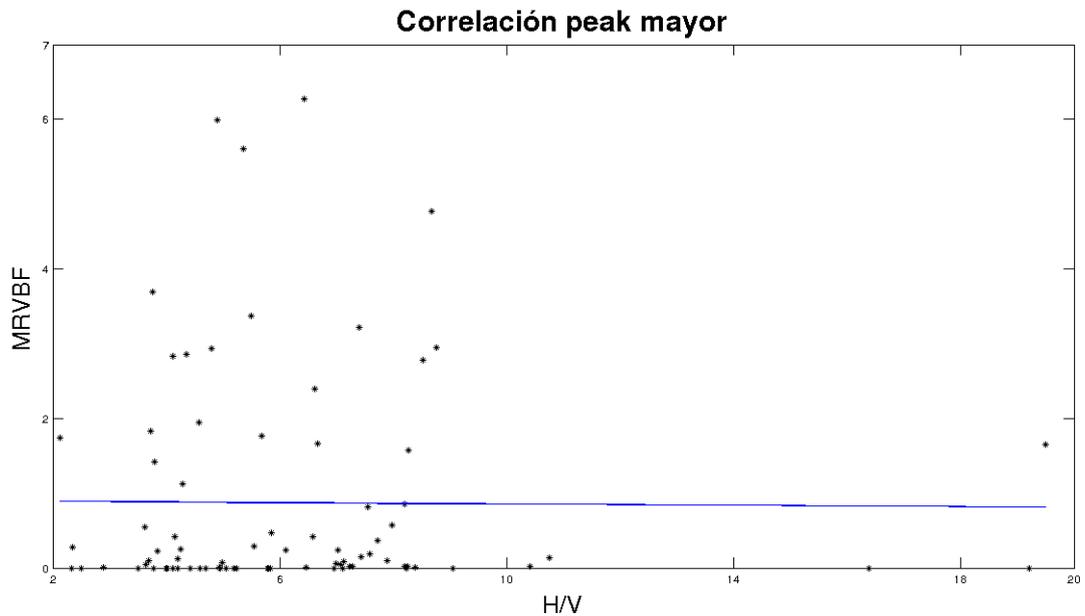


Figura 51: Correlaciones H/V v/s MRVBF, Peak mayor.

6.6.7. Frecuencia v/s MRVBF.

Se espera que mayores valores de MRVBF, estén asociados a capas de suelo de mayor profundidad y, por lo tanto, menores frecuencias fundamentales.

El único caso que presenta una relación positiva es para los peak menores a 1 Hz. El resto de los casos presenta la relación inversa esperada, siendo la mayor correlación de un 25,39% obtenida por los peak mayores (Figura 55). Es importante considerar que los datos topográficos utilizados para el cálculo de los índices topográficos (MRVBF y V_{s30}) pueden no ser tan precisos.

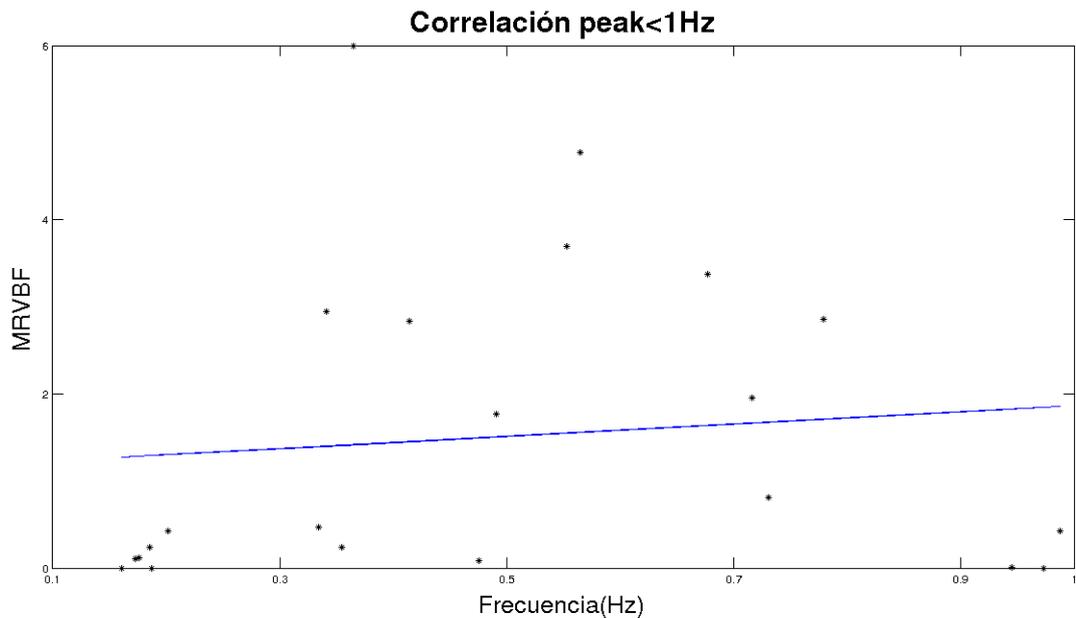


Figura 52: Correlaciones Frecuencia(Hz) v/s MRVBF, Peak <1 Hz.

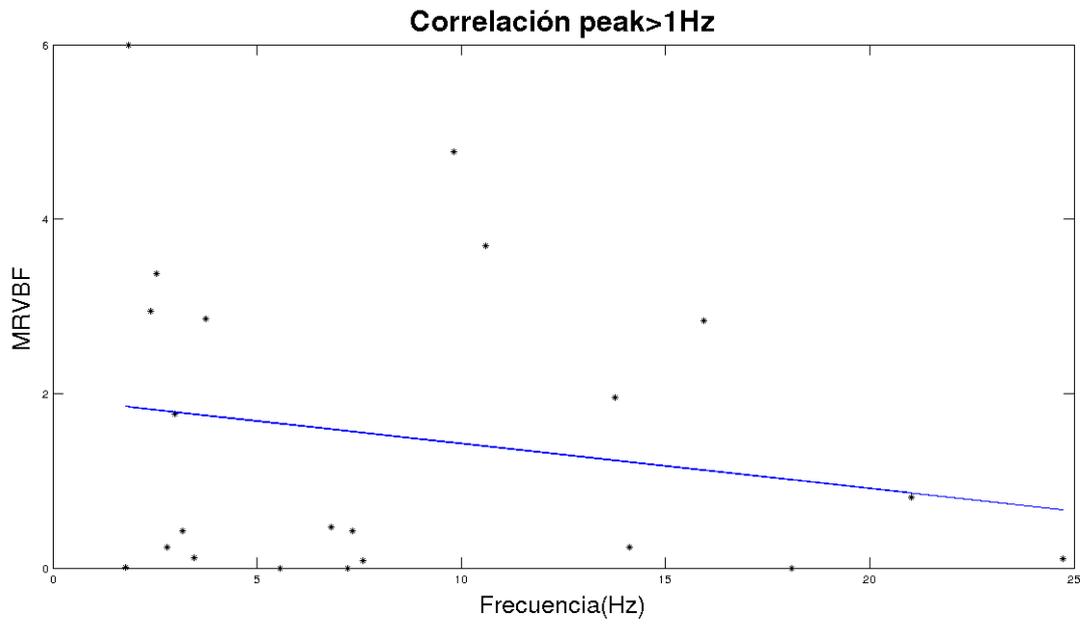


Figura 53: Correlaciones Frecuencia(Hz) v/s MRVBF, Peak >1 Hz.

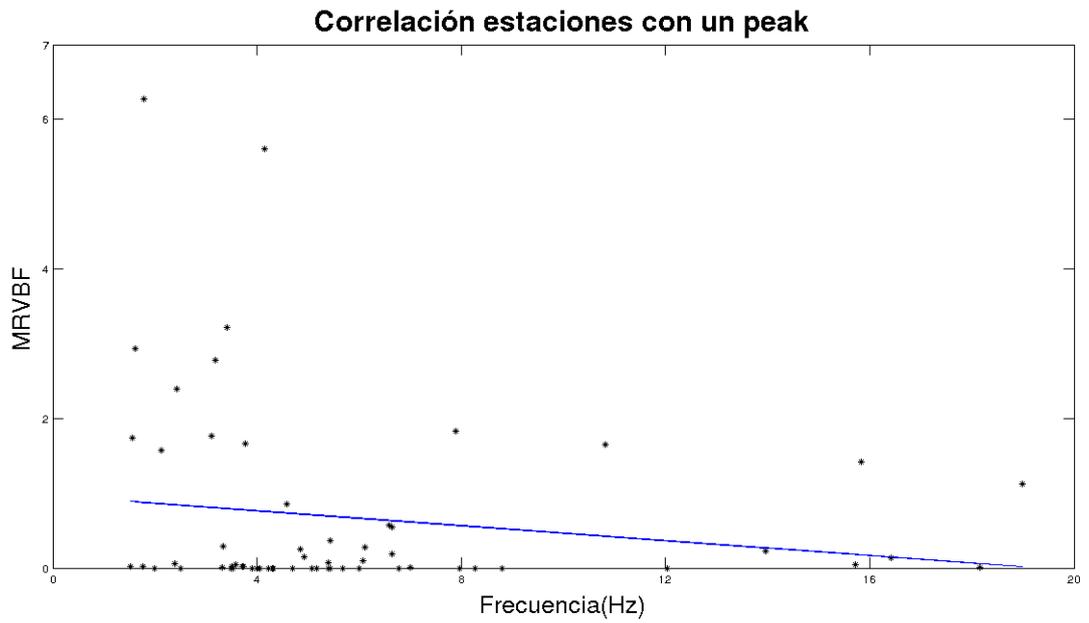


Figura 54: Correlaciones Frecuencia(Hz) v/s MRVBF, 1 Peak.

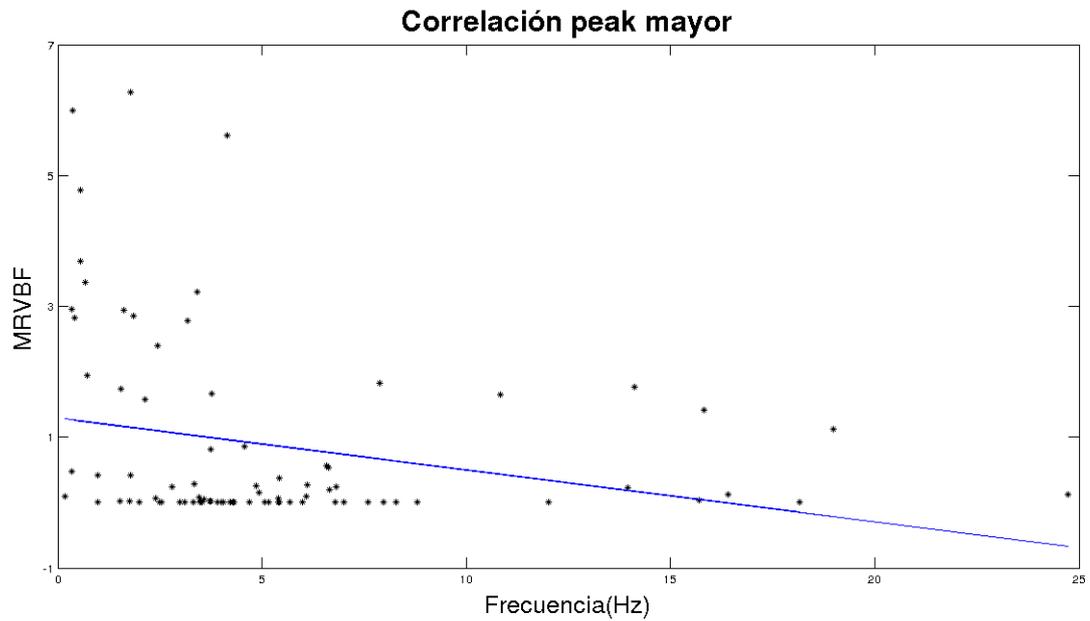


Figura 55: Correlaciones Frecuencia(Hz) v/s MRVBF, Peak mayor.

En resumen, las mejores correlaciones obtenidas se encontraron entre los valores de $H/V(F_0)$ y el efecto de sitio, para los espectros que presentan 1 solo un peak, con un porcentaje de correlación positivo de un 42,71 %, y para los espectros en que se consideró el peak de mayor amplitud, con un porcentaje de correlación también positivo de un 41,9 % (Cuadro 3). Este es un valor esperado ya que la magnitud del valor H/V es un indicador, o parcialmente un indicador de las diferencias entre la capa superficial y el basamento y, mientras mayor sea esta diferencia, mayor será el valor de H/V , por lo que se esperaría un mayor efecto local de amplificación. Por otra parte, llama la atención la buena correlación obtenida entre los valores de $H/V(F_0)$ y el índice MRVBF para el menor peak de los espectros que presentan dos peak. Esto porque el índice MRVBF permite detectar las zonas que facilitan la acumulación de sedimentos y permite, al igual que el método H/V , caracterizar los sitios que presentan una diferencia de composición o compactación entre las capas.

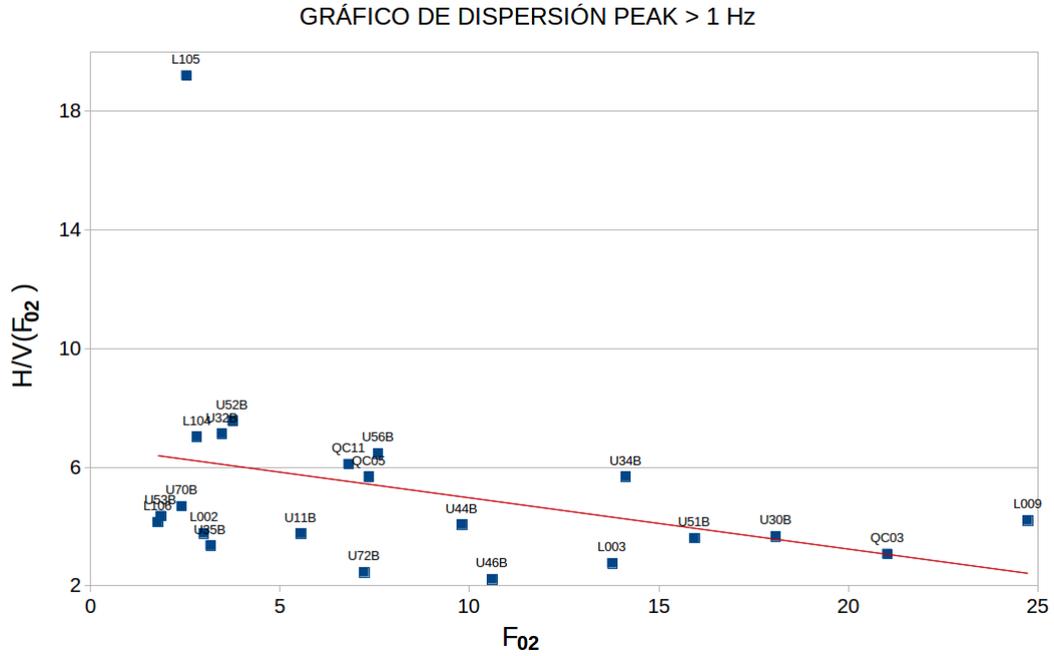


Figura 57: Dispersión entre las variables $H/V(F_{02})$ y F_{02} , peak > 1 Hz.

La figura 57 muestra la dispersión entre las variables F_{02} y $H/V(F_{02})$ considerando el grupo de datos de estaciones con dos peak y refiriéndonos al segundo ubicado a más de 1 Hz. Los datos se encuentran bien cercanos a la línea de tendencia mostrando una correlación del -33,33%. En este conjunto de datos la única estación que se aleja de la tendencia de manera considerable es la estación L105 que a pesar de que se aleja del resto de la nube de datos mantiene un valor acorde con lo esperado presentando una gran amplificación a baja frecuencia (Cuadro A.2).

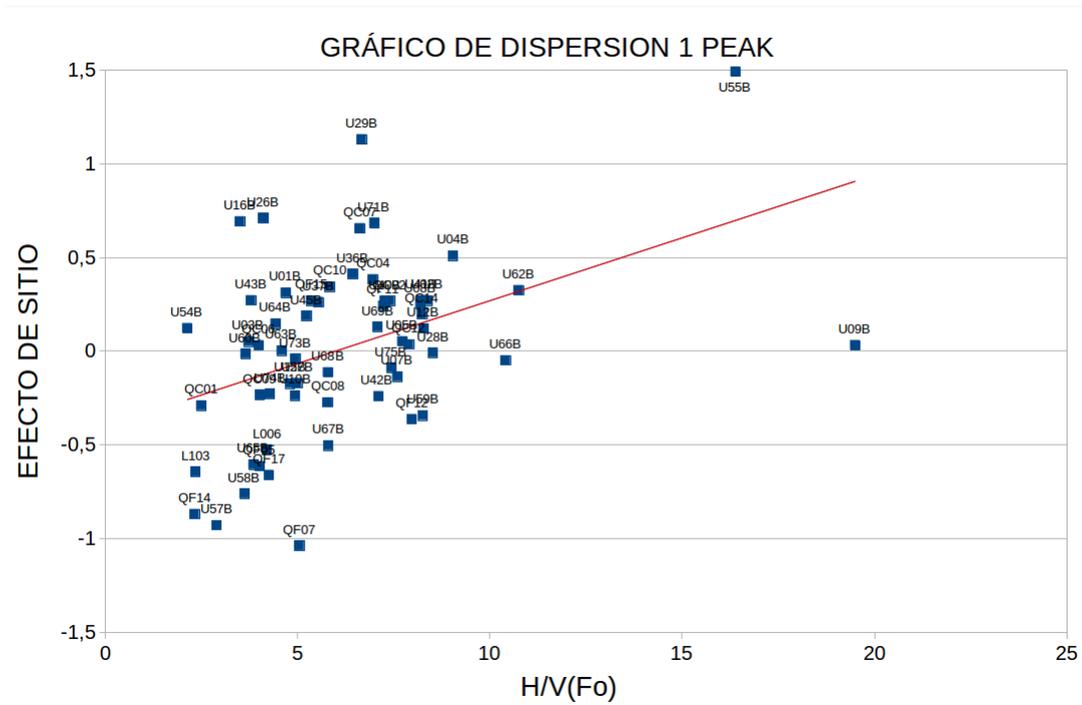


Figura 58: Dispersión entre las variables efecto de sitio y $H/V(F_0)$, 1 peak

La figura 58 considera las estaciones que tienen un solo peak y relaciona las variables de $H/V(F_0)$ y el efecto de sitio. Los datos muestran una tendencia ascendente sin embargo muestran una clara dispersión a la línea de tendencia en particular podemos observar una estación que altera esta tendencia significativamente disminuyendo también la correlación en un 10% aproximadamente, se trata de la estación U09B, la cual presenta una gran amplitud H/V y un efecto de sitio cercano a cero. Podemos ver en la tabla A.3 que la estación mencionada alcanza su amplitud peak a una alta frecuencia (10,8 Hz) y posee un valor de V_{s30} de 444,44 (m/s) que lo sitúan en un tipo de suelo de clase C y, además, el índice MRVBF muestra un valor relativamente bajo de 1,65 el cual puede ser asociado a una zona que se sitúa en el borde de un valle con pendiente poco pronunciada.

Por otra parte, está la estación U55B, con un valor alto de efecto de sitio que se relaciona bien con la gran amplitud del $H/V(F_0)$ en la frecuencia peak de aproximadamente 6 Hz, sin embargo, estos resultados no se relacionan muy bien con los metodologías topográficas de V_{s30} y MRVBF, éstos últimos con valores de 779 (m/s) y 0 respectivamente, asociados a terrenos de gran pendiente y, por lo tanto, baja amplificación local A.3. En este punto podemos cuestionar los datos de la topografía utilizada para determinar el V_{s30} y el índice MRVBF.

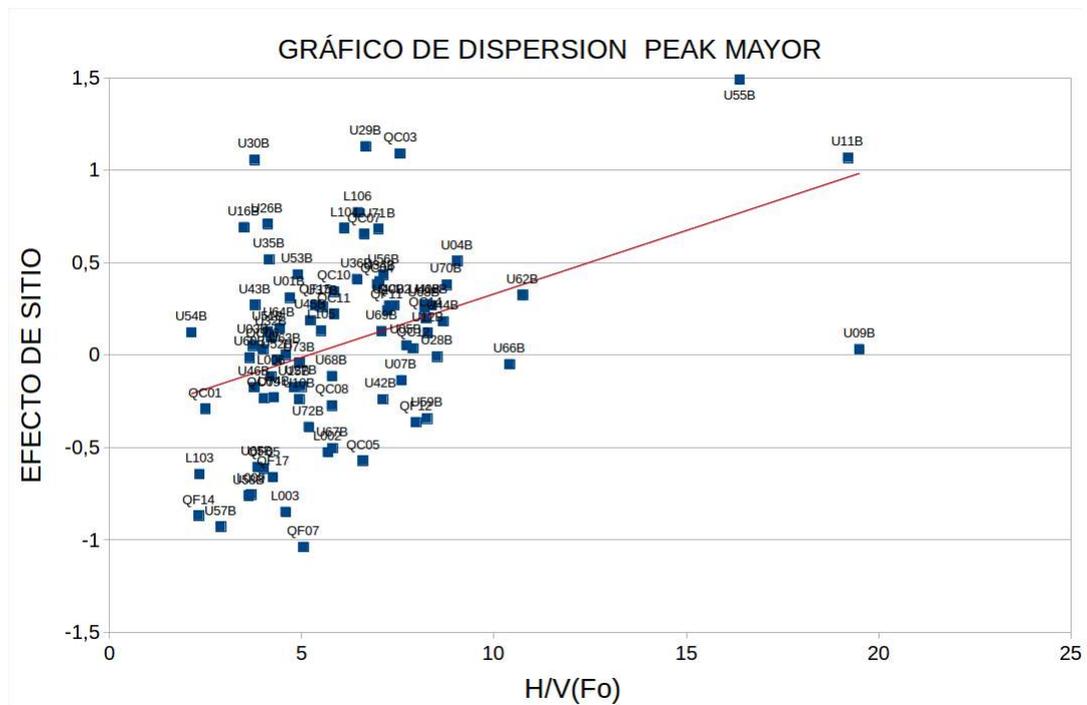


Figura 59: Dispersión entre las variables efecto de sitio y $H/V(F_0)$, peak mayor.

Es importante mencionar que la mejor correlación utilizando toda la base de datos se encuentra entre el H/V del peak de mayor amplitud y el efecto de sitio (Figura 59), sin embargo, al igual que en el gráfico anterior la estación que baja esta correlación es la U09B, lo que no quiere decir que los resultados obtenidos para esta estación sean incorrectos, ya que a pesar de que este peak es de gran magnitud también se encuentra a alta frecuencia (10,82 Hz), lo que puede asociarse a una capa delgada de sedimento (ecuación 10) y justifica de alguna manera el bajo efecto de sitio encontrado.

7. Conclusión.

La metodología utilizada en este estudio permitió hallar las curvas H/V para cada estación analizada y en particular conocer la frecuencia fundamental del suelo (F_0) a la cual éste se amplifica con mayor magnitud considerando simplemente registros de ruido sísmico sin considerar eventos telúricos, lo que resulta en una gran ventaja ya que no existe una necesidad de actividad sísmica para hacer registros. Como ha sido mencionado en esta y otras tesis (Lachet y Bard, 1994; Lermo y Chavez, 1994) nosotros podemos sacar conclusiones a partir de la frecuencia encontrada (F_0) conocida como frecuencia fundamental del suelo, pero no es correcto asociar la amplitud de la curva con la amplificación que experimenta el sitio a esa frecuencia peak, sino que nos entrega información del contraste de impedancia entre las capas de suelo y el basamento. Además, la metodología utilizada nos permite obtener el error máximo de los resultados, que puede ser cuantificado y a su vez nos indica la confiabilidad de estos resultados para cada una de las estaciones consideradas (ver Apéndice B).

La cantidad de horas de registro, cuyo mínimo corresponden a 10 horas, permiten obtener una curva H/V con bajos errores, sin embargo, no todas las estaciones muestran espectros con peak claros y la interpretación requiere más investigación o mediciones de campo en tales casos. El 15% de las estaciones presenta un error en frecuencia (σ_f) mayor a 1.5 Hz, siendo el más importante el de la estación QC01 con un σ_f de 19.45 Hz. Por otra parte, solo una estación presenta un error en amplitud (σ_A) mayor a 2, correspondiente a la estación U11B con un σ_A de 7.68.-

En general, no existe un rango claro de F_0 que pueda asociarse a un cierto tipo de geología. Con el mapa utilizado no fue posible asignar una cierta frecuencia fundamental a un tipo de roca, ya sea sedimentaria, volcánica, entre otras, posiblemente debido a que no es suficiente el número de registros sobre cada tipo de roca en las estaciones consideradas.

En el caso de las rocas intrusivas si fue posible determinar este rango de frecuencias, donde se consideraron 26 estaciones y el 76% de estas presentan su único peak asociado a la frecuencia fundamental entre 2.5 y 6.5 Hz. La mayoría de los peak encontrados sobre roca de tipo metamórfica están entre 1.5 y 3.5 Hz, sin embargo, hay algunas estaciones que se encuentran fuera de este rango y requieren estudios de campo para lograr una mejor justificación.

Todas las estaciones ubicadas tanto en roca intrusiva, roca metamórfica y roca volcanosedimentaria presentan un solo peak lo que significa que se encuentran sobre una geología más simple, mientras que algunas de las estaciones que se encuentran sobre suelos sedimentarios y volcánicos presentan más de un peak, y están asociadas a geologías más complejas bajo el suelo.

Se concluye que los rangos de frecuencia para las estaciones que tienen un peak y se sitúan dentro de un suelo de tipo sedimentario está entre 1,5 y 8,5 Hz. Mientras que las que se encuentran en los bordes de este tipo de suelo y colindan con otros no pertenecen a este rango de frecuencia, sino que corresponden a otro tipo de suelo y atribuimos el error de clasificación a las imprecisiones del mapa geológico utilizado. Las estaciones sedimentarias de dos peak presentan un segundo peak disperso, sin embargo, las estaciones con menores errores e imprecisiones se encuentran entre 1,8 y 9,8 Hz. Además, se logra verificar que 9 de las 13 estaciones presentan el primer peak con amplitud mayor o similar al segundo peak, haciendo más relevante el contraste de impedancia a baja frecuencia asociado a una capa de mayor espesor.

No fue posible asignarle un rango de frecuencia a las estaciones sobre roca volcanosedimentaria.

mentaria ya que sólo contamos con dos muestras en este tipo de suelo y una de ellas no presenta un peak claro, sin embargo, dos de las estaciones que se clasificaron dentro de las rocas sedimentarias, y se ubicaban en el límite geológico con suelo de tipo volcanosedimentario, presentaron un espectro H/V idéntico a la estación perteneciente a suelo volcanosedimentario e incluso el espesor de la profundidad de la primera capa resulta similar, por lo que a partir de esta relación, y considerando estas tres estaciones, se propone que el suelo de tipo volcanosedimentario podría presentar un peak cercano a los 16 Hz.

Las estaciones sobre suelo volcánico con un peak se encuentran principalmente entre el rango de frecuencia de 1,5 a 4,5 Hz aunque también en otras fue hallado su peak entre 6,5 y 8,5 Hz, por otro lado para las estaciones que presentaron un segundo peak no podemos concluir un rango preciso de frecuencia a la que se encontraría este. El rango de frecuencias del segundo peak va de 2.5 a 16.5 Hz.

De las correlaciones realizadas, tenemos cuatro conclusiones principales. En primer lugar existe una leve correlación entre la tasa H/V y el índice MRVBF para frecuencias menores a 1 Hz, relación esperada ya que este índice se concentra en resaltar los valles mas grandes asociados a mayores depósitos sedimentarios y, por ende, también se asocia a mayores contrastes de impedancia.

Por otra parte, se determinó una buena correlación entre la tasa H/V y el efecto de sitio en los peak mayores y los peak únicos, con correlaciones de 41,9% y 42,7% respectivamente, relaciones también esperadas puesto que el efecto de sitio es más importante a medida que las diferencias entre las capas es mayor, lo que está directamente relacionado a la magnitud de la tasa H/V. Sin embargo, se obtuvo una extraña correlación negativa de un -32,6% entre la tasa H/V y el efecto de sitio para los peak encontrados a frecuencias menores a 1 Hz, por lo que cabe cuestionar en cierta medida el modelo de atenuaciones utilizado para determinar los valores de efecto de sitio en la red IMAD (Vera, 2014).

A pesar de que se encontraron correlaciones coherentes entre los índices topográficos y los determinados por nuestra metodología cabe mencionar que los modelos de elevaciones utilizados para determinar estos índices topográficos están asociados a errores por lo que al cambiar los valores de V_{s30} por valores medidos en el sitio o mejorando la base de datos de elevaciones se esperaría mejorar estas correlaciones.

Utilizando la metodología para determinar el V_{s30} topográfico es posible realizar una primera estimación de la profundidad de las primeras capas del suelo en todo lugar donde se cuente con registros de ruido sísmico sin la necesidad de registrar un evento sísmico de gran magnitud, que permita obtener a través del método de Nakamura la frecuencia fundamental del sitio de interés.

Para establecer una relación más precisa entre la geología local y las frecuencias fundamentales de las estaciones es necesario realizar un estudio de campo para verificar la geología del lugar ya que el mapa utilizado corresponde a un mapa georreferenciado que sirve como primera referencia comparativa.

8. Bibliografía

- Acerra, C., Aguacil, G., Anastasiadis, A., Atakan, K., Azzara, R., Bard, P. Y., ... & Bonnefoy-Claudet, S. (2004). Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation.
- Allen, T. I., & Wald, D. J. (2007). Topographic slope as a proxy for seismic site-conditions (V_{s30}) and amplification around the globe (No. 2007-1357). Geological Survey (US).
- Arai, H., & Tokimatsu, K. (2004). S-wave velocity profiling by inversion of microtremor H/V spectrum. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94(1), 53-63.
- Bard, P. Y. (1995, August). Effects of surface geology on ground motion: recent results and remaining issues. In 10th European conference on earthquake engineering (pp. 305-323). Balkema Rotterdam.
- Beck, S., A. Rietbrock, F. Tilmann, S. Barrientos, A. Meltzer, O. Oncken, K. Bataille, S. Roecker, J.-P. Vilotte and R. M. Russo, 2014. Advancing Subduction Zone Science After a Big Quake, *Eos Trans. AGU*, 95(23), 193.
- Bommer, J., Salazar, W., & Samayoa, R. (1998). Riesgo sísmico en la región metropolitana de San Salvador. Programa Salvadoreño de Investigación sobre Desarrollo y Medio Ambiente (PRISMA).
- Borchardt, R. D. (1970). Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 60(1), 29-61.
- Chávez-García, F. J., & Montalva, G. A. (2014). Efectos de sitio para Ingenieros Geotécnicos, estudio del valle Parkway. *Obras y proyectos*, (16), 6-30.
- Dorado, A. C. (2015). Petrografía de rocas ígneas y metamórficas. Ediciones Paraninfo, SA.
- Glosario de Geología (2010), Real Academia de ciencias exactas. físicas y Naturales. (http://www.ugr.es/~agcasco/personal/rac_geologia/rac.htm).
- Lachetl, C., & Bard, P. Y. (1994). Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of Nakamura's technique. *Journal of Physics of the Earth*, 42(5), 377-397.
- Lermo, J., & Chávez-García, F. J. (1993). Site effect evaluation using spectral ratios with only one station. *Bulletin of the seismological society of America*, 83(5), 1574-1594.
- Lermo, J., & Chávez-García, F. J. (1994). Are microtremors useful in site response evaluation?. *Bulletin of the seismological society of America*, 84(5), 1350-1364.
- Nagoshi, M., & Igarashi, T. (1970). On the propagation characteristics of microtremors. *J Seismol Soc Jpn*, 23, 264-280.
- Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *QR Railway Tech. Res. Inst.*, 30(1), 25-33.
- Nakamura, Y. (2000, January). Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications. In *Proceedings of the 12th world conference on earthquake engineering* (Vol. 2656). New Zealand: Auckland.

- Nichols, G. (2009). Sedimentology and stratigraphy. John Wiley & Sons.
- Parolai, S. (2012). Investigation of site response in urban areas by using earthquake data and seismic noise. *New manual of seismological observatory practice*, 2, 1-38.
- Peterson, J. (1993). Observation and modeling of background seismic noise. *Open File Report*, 93-322.
- Rodriguez-Marek, A., Rathje, E. M., Bommer, J. J., Scherbaum, F., & Stafford, P. J. (2014). Application of single-station sigma and site-response characterization in a probabilistic seismic-hazard analysis for a new nuclear site. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104(4), 1601-1619.
- Rosales, C. (2001). Sobre el comportamiento sísmico de los depósitos de suelos del área de Cañaveralejo, Cali, Colombia. Universidad del Valle.
- SERNAGEOMIN, (2003). Mapa Geológico De Chile: Versión Digital. Servicio Nacional De Geología Y Minería, Santiago, Chile 4.
- Vera, M. J. (2014). Determinación De Fórmulas De Atenuación Sísmica Para La Zona Centro-Sur De Chile A Partir De Registros Sísmicos Del Terremoto Del Maule Del 2010 Obtenidos Por La Red De Estaciones Temporales IMAD. Tesis de pregrado. Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad de Concepción.
- Villegas, R., (2018). Uso de datos de Topografía Satelital para el estudio de Parámetros Sísmicos.
- Zaharia, B., Radulian, M., Popa, M., Grecu, B., Bala, A., & Tataru, D. (2008). Estimation of the local response using the Nakamura method for the Bucharest area. *Romanian Reports in Physics*, 60(1), 131-144.

Apéndices

A. Apéndice Tablas

Estación	F_{01} (Hz)	$\frac{H}{V}(F_{01})$	Efecto de sitio	V_{s30} (m/s) 3 arco segundos	MRVBF 3 arco segundos	Profundidad (m)
L002	0,491	3,937	-0,525	392,323	1,766	199,831
L003	0,716	4,581	-0,847	345,446	1,951	120,572
L009	0,173	3,687	-0,753	559,439	0,095	809,088
L104	0,355	2,573	0,687	438,539	0,239	309,150
L105	0,677	5,504	0,132	347,292	3,367	128,179
L106	0,945	2,331	0,773	665,030	0,005	175,977
QC03	0,730	2,611	1,090	490,374	0,810	167,849
QC05	0,987	6,593	-0,571	380,254	0,417	96,286
QC11	0,334	5,847	0,223	485,098	0,475	363,061
U11B	0,187	2,994	1,068	490,142	0,004	654,022
U30B	0,161	2,583	1,056	541,947	0,004	840,352
U32B	0,176	4,092	0,096	247,092	0,121	350,777
U34B	0,186	2,515	0,400	487,128	0,244	656,010
U35B	0,202	2,807	0,518	431,322	0,419	534,203
U44B	0,565	8,679	0,182	364,350	4,773	161,267
U46B	0,553	3,767	-0,173	319,434	3,689	144,410
U51B	0,415	4,118	0,126	254,944	2,825	153,686
U52B	0,779	2,398	-0,025	309,001	2,865	99,164
U53B	0,365	4,900	0,436	247,315	5,987	169,248
U56B	0,476	3,585	0,434	375,674	0,085	197,412
U70B	0,341	8,771	0,381	292,701	2,948	214,414
U72B	0,973	5,184	-0,388	686,730	0,000	176,481

Cuadro A.1: En este cuadro se observan los resultados obtenidos para los peak <1 Hz de aquellas estaciones con dos peak. Incluyendo el nombre dado a la estación, la frecuencia a la que se encontró la máxima amplitud del peak, el valor de amplitud máxima de la H/V, el valor del efecto de sitio en ese punto (Vera, 2014), el valor de V_{s30} (Villegas, 2018), y el valor del índice de multiresolución de llanura del fondo del valle (MRVBF) (Villegas, 2018).

Estación	F_{02} (Hz)	$\frac{H}{V}(F_{02})$	Efecto de sitio	V_{s30} (m/s) 3 arco segundos	MRVBF 3 arco segundos	Profundidad (m)
L002	2,990	3,772	-0,525	392,323	1,766	32,805
L003	13,773	2,762	-0,847	345,446	1,951	6,270
L009	24,734	4,207	-0,753	559,439	0,095	5,654
L104	2,809	7,025	0,687	438,539	0,239	39,035
L105	2,532	19,202	0,132	347,292	3,367	34,289
L106	1,782	4,151	0,773	665,030	0,005	93,283
QC03	21,028	3,078	1,090	490,374	0,810	5,830
QC05	7,345	5,678	-0,571	380,254	0,417	12,942
QC11	6,812	6,105	0,223	485,098	0,475	17,804
U11B	5,558	3,763	1,068	490,142	0,004	22,047
U30B	18,085	3,665	1,056	541,947	0,004	7,492
U32B	3,471	7,127	0,096	247,092	0,121	17,799
U34B	14,128	5,680	0,400	487,128	0,244	8,620
U35B	3,171	3,356	0,518	431,322	0,419	34,009
U44B	9,809	4,068	0,182	364,350	4,773	9,286
U46B	10,607	2,222	-0,173	319,434	3,689	7,529
U51B	15,944	3,608	0,126	254,944	2,825	3,997
U52B	3,753	7,562	-0,025	309,001	2,865	20,586
U53B	1,865	4,357	0,436	247,315	5,987	33,144
U56B	7,592	6,463	0,434	375,674	0,085	12,371
U70B	2,407	4,684	0,381	292,701	2,948	30,402
U72B	7,224	2,458	-0,388	686,730	0,000	23,766

Cuadro A.2: En este cuadro se observan los resultados obtenidos para los peak >1 Hz de aquellas estaciones con dos peak. Incluyendo el nombre dado a la estación, la frecuencia a la que se encontró la máxima amplitud del peak, el valor de amplitud máxima de la H/V , el valor del efecto de sitio en ese punto (Vera, 2014), el valor de V_{s30} (Villegas, 2018), y el valor del índice de multiresolución de llanura del fondo del valle (MRVBF) (Villegas, 2018).

Estación	F_{01} (Hz)	$\frac{H}{V}(F_{01})$	Efecto de sitio	V_{s30} (m/s) 3 arco segundos	MRVBF 3 arco segundos	Profundidad (m)
L006	3,102	4,202	-0,525	392,323	1,766	31,623
L103	6,113	2,345	-0,643	422,425	0,271	17,277
QC01	3,535	2,496	-0,290	796,306	0,000	56,319
QC02	3,417	7,403	0,269	311,663	3,223	22,803
QC04	5,396	6,960	0,383	748,511	0,000	34,680
QC06	8,806	3,995	0,032	690,901	0,000	19,615
QC07	2,437	6,622	0,655	324,909	2,401	33,335
QC08	1,992	5,785	-0,273	751,650	0,000	94,329
QC09	5,681	4,019	-0,233	494,413	0,002	21,756
QC10	2,501	5,836	0,344	659,432	0,000	65,912
QC12	6,086	7,897	0,036	553,086	0,090	22,719
QC14	3,903	8,233	0,198	741,516	0,002	47,500
QF05	5,435	4,014	-0,613	555,192	0,002	25,539
QF07	4,229	5,048	-1,037	644,879	0,001	38,122
QF11	1,769	7,227	0,243	513,910	0,016	72,638
QF12	6,579	7,972	-0,362	391,618	0,574	14,882
QF14	7,975	2,324	-0,868	572,036	0,004	17,933
QF15	4,146	5,355	0,269	322,426	5,615	19,442
QF17	4,855	4,254	-0,660	443,361	0,254	22,828
U01B	5,170	4,692	0,311	557,806	0,003	26,971
U02B	3,316	8,383	0,270	578,305	0,006	43,595
U03B	7,884	3,725	0,051	377,973	1,834	11,986
U04B	4,691	9,044	0,509	731,425	0,000	38,983
U05B	5,429	7,723	0,053	529,090	0,369	24,364
U07B	6,647	7,592	-0,136	402,495	0,193	15,138
U08B	3,713	8,193	0,252	481,225	0,019	32,399
U09B	10,823	19,499	0,032	444,429	1,648	10,266
U10B	6,997	4,935	-0,237	677,043	0,010	24,190
U12B	2,134	8,276	0,121	247,880	1,567	29,037
U15B	1,621	4,806	-0,172	350,154	2,936	54,005
U16B	12,025	3,504	0,692	525,099	0,001	10,917
U26B	8,278	4,112	0,710	690,025	0,000	20,839
U27B	5,396	4,989	-0,170	494,131	0,067	22,892
U28B	3,184	8,519	-0,008	389,125	2,782	30,551
U29B	3,765	6,668	1,130	392,067	1,660	26,031
U36B	1,788	6,440	0,411	357,473	6,278	49,987
U37B	3,344	5,544	0,262	523,057	0,291	39,099
U40B	3,499	7,275	0,268	515,226	0,021	36,809
U41B	4,582	8,207	0,272	339,068	0,851	18,498
U42B	4,297	7,106	-0,239	646,708	0,002	37,623
U43B	15,826	3,790	0,271	410,065	1,424	6,478
U45B	4,059	5,233	0,188	737,632	0,000	45,437
U54B	1,559	2,131	0,123	381,636	1,738	61,186
U55B	6,000	16,389	1,491	739,052	0,000	30,795
U57B	18,158	2,895	-0,928	701,695	0,007	9,661
U58B	6,636	3,621	-0,759	427,827	0,538	16,117
U59B	3,735	8,257	-0,343	508,196	0,018	34,015
U60B	3,576	3,647	-0,014	486,599	0,055	34,019

Tabla A.3 continuación a la página anterior.

Estación	F_{01} (Hz)	$\frac{H}{V}(F_{01})$	Efecto de sitio	V_{s30} (m/s) 3 arco segundos	MRVBF 3 arco segundos	Profundidad (m)
U62B	16,420	10,750	0,325	487,709	0,134	7,426
U63B	5,071	4,586	0,003	610,438	0,000	30,095
U64B	6,782	4,427	0,147	742,785	0,000	27,379
U65B	13,960	3,854	-0,605	589,916	0,229	10,564
U66B	1,520	10,408	-0,049	461,154	0,019	75,837
U67B	3,998	5,801	-0,503	598,388	0,003	37,421
U68B	3,484	5,789	-0,113	697,642	0,001	50,057
U69B	15,712	7,077	0,130	636,612	0,040	10,129
U71B	2,394	6,997	0,683	634,107	0,056	66,214
U73B	4,311	4,945	-0,041	530,545	0,002	30,765
U74B	18,980	4,281	-0,227	405,269	1,123	5,338
U75B	4,915	7,442	-0,088	573,854	0,150	29,188

Cuadro A.3: En este cuadro se observan los resultados obtenidos para las estaciones con 1 solo peak. Incluyendo el nombre dado a la estación, la frecuencia a la que se encontró la máxima amplitud del peak, el valor de amplitud máxima de la H/V, el valor del efecto de sitio en ese punto (Vera, 2014), el valor de V_{s30} (Villegas, 2018), y el valor del índice de multi-resolución de llanura del fondo del valle (MRVBF) (Villegas, 2018).

Estación	F_{01} (Hz)	$\frac{H}{V}(F_{01})$	Efecto de sitio	V_{s30} (m/s) 3 arco segundos	MRVBF 3 arco segundos	Profundidad (m)
L002	14,128	5,680	-0,525	392,323	1,766	6,942
L003	0,716	4,581	-0,847	345,446	1,951	120,572
L006	3,102	4,202	-0,115	763,868	0,000	61,570
L009	0,173	3,687	-0,753	559,439	0,095	809,088
L103	6,113	2,345	-0,643	422,425	0,271	17,277
L104	6,812	6,105	0,687	438,539	0,239	16,095
L105	0,677	5,504	0,132	347,292	3,367	128,179
L106	7,592	6,463	0,773	665,030	0,005	21,899
QC01	3,535	2,496	-0,290	796,306	0,000	56,319
QC02	3,417	7,403	0,269	311,663	3,223	22,803
QC03	3,753	7,562	1,090	490,374	0,810	32,669
QC04	5,396	6,960	0,383	748,511	0,000	34,680
QC05	0,987	6,593	-0,571	380,254	0,417	96,286
QC06	8,806	3,995	0,032	690,901	0,000	19,615
QC07	2,437	6,622	0,655	324,909	2,401	33,335
QC08	1,992	5,785	-0,273	751,650	0,000	94,329
QC09	5,681	4,019	-0,233	494,413	0,002	21,756
QC10	2,501	5,836	0,344	659,432	0,000	65,912
QC11	0,334	5,847	0,223	485,098	0,475	363,061
QC12	6,086	7,897	0,036	553,086	0,090	22,719
QC14	3,903	8,233	0,198	741,516	0,002	47,500
QF05	5,435	4,014	-0,613	555,192	0,002	25,539
QF07	4,229	5,048	-1,037	644,879	0,001	38,122
QF11	1,769	7,227	0,243	513,910	0,016	72,638
QF12	6,579	7,972	-0,362	391,618	0,574	14,882
QF14	7,975	2,324	-0,868	572,036	0,004	17,933
QF15	4,146	5,355	0,269	322,426	5,615	19,442
QF17	4,855	4,254	-0,660	443,361	0,254	22,828
U01B	5,170	4,692	0,311	557,806	0,003	26,971
U02B	3,316	8,383	0,270	578,305	0,006	43,595
U03B	7,884	3,725	0,051	377,973	1,834	11,986
U04B	4,691	9,044	0,509	731,425	0,000	38,983
U05B	5,429	7,723	0,053	529,090	0,369	24,364
U07B	6,647	7,592	-0,136	402,495	0,193	15,138
U08B	3,713	8,193	0,252	481,225	0,019	32,399
U09B	10,823	19,499	0,032	444,429	1,648	10,266
U10B	6,997	4,935	-0,237	677,043	0,010	24,190
U11B	2,532	19,202	1,068	490,142	0,004	48,393
U12B	2,134	8,276	0,121	247,880	1,567	29,037
U15B	1,621	4,806	-0,172	350,154	2,936	54,005
U16B	12,025	3,504	0,692	525,099	0,001	10,917
U26B	8,278	4,112	0,710	690,025	0,000	20,839
U27B	5,396	4,989	-0,170	494,131	0,067	22,892
U28B	3,184	8,519	-0,008	389,125	2,782	30,551
U29B	3,765	6,668	1,130	392,067	1,660	26,031
U30B	2,990	3,772	1,056	541,947	0,004	45,316
U32B	24,734	4,207	0,096	247,092	0,121	2,497
U34B	2,809	7,025	0,400	487,128	0,244	43,360

Tabla A.4 continuación a la página anterior.

Estación	F_{01} (Hz)	$\frac{H}{V}(F_{01})$	Efecto de sitio	V_{s30} (m/s) 3 arco segundos	MRVBF 3 arco segundos	Profundidad (m)
U35B	1,782	4,151	0,518	431,322	0,419	60,501
U36B	1,788	6,440	0,411	357,473	6,278	49,987
U37B	3,344	5,544	0,262	523,057	0,291	39,099
U40B	3,499	7,275	0,268	515,226	0,021	36,809
U41B	4,582	8,207	0,272	339,068	0,851	18,498
U42B	4,297	7,106	-0,239	646,708	0,002	37,623
U43B	15,826	3,790	0,271	410,065	1,424	6,478
U44B	0,565	8,679	0,182	364,350	4,773	161,267
U45B	4,059	5,233	0,188	737,632	0,000	45,437
U46B	0,553	3,767	-0,173	319,434	3,689	144,410
U51B	0,415	4,118	0,126	254,944	2,825	153,686
U52B	1,865	4,357	-0,025	309,001	2,865	41,411
U53B	0,365	4,900	0,436	247,315	5,987	169,248
U54B	1,559	2,131	0,123	381,636	1,738	61,186
U55B	6,000	16,389	1,491	739,052	0,000	30,795
U56B	3,471	7,127	0,434	375,674	0,085	27,061
U57B	18,158	2,895	-0,928	701,695	0,007	9,661
U58B	6,636	3,621	-0,759	427,827	0,538	16,117
U59B	3,735	8,257	-0,343	508,196	0,018	34,015
U60B	3,576	3,647	-0,014	486,599	0,055	34,019
U62B	16,420	10,750	0,325	487,709	0,134	7,426
U63B	5,071	4,586	0,003	610,438	0,000	30,095
U64B	6,782	4,427	0,147	742,785	0,000	27,379
U65B	13,960	3,854	-0,605	589,916	0,229	10,564
U66B	1,520	10,408	-0,049	461,154	0,019	75,837
U67B	3,998	5,801	-0,503	598,388	0,003	37,421
U68B	3,484	5,789	-0,113	697,642	0,001	50,057
U69B	15,712	7,077	0,130	636,612	0,040	10,129
U70B	0,341	8,771	0,381	292,701	2,948	214,414
U71B	2,394	6,997	0,683	634,107	0,056	66,214
U72B	0,973	5,184	-0,388	686,730	0,000	176,481
U73B	4,311	4,945	-0,041	530,545	0,002	30,765
U74B	18,980	4,281	-0,227	405,269	1,123	5,338
U75B	4,915	7,442	-0,088	573,854	0,150	29,188

Cuadro A.4: En este cuadro se observan los resultados obtenidos para los peak mayores, de mayor amplitud. Incluyendo el nombre dado a la estación, la frecuencia a la que se encontró la máxima amplitud del peak, el valor de amplitud máxima de la H/V, el valor del efecto de sitio en ese punto (Vera, 2014), el valor de V_{s30} (Villegas, 2018), y el valor del índice de multiresolución de llanura del fondo del valle (MRVBF) (Villegas, 2018).

B. Apéndice Tablas 2

Estacion	F_0	$\sigma(f)$	$\frac{H}{V}(F_0)$	$\sigma(A)$	C I	C II	C III
QF12	6,579	0,559	7,972	0,989	SI	SI	SI
U07B	6,647	0,684	7,592	0,758	SI	SI	SI
U09B	10,823	0,549	19,499	1,705	SI	SI	SI
U12B	2,134	0,332	8,276	0,786	SI	SI	SI
U26B	8,278	0,730	4,112	0,624	SI	SI	SI
U28B	3,184	0,366	8,519	1,463	SI	SI	SI
U36B	1,788	0,322	6,440	0,569	SI	SI	SI
U41B	4,582	0,523	8,207	0,682	SI	SI	SI
U43B	15,826	2,980	3,790	0,607	SI	SI	SI
U45B	4,059	0,644	5,233	0,987	SI	SI	SI
U54B	1,559	4,227	2,131	0,478	NO	NO	SI
U55B	6,000	0,295	16,389	0,940	SI	SI	SI
U60B	3,576	1,193	3,647	0,978	SI	SI	SI
U65B	13,960	1,902	3,854	0,494	NO	NAN	SI
U69B	15,712	1,266	7,077	0,948	SI	SI	SI
U71B	2,394	0,324	6,997	0,757	SI	SI	SI
U74B	18,980	3,683	4,281	0,655	NO	NAN	SI

Cuadro B.1: En esta tabla podemos ver las estaciones en roca sedimentaria con un solo peak, la frecuencia a la cual se encuentra el peak, el valor de $\sigma(f)$, el valor que alcanza el peak H/V , así como $\sigma(A)$, y si cumplen o no con las condiciones de claridad del peak (CI, CII y CIII).

Estación	F_{01}	$\sigma(f)$	$\frac{H}{V}(F_0)$	$\sigma(A)$	C I	C II	C III
L009	0,173	0,022	3,687	0,361	NO	SI	SI
L104	0,355	0,136	2,573	0,300	NO	NO	SI
L105	0,677	0,068	5,504	0,439	SI	SI	SI
QC11	0,334	0,070	5,847	0,882	SI	SI	SI
U32B	0,176	0,016	4,092	0,393	SI	SI	SI
U34B	0,186	0,095	2,515	0,254	NO	NO	SI
U35B	0,202	0,058	2,807	0,251	NO	NO	SI
U44B	0,565	0,041	8,679	0,288	SI	SI	SI
U46B	0,553	0,071	3,767	0,215	SI	SI	SI
U51B	0,415	0,033	4,118	0,098	SI	SI	SI
U52B	0,779	3,087	2,398	0,234	NO	NO	SI
U70B	0,341	0,013	8,771	0,303	SI	SI	SI
U72B	0,973	0,128	5,184	0,303	SI	NO	SI

Cuadro B.2: En esta tabla podemos ver las estaciones en roca sedimentaria con su peak <1 Hz, la frecuencia a la cual se encuentra el peak, el valor de $\sigma(f)$, el valor que alcanza el peak H/V , así como $\sigma(A)$, y si cumplen o no con las condiciones de claridad del peak (CI, CII y CIII).

Estación	F_{02}	$\sigma(f)$	$\frac{H}{V}(F_{02})$	$\sigma(A)$	C I	C II	C III
L009	13,773	4,323	2,762	0,488	NO	SI	SI
L104	6,812	1,078	6,105	1,362	SI	SI	SI
L105	10,607	2,386	2,222	0,764	SI	NO	SI
QC11	21,028	9,953	3,078	0,746	SI	NAN	SI
U32B	24,734	1,199	4,207	0,913	SI	NAN	SI
U34B	2,809	0,387	7,025	0,807	SI	SI	SI
U35B	1,782	0,388	4,151	0,831	SI	NAN	SI
U44B	9,809	1,295	4,068	0,904	SI	SI	SI
U46B	3,171	2,853	3,356	1,015	SI	SI	SI
U51B	18,085	4,663	3,665	0,556	NO	NAN	SI
U52B	1,865	0,401	4,357	0,837	SI	SI	SI
U70B	7,345	0,839	5,678	0,530	NO	SI	SI
U72B	2,407	0,520	4,684	0,746	NO	SI	SI

Cuadro B.3: En esta tabla podemos ver las estaciones en roca sedimentaria con su peak >1 Hz, la frecuencia a la cual se encuentra el peak, el valor de $\sigma(f)$, el valor que alcanza el peak H/V, así como $\sigma(A)$, y si cumplen o no con las condiciones de claridad del peak (CI, CII y CIII).

Estación	F_0	$\sigma(f)$	$\frac{H}{V}(F_0)$	$\sigma(A)$	I	II	III
QC01	3,535	19,457	2,496	1,146	NO	NO	SI
U62B	16,420	1,319	10,750	1,464	SI	SI	SI

Cuadro B.4: En esta tabla podemos ver las estaciones en roca volcanosedimentaria con un solo peak, la frecuencia a la cual se encuentra el peak, el valor de $\sigma(f)$, el valor que alcanza el peak H/V, así como $\sigma(A)$, y si cumplen o no con las condiciones de claridad del peak (CI, CII y CIII).

Estación	F_0	$\sigma(f)$	$\frac{H}{V}(F_0)$	$\sigma(A)$	C I	C II	C III
L103	6,113	3,968	2,345	0,431	NO	NAN	SI
QC07	2,437	0,506	6,622	0,917	SI	SI	SI
QF15	4,146	0,614	5,355	1,955	SI	SI	SI
U03B	7,884	1,471	3,725	0,503	SI	NAN	SI
U29B	3,765	0,822	6,668	1,053	SI	SI	SI
U64B	6,782	0,848	4,427	0,440	SI	SI	SI
U67B	3,998	0,493	5,801	1,028	SI	SI	SI

Cuadro B.5: En esta tabla podemos ver las estaciones en roca volcánica con un solo peak, la frecuencia a la cual se encuentra el peak, el valor de $\sigma(f)$, el valor que alcanza el peak H/V, así como $\sigma(A)$, y si cumplen o no con las condiciones de claridad del peak (CI, CII y CIII).

Estación	F_{01}	$\sigma(f)$	$\frac{H}{V}(F_0)$	$\sigma(A)$	C I	C II	C III
L002	0,491	0,042	3,937	0,168	SI	SI	SI
L003	0,716	0,060	4,581	0,202	SI	SI	SI
L106	0,945	1,138	2,331	0,322	NO	NO	SI
QC03	0,730	0,105	2,611	0,213	SI	NO	SI
QC05	0,987	0,111	6,593	1,168	SI	SI	SI
U11B	0,187	0,040	2,994	0,380	NAN	SI	SI
U30B	0,161	0,024	2,583	0,328	NAN	SI	SI
U53B	0,365	0,030	4,900	0,438	SI	SI	SI
U56B	0,476	0,052	3,585	0,309	SI	SI	SI

Cuadro B.6: En esta tabla podemos ver las estaciones en roca volcánica con su peak <1 Hz, la frecuencia a la cual se encuentra el peak, el valor de $\sigma(f)$, el valor que alcanza el peak H/V, así como $\sigma(A)$, y si cumplen o no con las condiciones de claridad del peak (CI, CII y CIII).

Estación	F_{02}	$\sigma(f)$	$\frac{H}{V}(F_{02})$	$\sigma(A)$	C I	C II	C III
L002	14,127863	1,3959652	5,6795673	0,597187	SI	SI	SI
L003	15,944241	1,7511638	3,6079095	0,493463	SI	SI	SI
L106	7,5921063	15,083139	6,4633517	0,486354	SI	SI	SI
QC03	3,7525926	0,39871207	7,5615013	1,01454	SI	SI	SI
QC05	7,2237953	1,6720671	2,4583488	0,46901	SI	SI	SI
U11B	2,5320735	0,27032407	19,202316	7,68632	SI	SI	SI
U30B	2,9898397	1,2445868	3,7715291	1,15366	SI	NO	SI
U53B	5,5579079	0,54485116	3,7630486	0,607446	SI	SI	SI
U56B	3,4706849	0,47086851	7,1270779	1,23943	SI	SI	SI

Cuadro B.7: En esta tabla podemos ver las estaciones en roca volcánica con su peak >1 Hz, la frecuencia a la cual se encuentra el peak, el valor de $\sigma(f)$, el valor que alcanza el peak H/V, así como $\sigma(A)$, y si cumplen o no con las condiciones de claridad del peak (CI, CII y CIII).

Estación	F_0	$\sigma(f)$	$\frac{H}{V}(F_0)$	$\sigma(A)$	C I	C II	C III
QC02	3,417	0,417	7,403	0,941	SI	SI	SI
QC04	5,396	1,134	6,960	0,803	SI	SI	SI
QC06	8,806	3,970	3,995	0,762	SI	SI	SI
QC09	5,681	0,676	4,019	0,561	SI	SI	SI
QC10	2,501	0,238	5,836	0,971	SI	SI	SI
QC12	6,086	0,455	7,897	0,950	SI	SI	SI
QC14	3,903	0,688	8,233	1,081	SI	SI	SI
QF05	5,435	0,780	4,014	0,631	SI	SI	SI
QF07	4,229	0,649	5,048	0,758	SI	SI	SI
QF11	1,769	0,332	7,227	0,997	SI	SI	SI
QF14	7,975	6,427	2,324	0,690	NO	SI	SI
QF17	4,855	1,005	4,254	0,623	SI	SI	SI
U01B	5,170	1,091	4,692	0,591	SI	SI	SI
U02B	3,316	0,495	8,383	1,661	SI	SI	SI
U04B	4,691	0,425	9,044	0,623	SI	SI	SI
U05B	5,429	0,787	7,723	0,739	SI	SI	SI
U08B	3,713	0,370	8,193	1,286	SI	SI	SI
U27B	5,396	1,866	4,989	0,591	SI	SI	SI
U37B	3,344	1,050	5,544	0,994	SI	SI	SI
U40B	3,499	0,765	7,275	1,197	SI	SI	SI
U42B	4,297	0,822	7,106	0,893	SI	SI	SI
U58B	6,636	1,024	3,621	0,569	NO	SI	SI
U59B	3,735	0,350	8,257	1,087	SI	SI	SI
U63B	5,071	0,572	4,586	0,503	SI	SI	SI
U73B	4,311	0,645	4,945	0,808	SI	SI	SI
U75B	4,915	0,215	7,442	0,383	SI	SI	SI

Cuadro B.8: En esta tabla podemos ver las estaciones en roca intrusiva con un solo peak, la frecuencia a la cual se encuentra el peak, el valor de $\sigma(f)$, el valor que alcanza el peak H/V, así como $\sigma(A)$, y si cumplen o no con las condiciones de claridad del peak (CI, CII y CIII).

Estación	F_0	$\sigma(f)$	$\frac{H}{V}(F_0)$	$\sigma(A)$	C I	C II	C III
L006	3,102	0,928	4,202	0,884	SI	SI	SI
QC08	1,992	0,267	5,785	0,895	SI	SI	SI
U10B	6,997	0,748	4,935	0,511	SI	SI	SI
U15B	1,621	1,551	4,806	0,558	SI	SI	SI
U16B	12,025	3,721	3,504	0,380	SI	SI	SI
U57B	18,158	12,628	2,895	0,499	NO	NAN	SI
U66B	1,520	0,125	10,408	0,729	SI	SI	SI
U68B	3,484	0,667	5,789	0,944	SI	SI	SI

Cuadro B.9: En esta tabla podemos ver las estaciones en roca metamórfica con un solo peak, la frecuencia a la cual se encuentra el peak, el valor de $\sigma(f)$, el valor que alcanza el peak H/V, así como $\sigma(A)$, y si cumplen o no con las condiciones de claridad del peak (CI, CII y CIII).

C. Apéndice Imágenes

A continuación podrán apreciar las imágenes correspondientes a las estaciones sobre roca sedimentaria con un sólo peak.

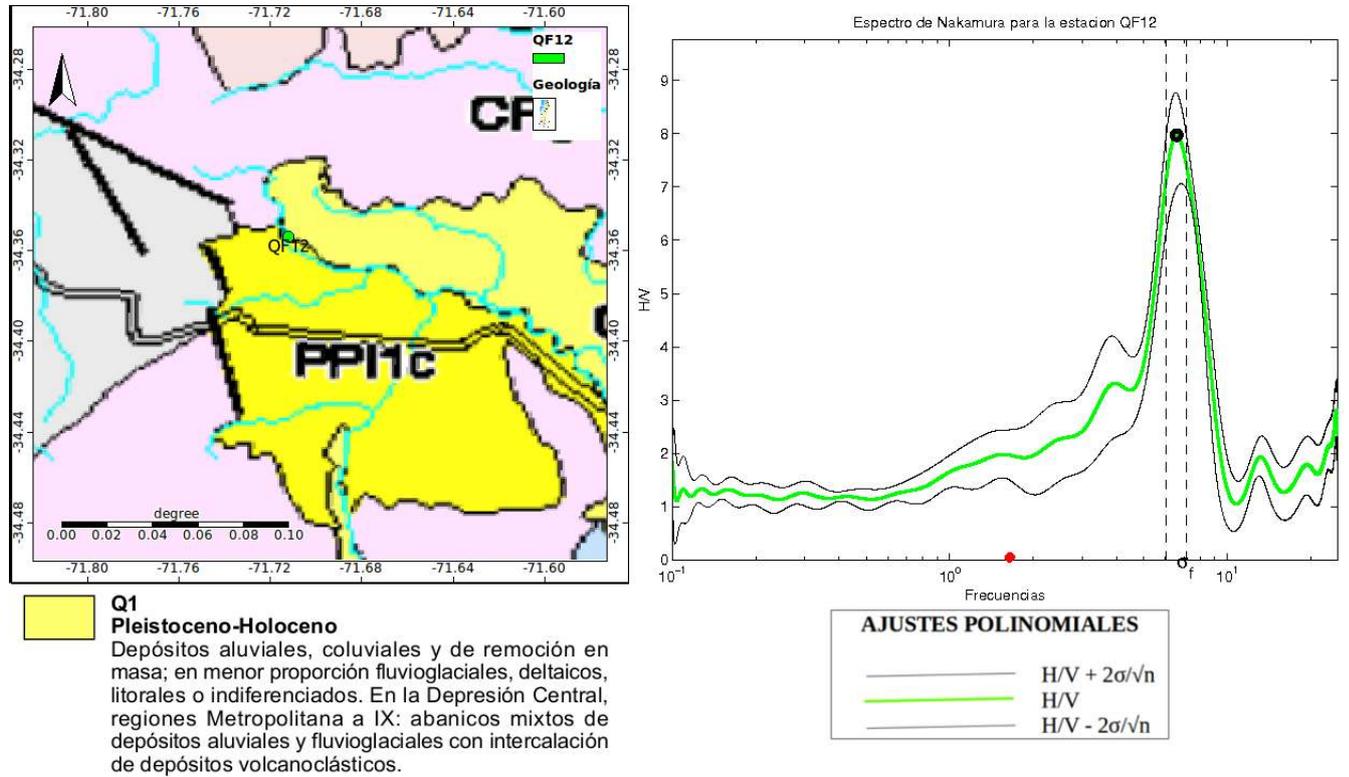


Figura C.1: A la izquierda se ve a la estación QF12 sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 peak.

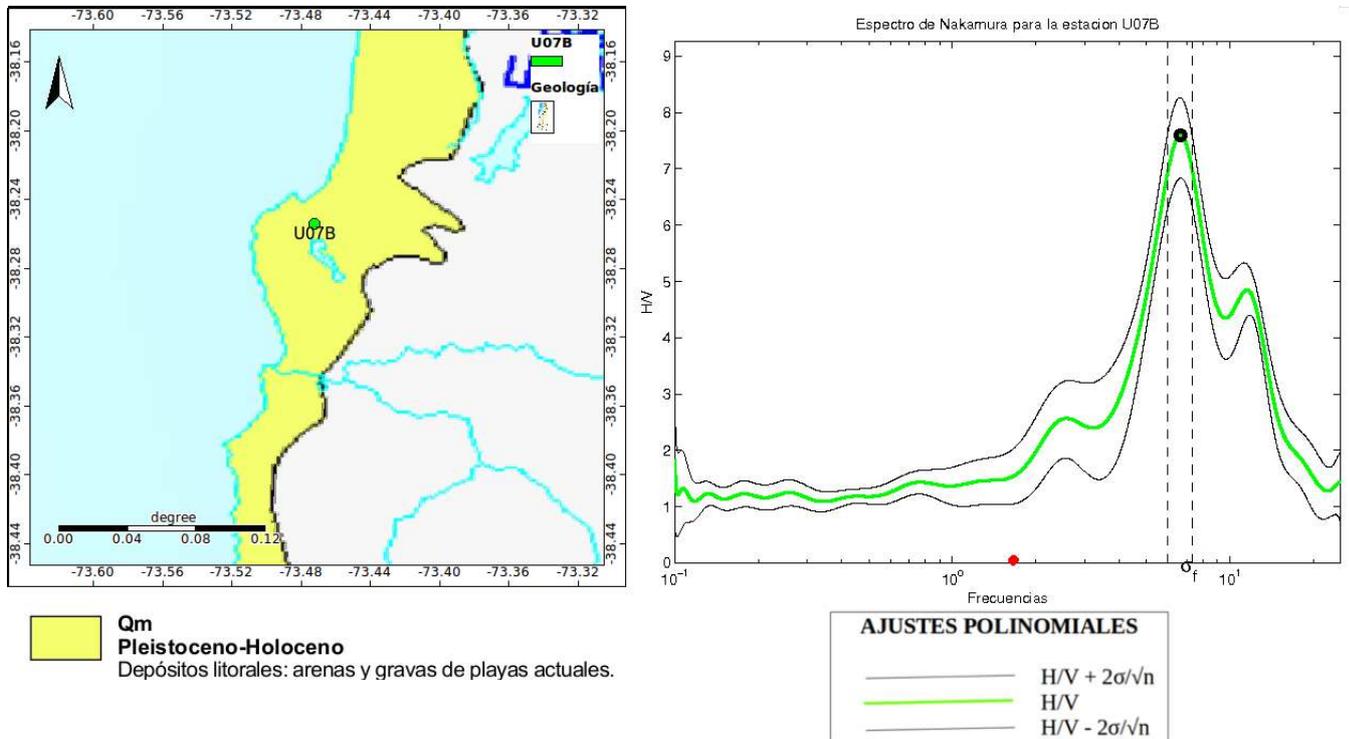


Figura C.2: A la izquierda se ve a la estación U07B sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 peak.

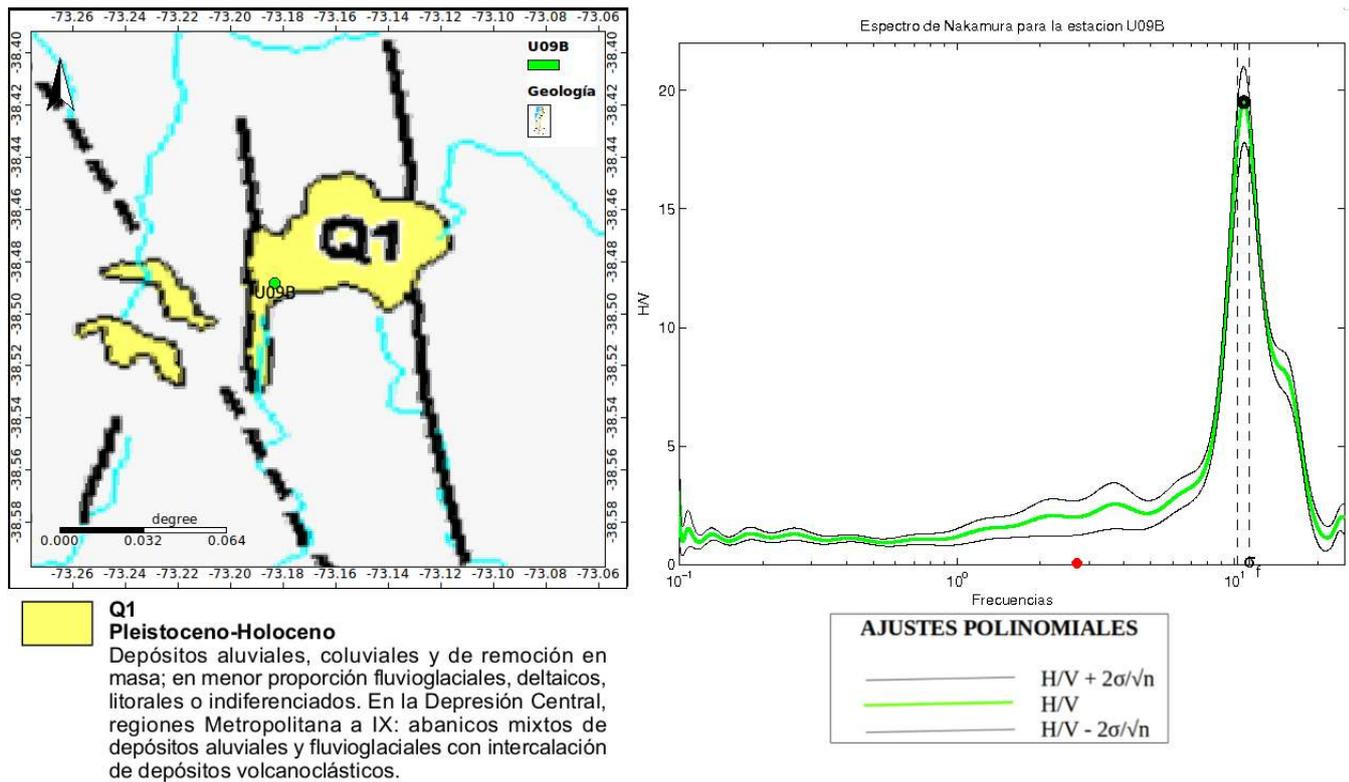


Figura C.3: A la izquierda se ve a la estación U09B sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 peak.

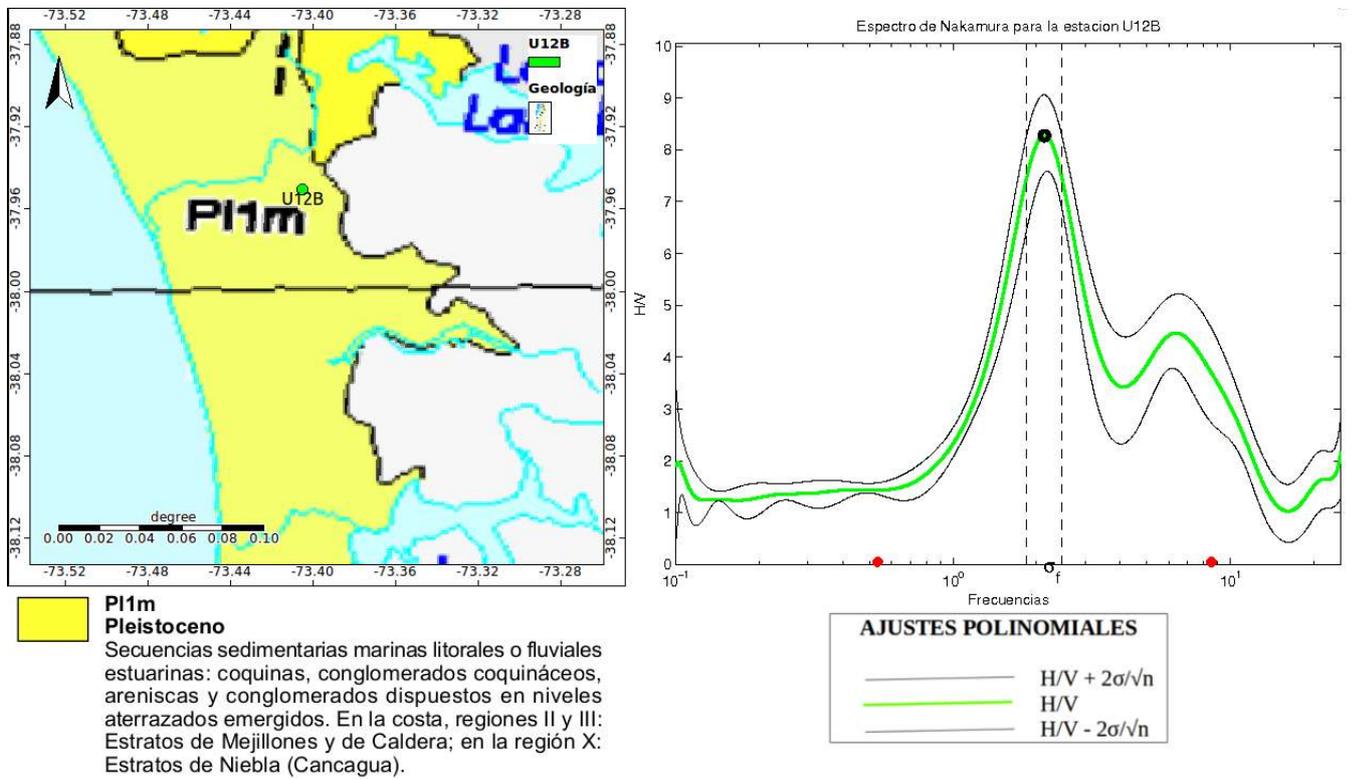


Figura C.4: A la izquierda se ve a la estación U12B sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 peak.

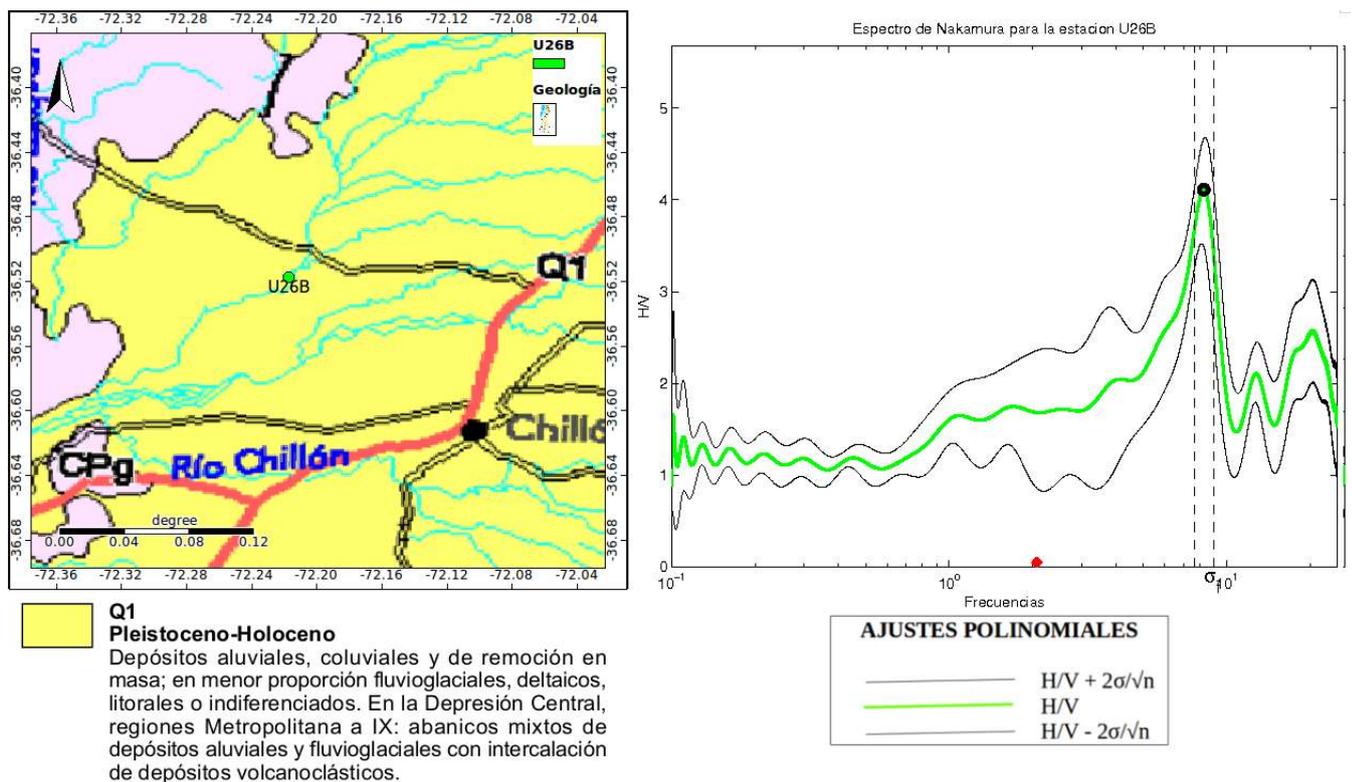
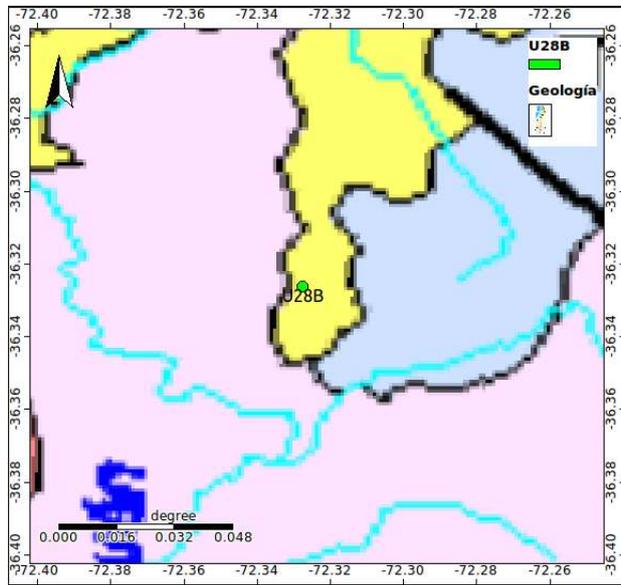
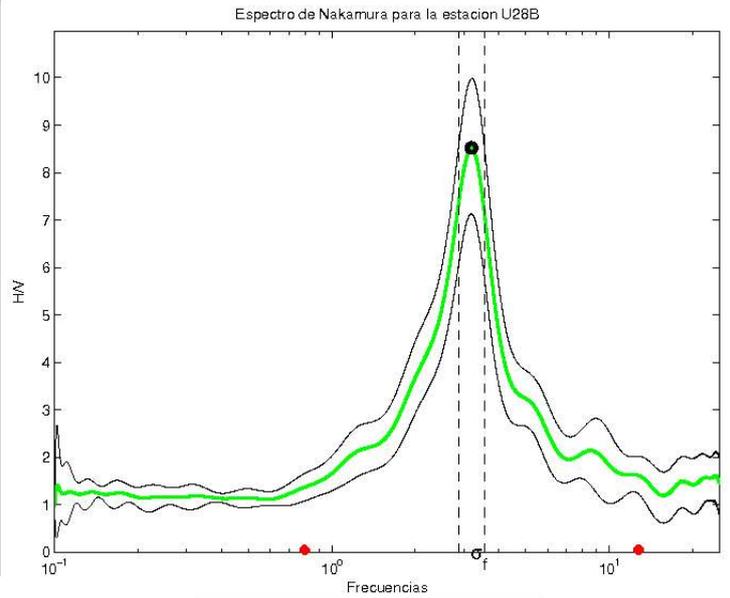


Figura C.5: A la izquierda se ve a la estación U26B sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 peak.



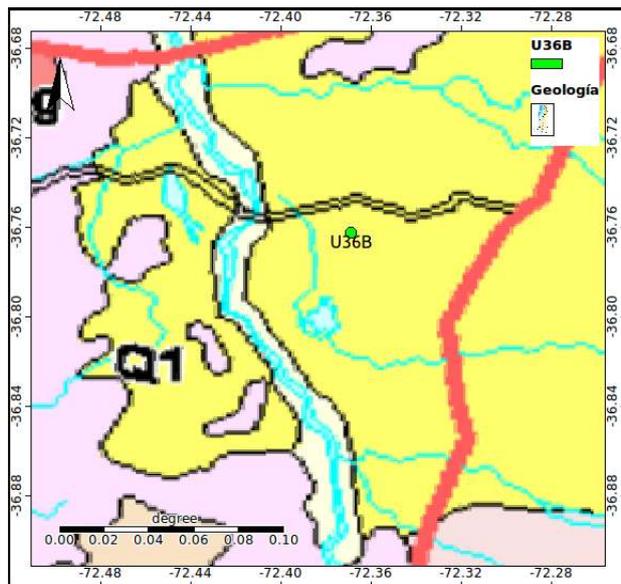
Q1 Pleistoceno-Holoceno
Depósitos aluviales, coluviales y de remoción en masa; en menor proporción fluvioglaciales, deltaicos, litorales o indiferenciados. En la Depresión Central, regiones Metropolitana a IX: abanicos mixtos de depósitos aluviales y fluvioglaciales con intercalación de depósitos volcanoclásticos.



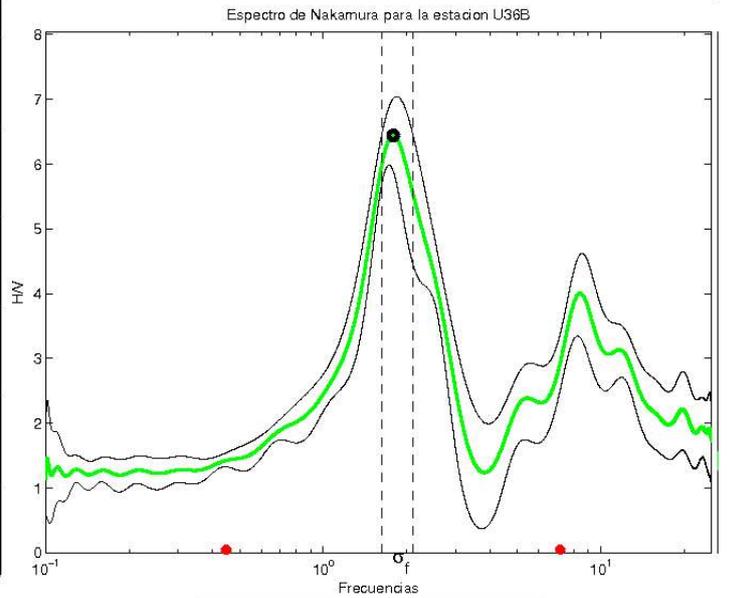
AJUSTES POLINOMIALES

- $H/V + 2\sigma/\sqrt{n}$
- H/V
- $H/V - 2\sigma/\sqrt{n}$

Figura C.6: A la izquierda se ve a la estación U28B sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 peak.



Q1 Pleistoceno-Holoceno
Depósitos aluviales, coluviales y de remoción en masa; en menor proporción fluvioglaciales, deltaicos, litorales o indiferenciados. En la Depresión Central, regiones Metropolitana a IX: abanicos mixtos de depósitos aluviales y fluvioglaciales con intercalación de depósitos volcanoclásticos.



AJUSTES POLINOMIALES

- $H/V + 2\sigma/\sqrt{n}$
- H/V
- $H/V - 2\sigma/\sqrt{n}$

Figura C.7: A la izquierda se ve a la estación U36B sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 peak.

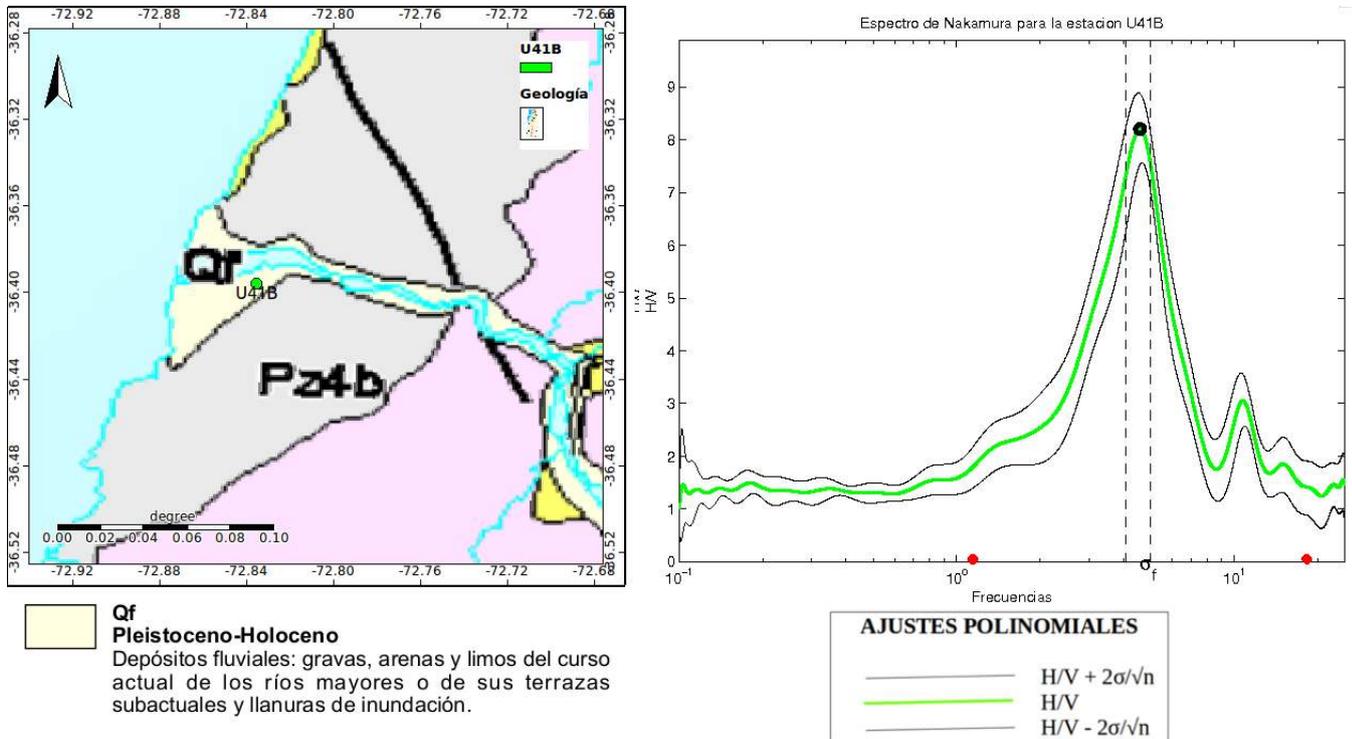


Figura C.8: A la izquierda se ve a la estación U41B sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 peak.

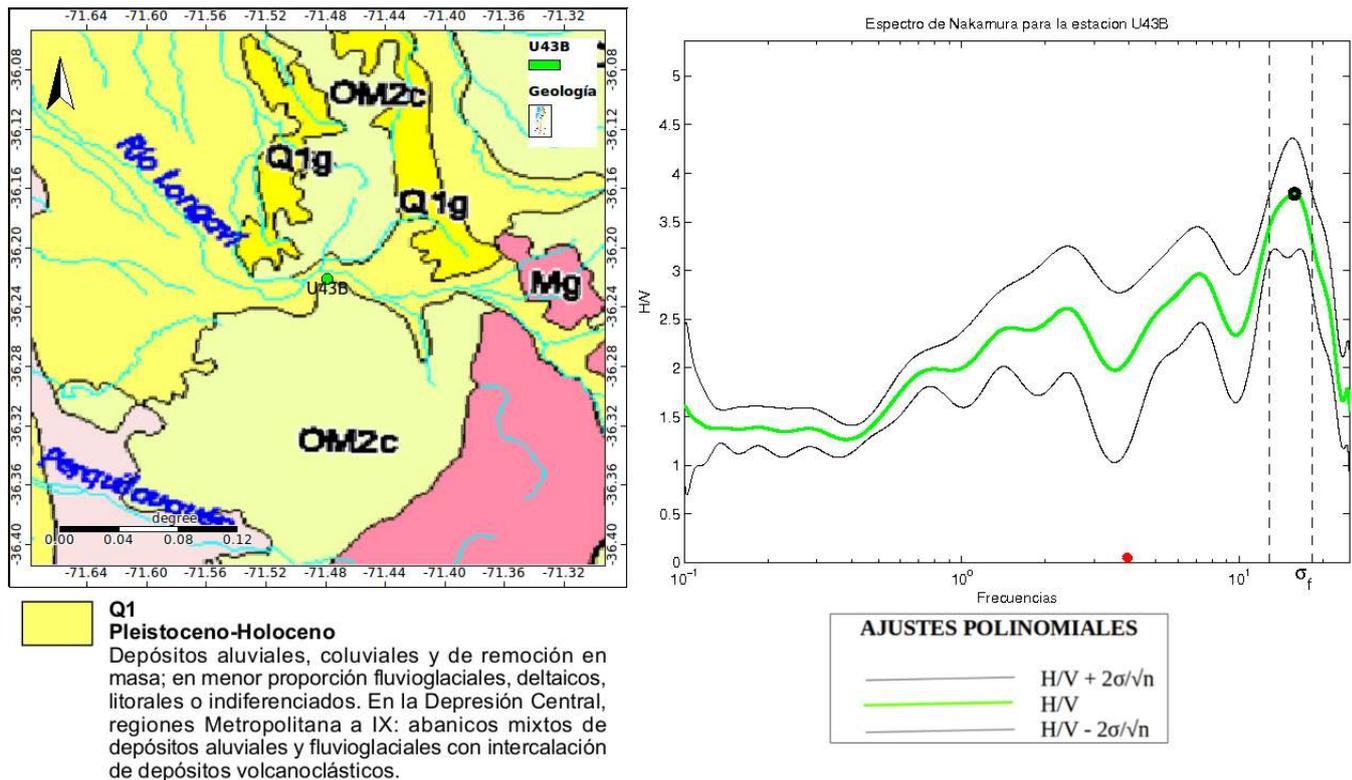


Figura C.9: A la izquierda se ve a la estación U43B sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 peak.

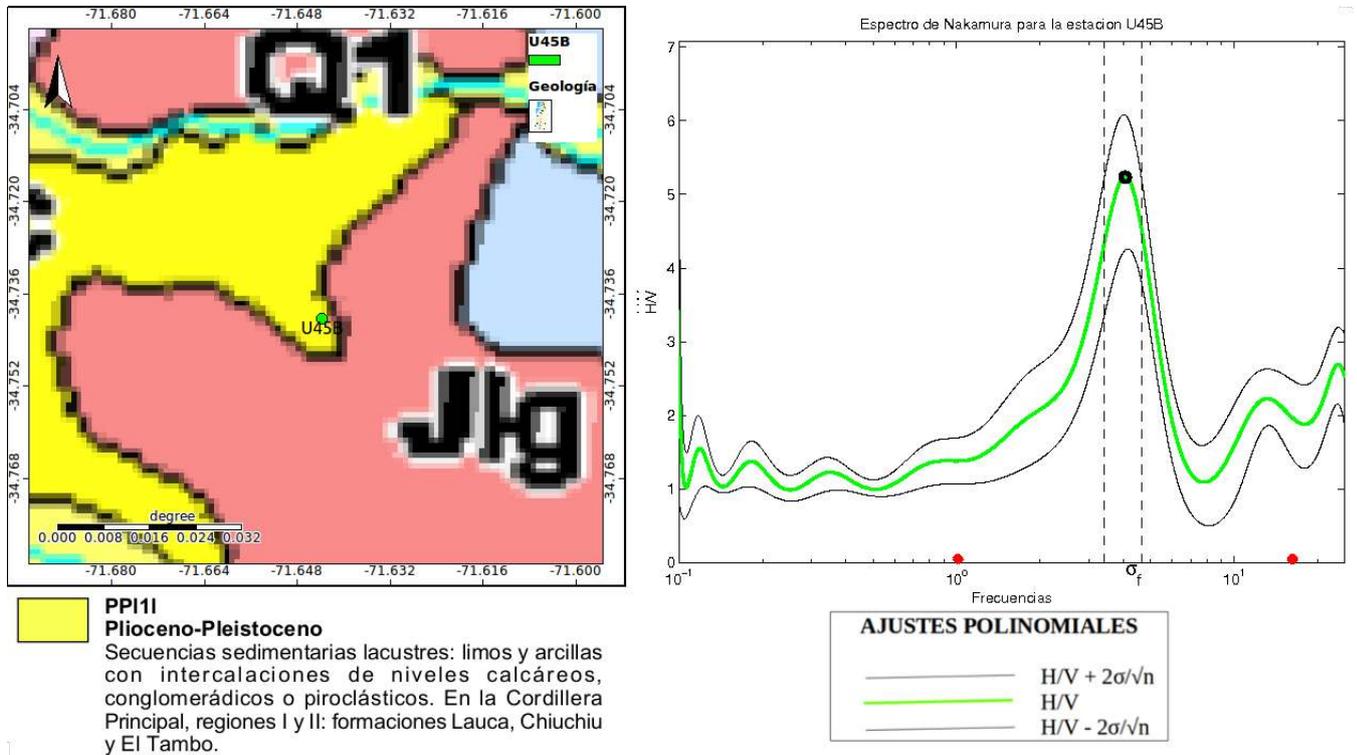


Figura C.10: A la izquierda se ve a la estación U45B sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 peak.

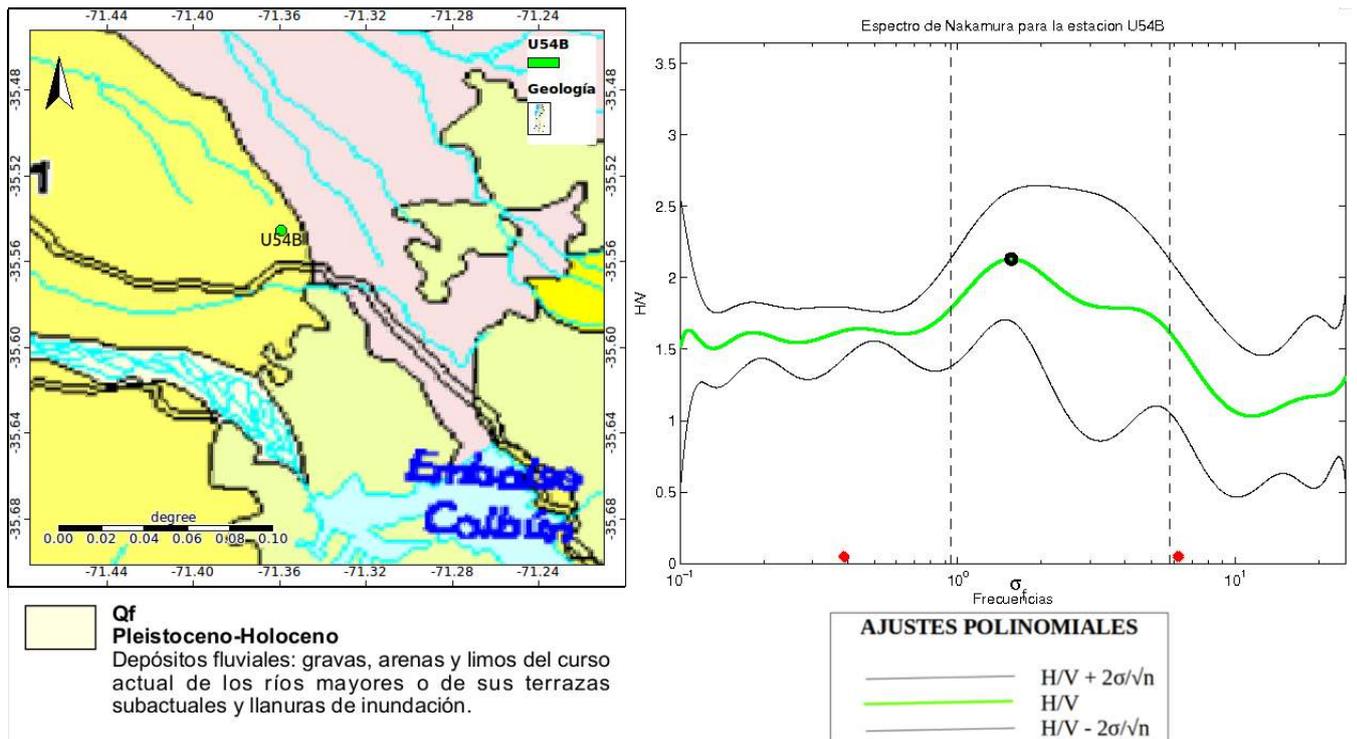


Figura C.11: A la izquierda se ve a la estación U54B sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 peak.

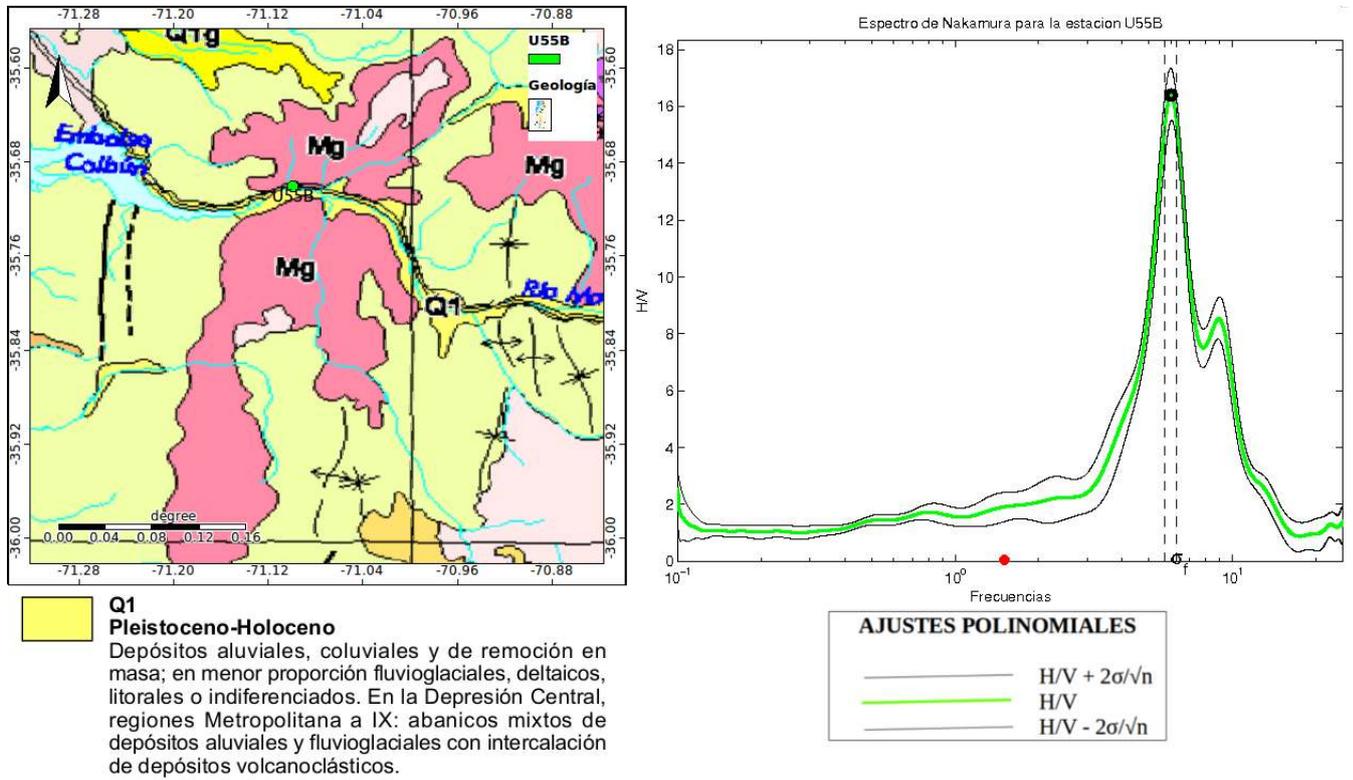


Figura C.12: A la izquierda se ve a la estación U55B sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 peak.

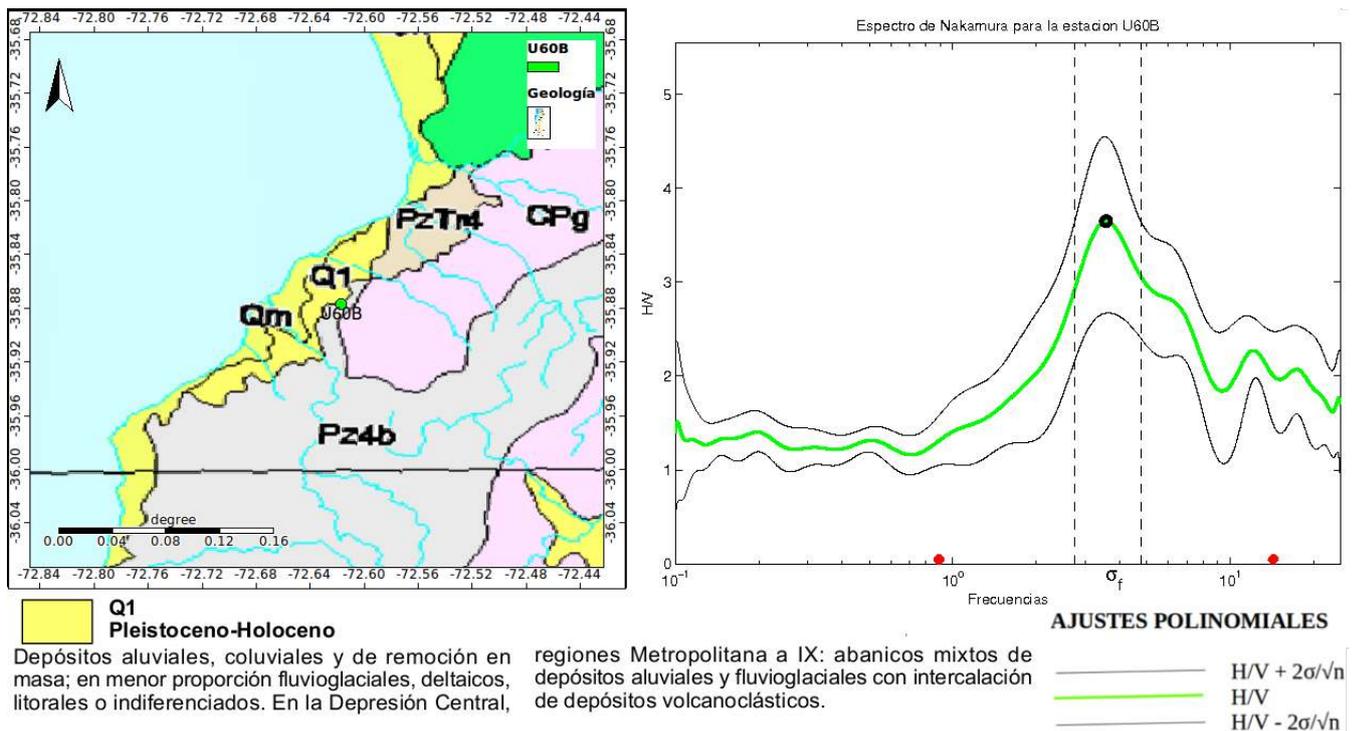


Figura C.13: A la izquierda se ve a la estación U60B sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 peak.

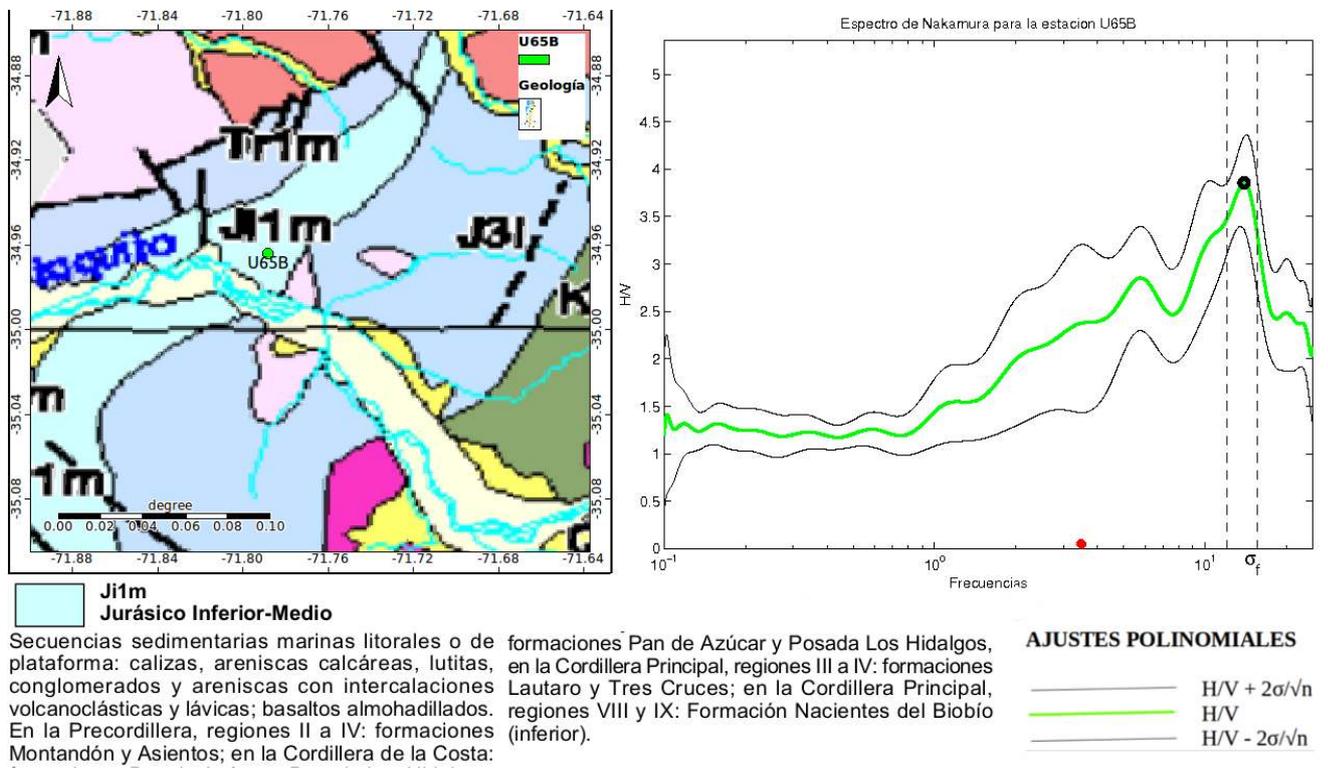


Figura C.14: A la izquierda se ve a la estación U65B sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 peak.

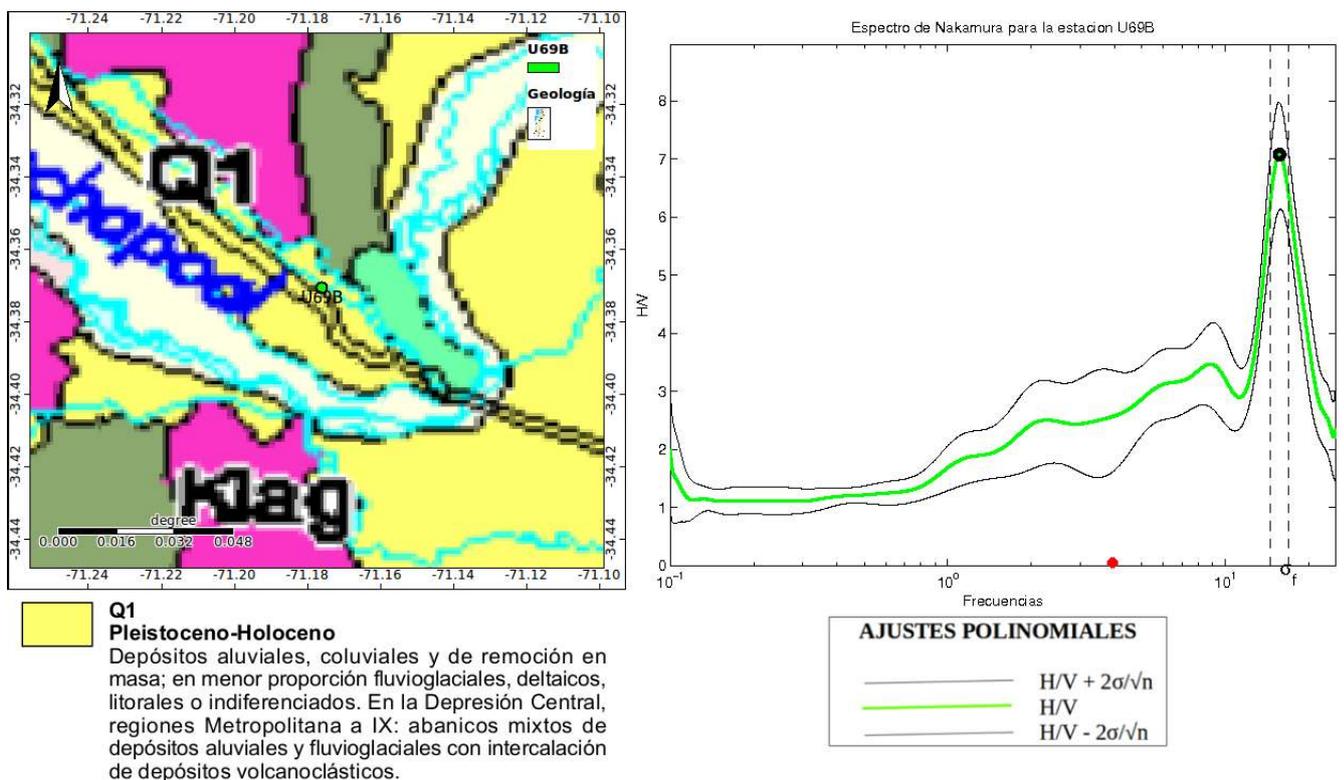


Figura C.15: A la izquierda se ve a la estación U69B sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 peak.

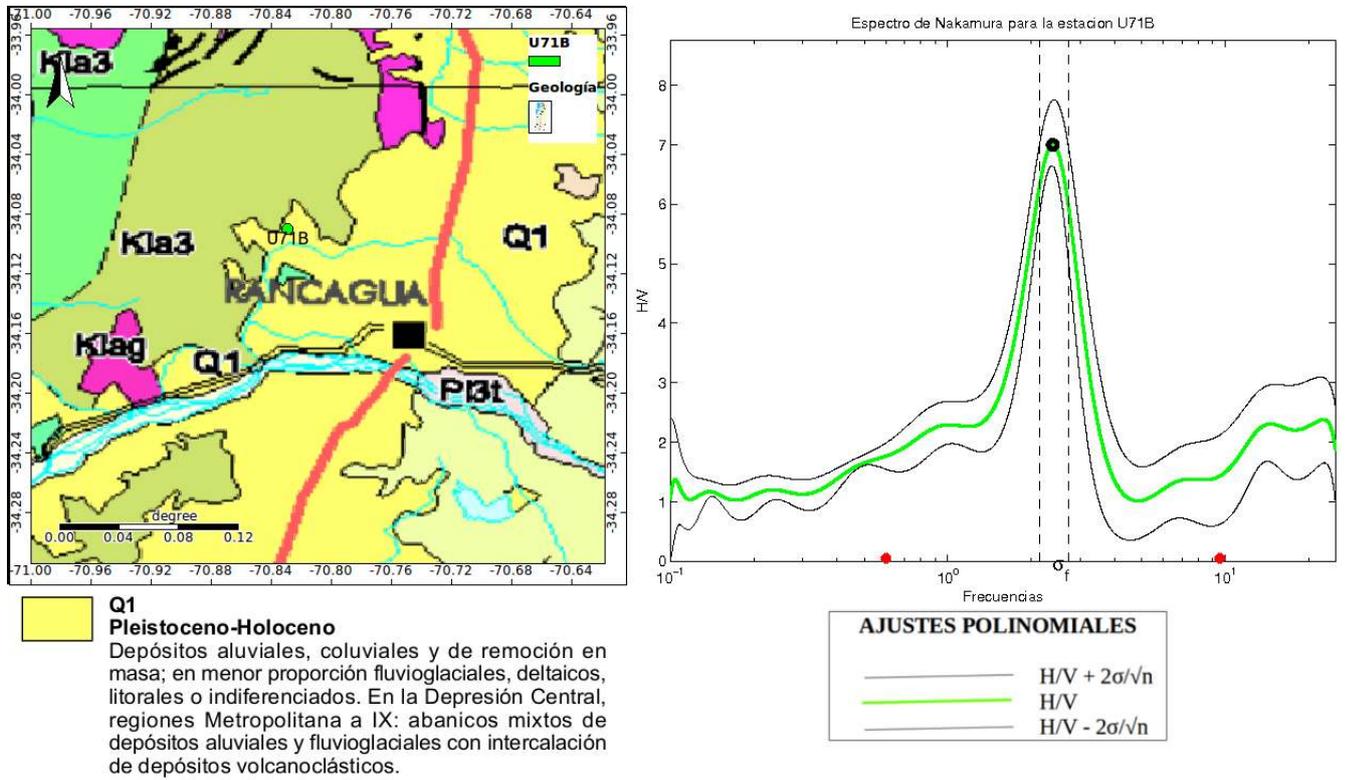


Figura C.16: A la izquierda se ve a la estación U71B sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 peak.

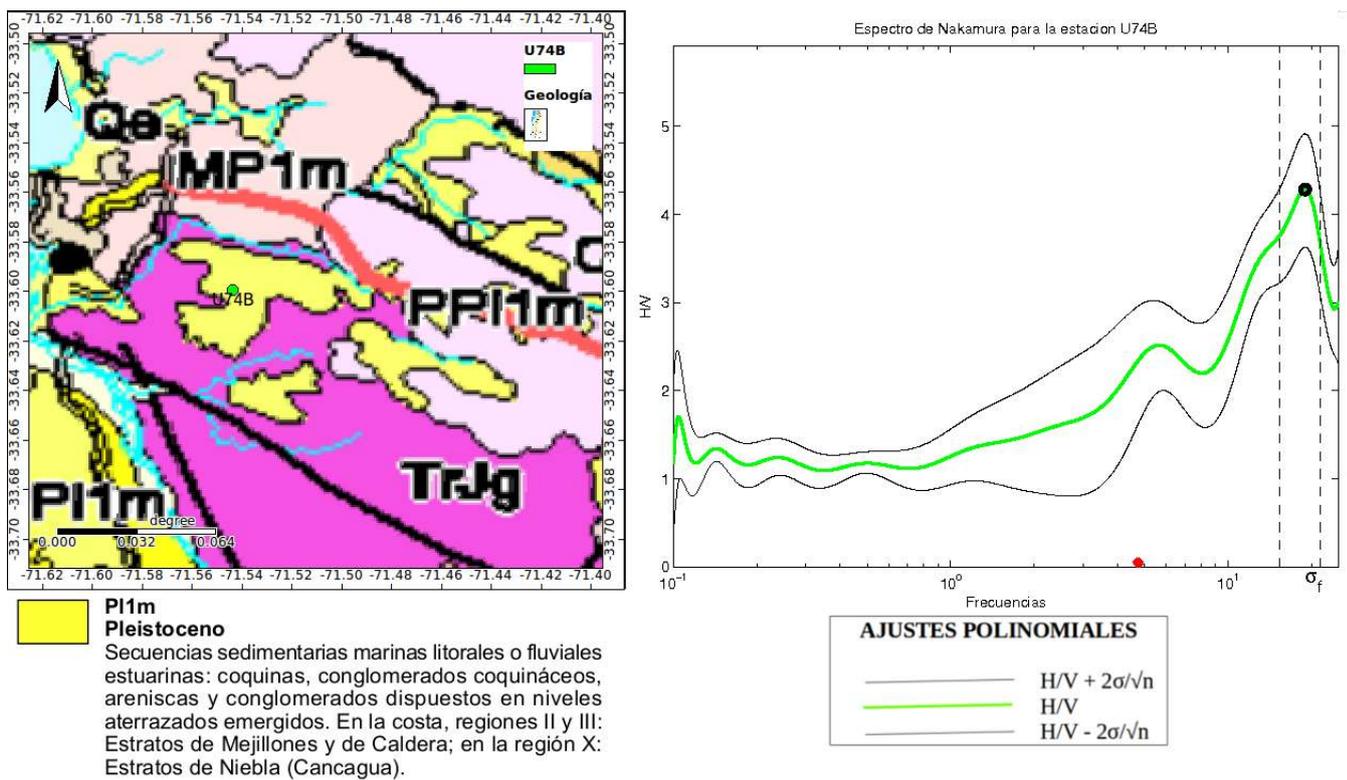


Figura C.17: A la izquierda se ve a la estación U74B sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 peak.

A continuación podrán apreciar las imágenes correspondientes a las estaciones sobre roca sedimentaria con dos peak.

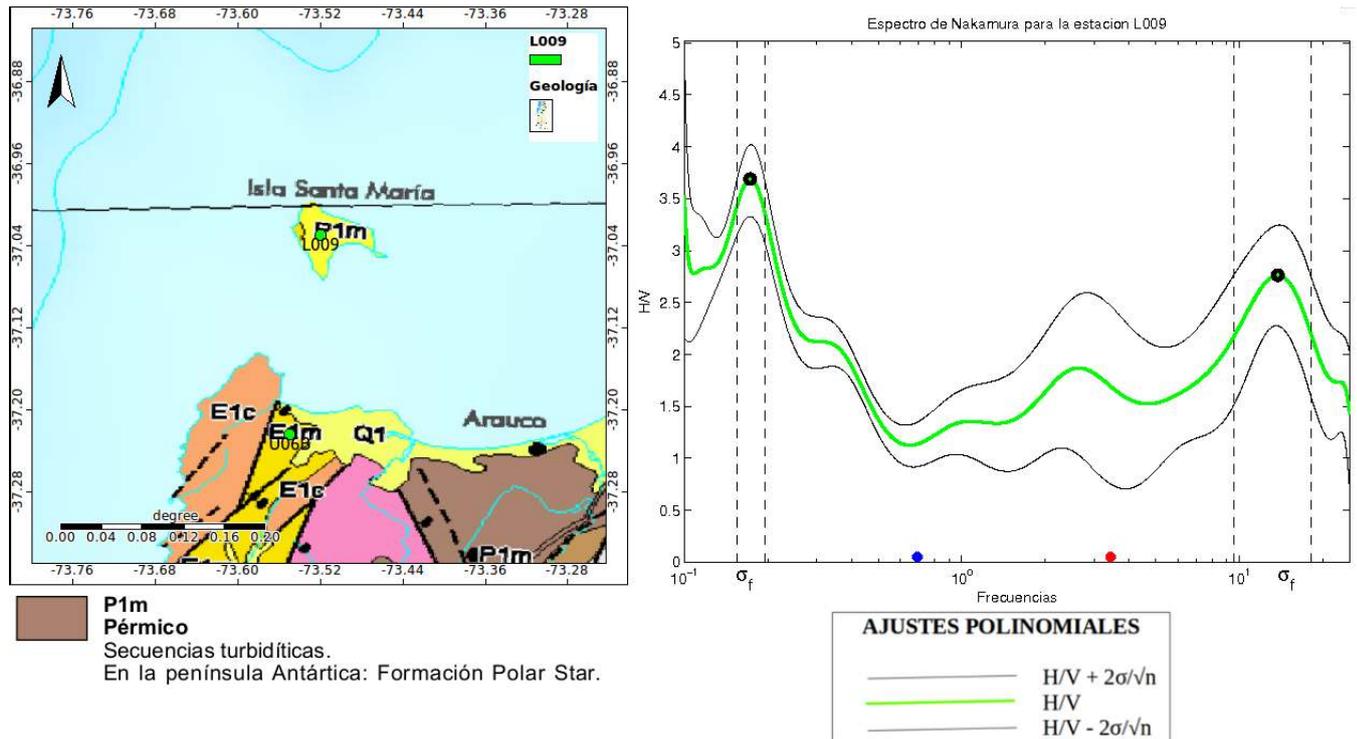


Figura C.18: A la izquierda se ve a la estación L009 sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 2 peak.

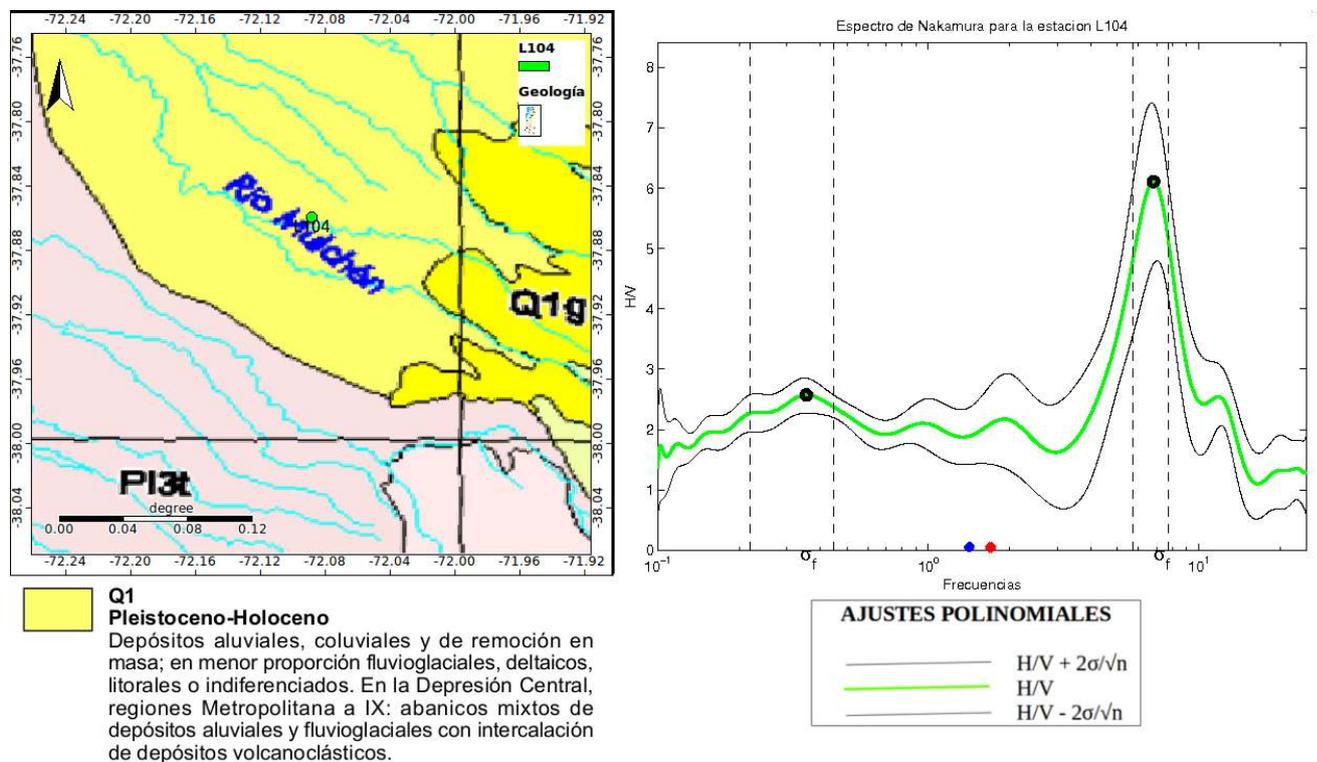


Figura C.19: A la izquierda se ve a la estación L104 sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 2 peak.

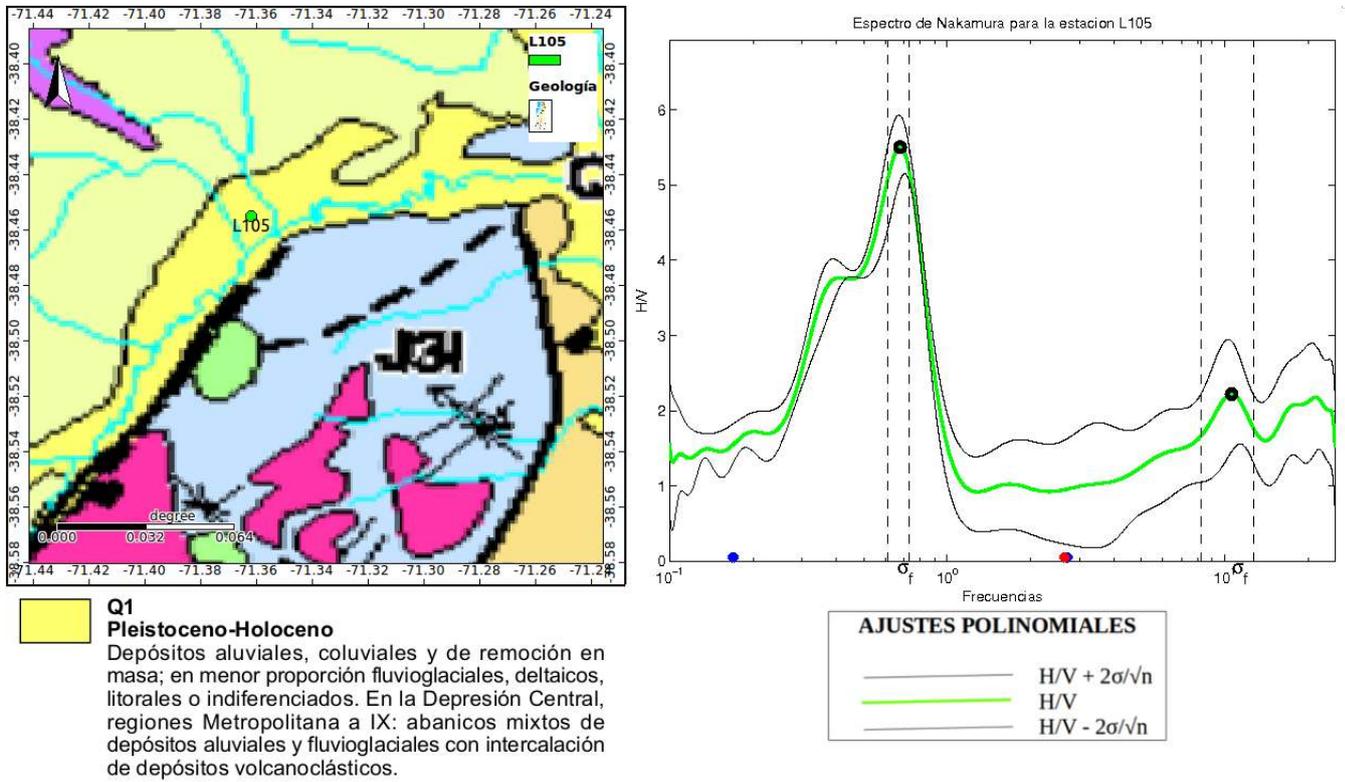


Figura C.20: A la izquierda se ve a la estación L105 sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 2 peak.

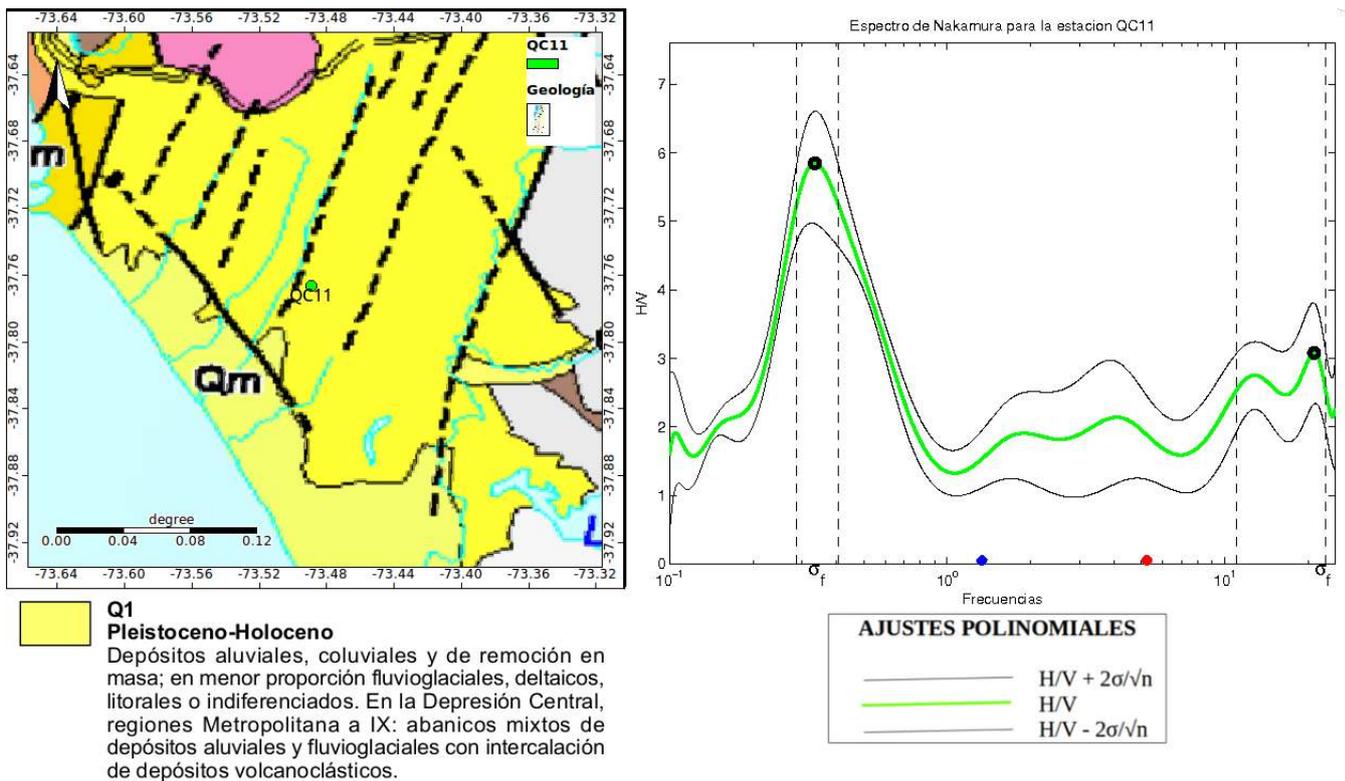


Figura C.21: A la izquierda se ve a la estación QC11 sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 2 peak.

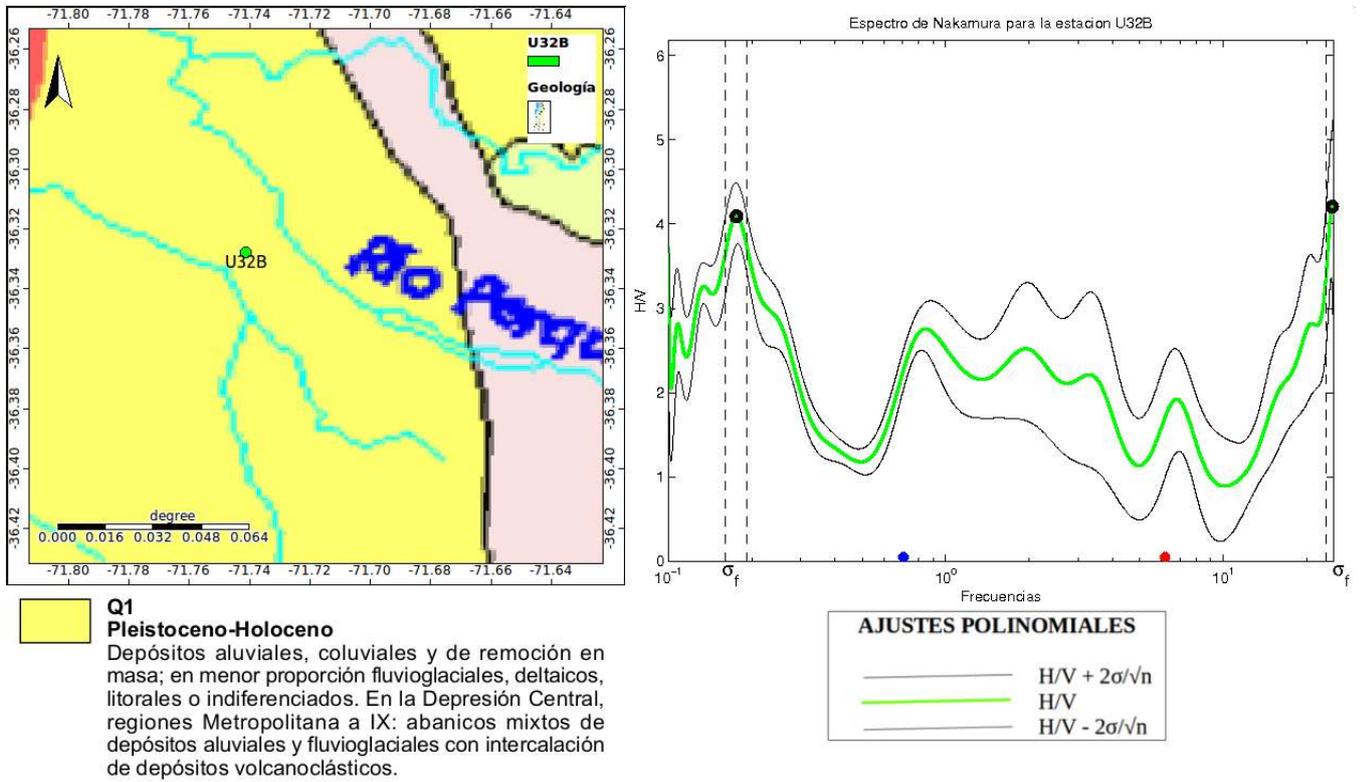


Figura C.22: A la izquierda se ve a la estación U32B sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 2 peak.

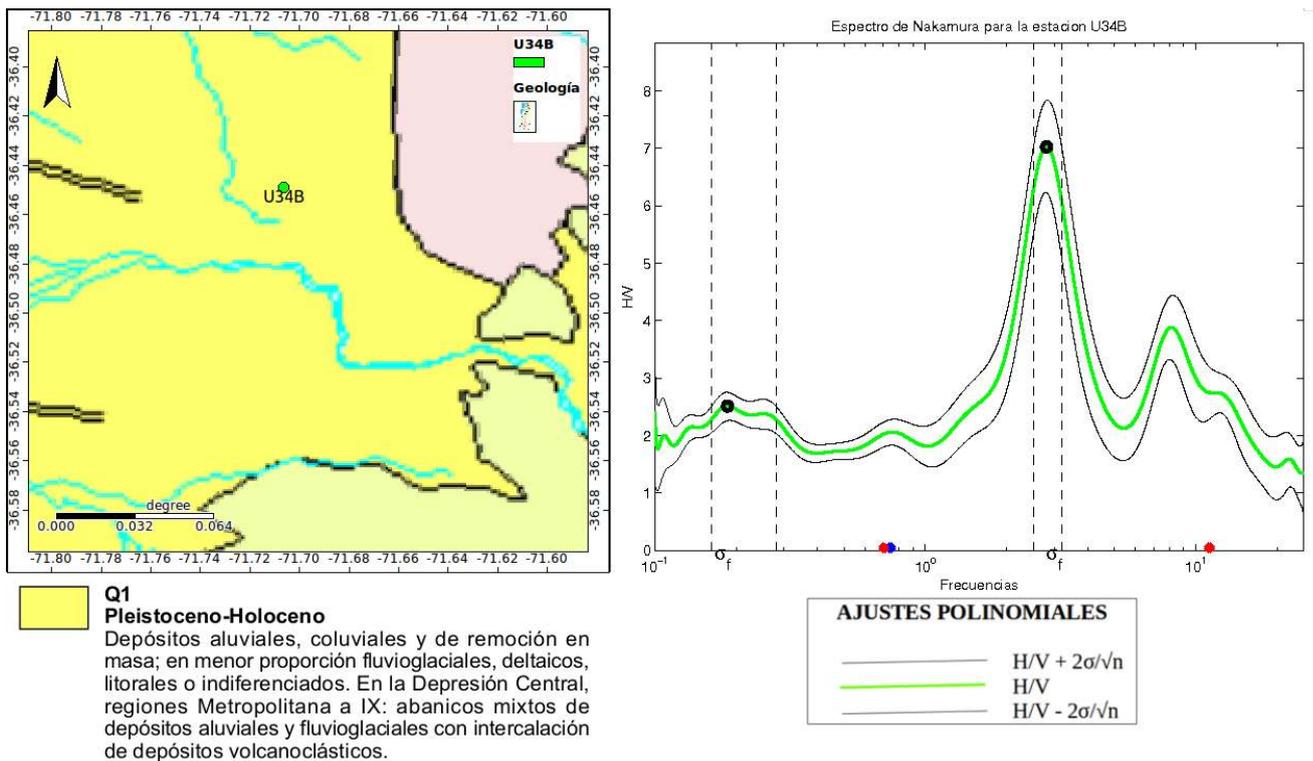


Figura C.23: A la izquierda se ve a la estación U34B sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 2 peak.

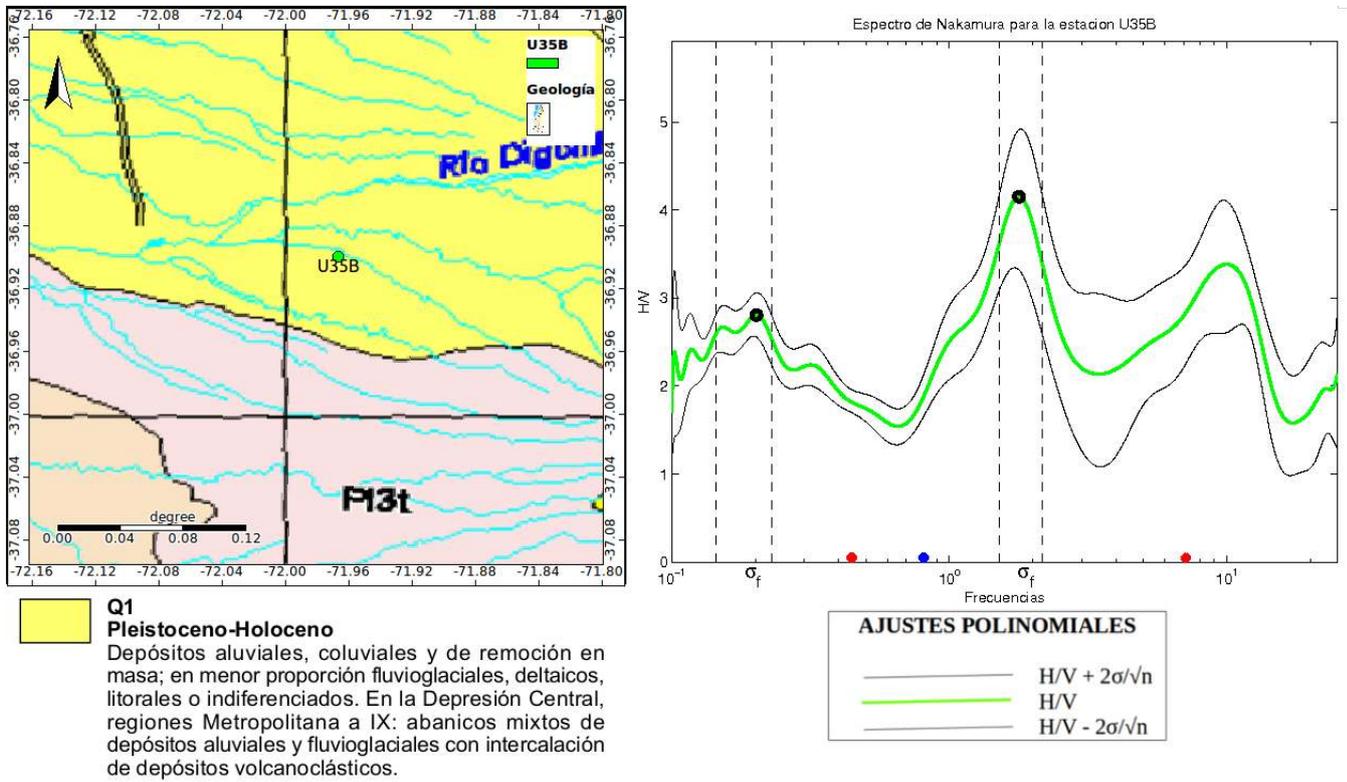


Figura C.24: A la izquierda se ve a la estación U35B sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 2 peak.

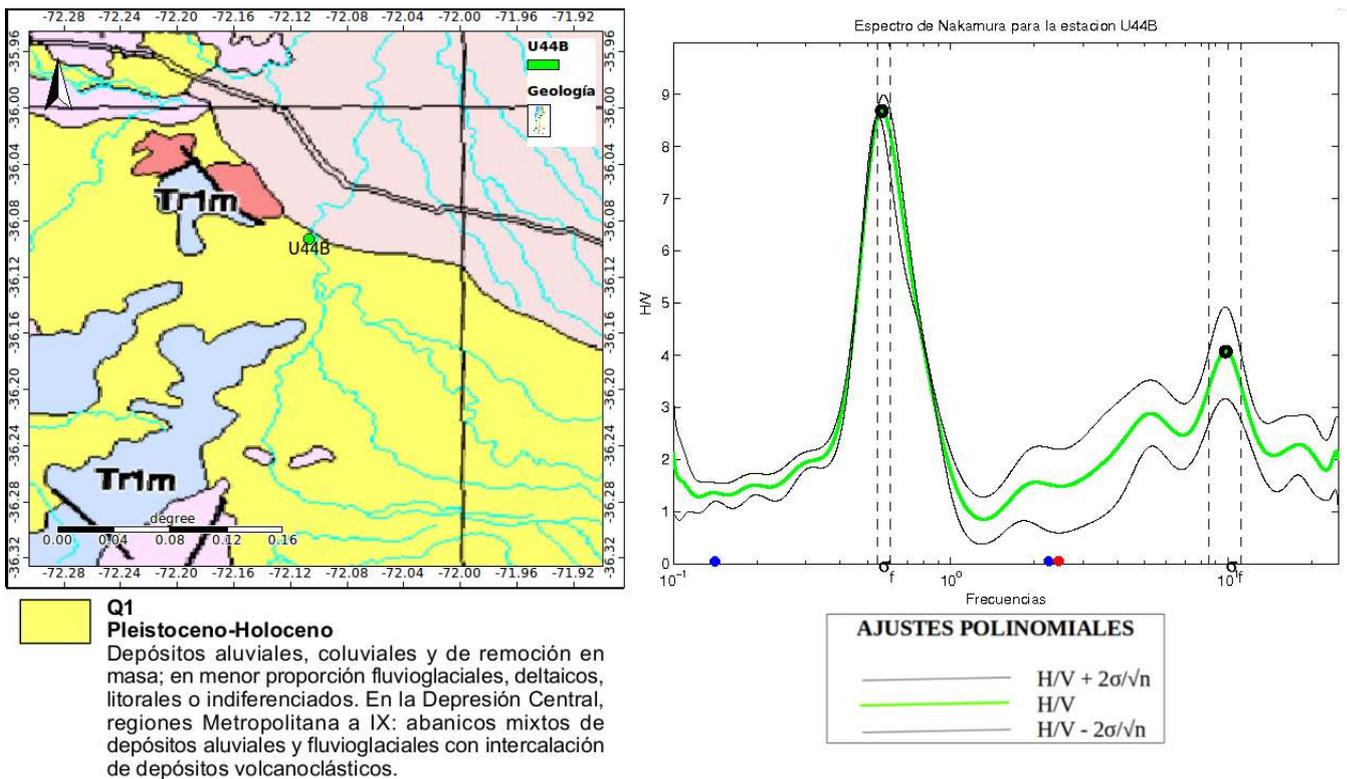


Figura C.25: A la izquierda se ve a la estación U44B sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 2 peak.

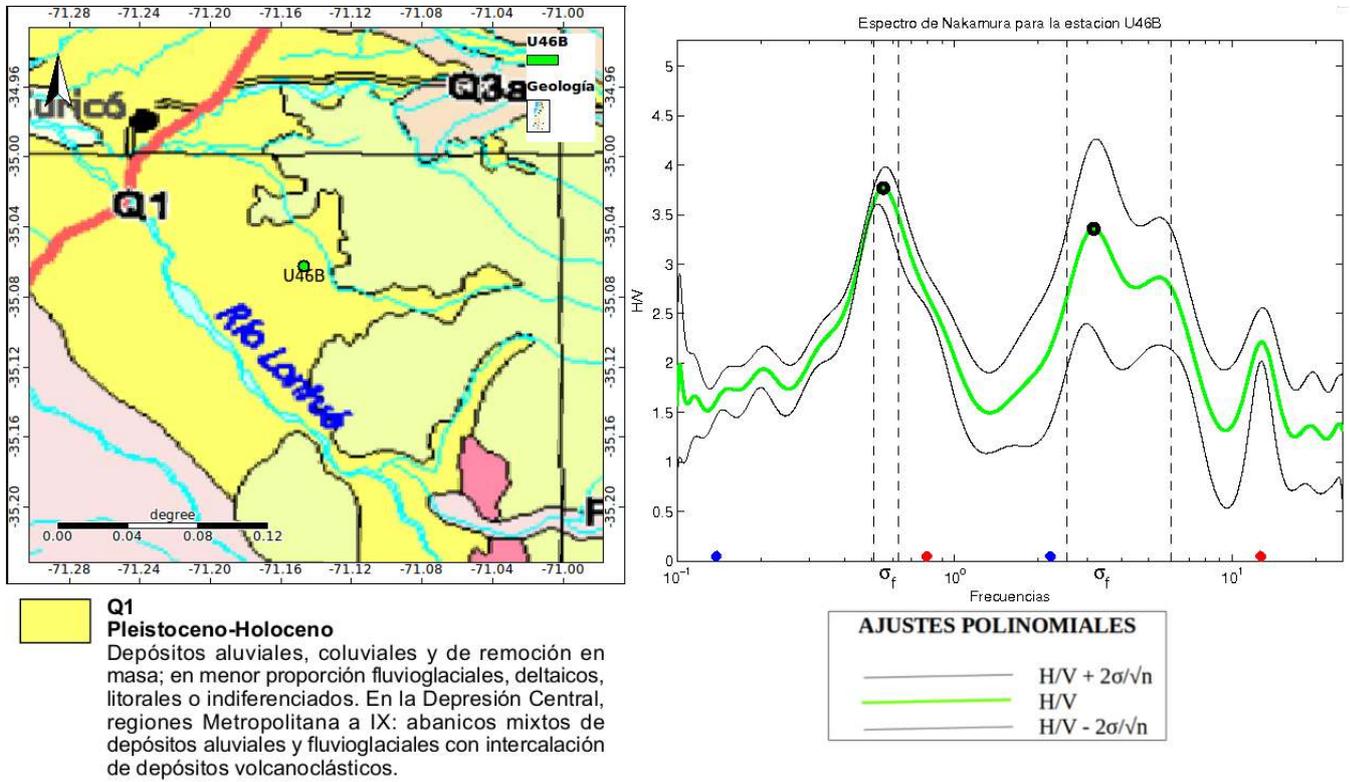


Figura C.26: A la izquierda se ve a la estación U46B sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 2 peak.

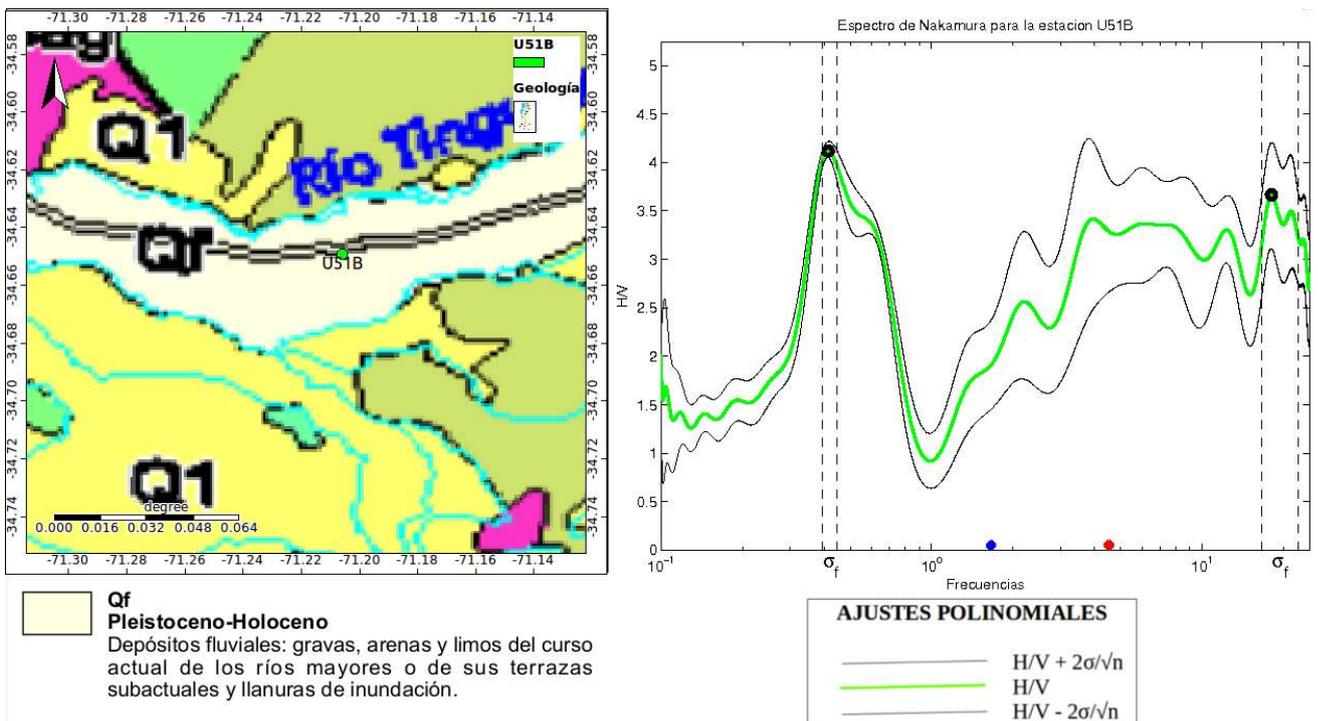


Figura C.27: A la izquierda se ve a la estación U51B sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 2 peak.

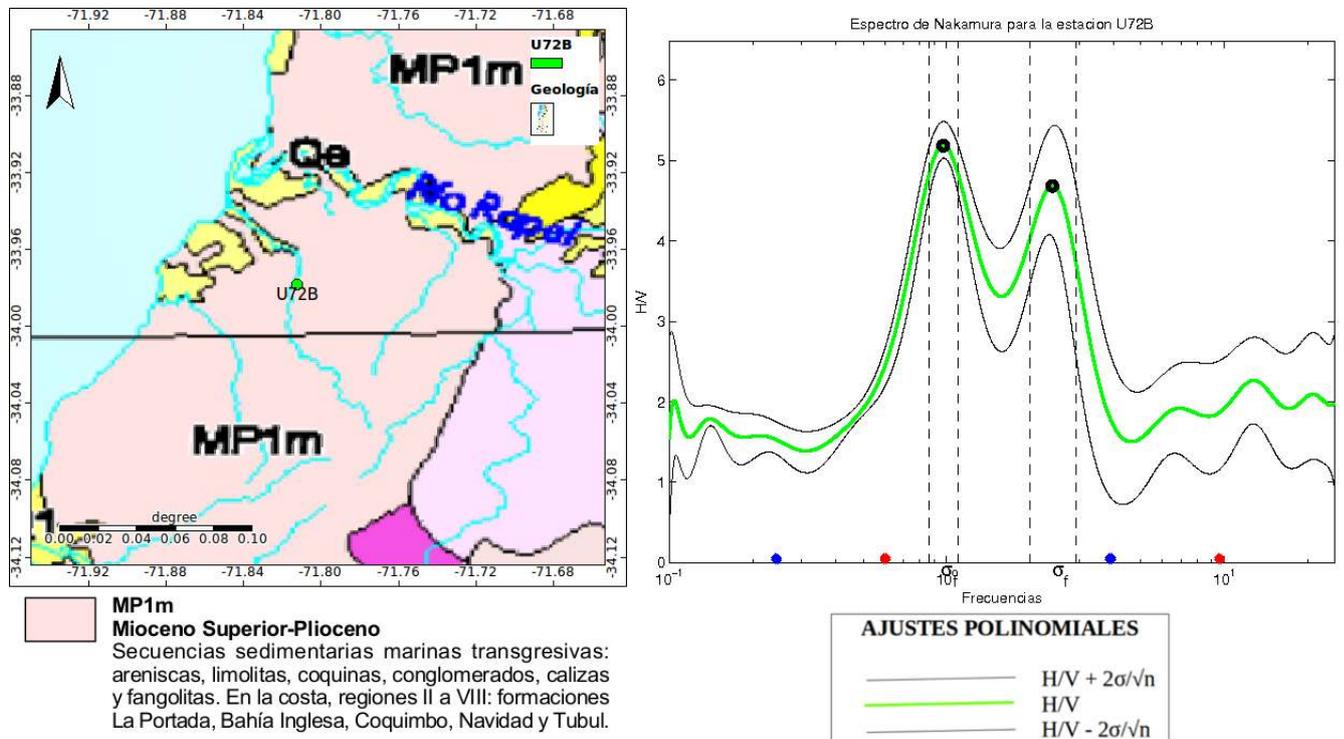


Figura C.30: A la izquierda se ve a la estación U72B sobre roca sedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 2 peak.

A continuación podrán apreciar las imágenes correspondientes a las estaciones sobre roca volcánica con un peak.

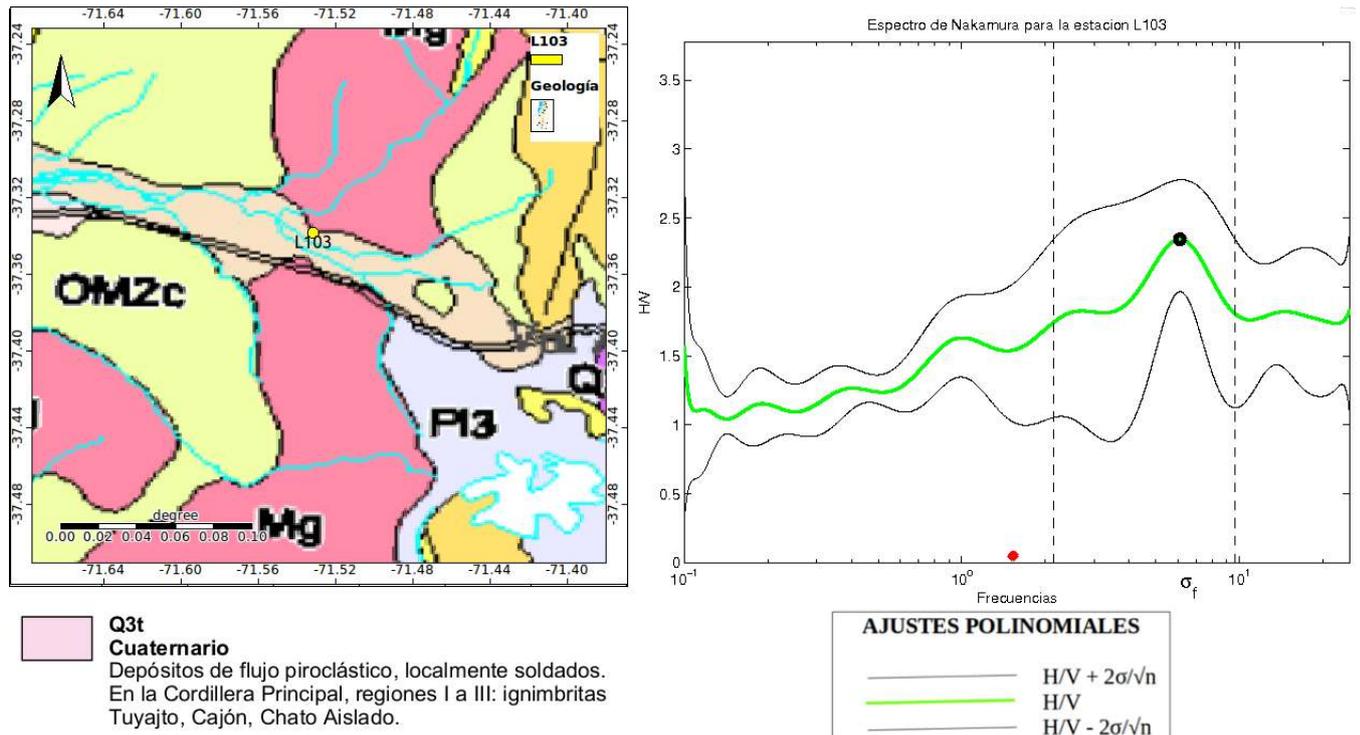


Figura C.31: A la izquierda se ve a la estación L103 sobre roca volcánica, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.

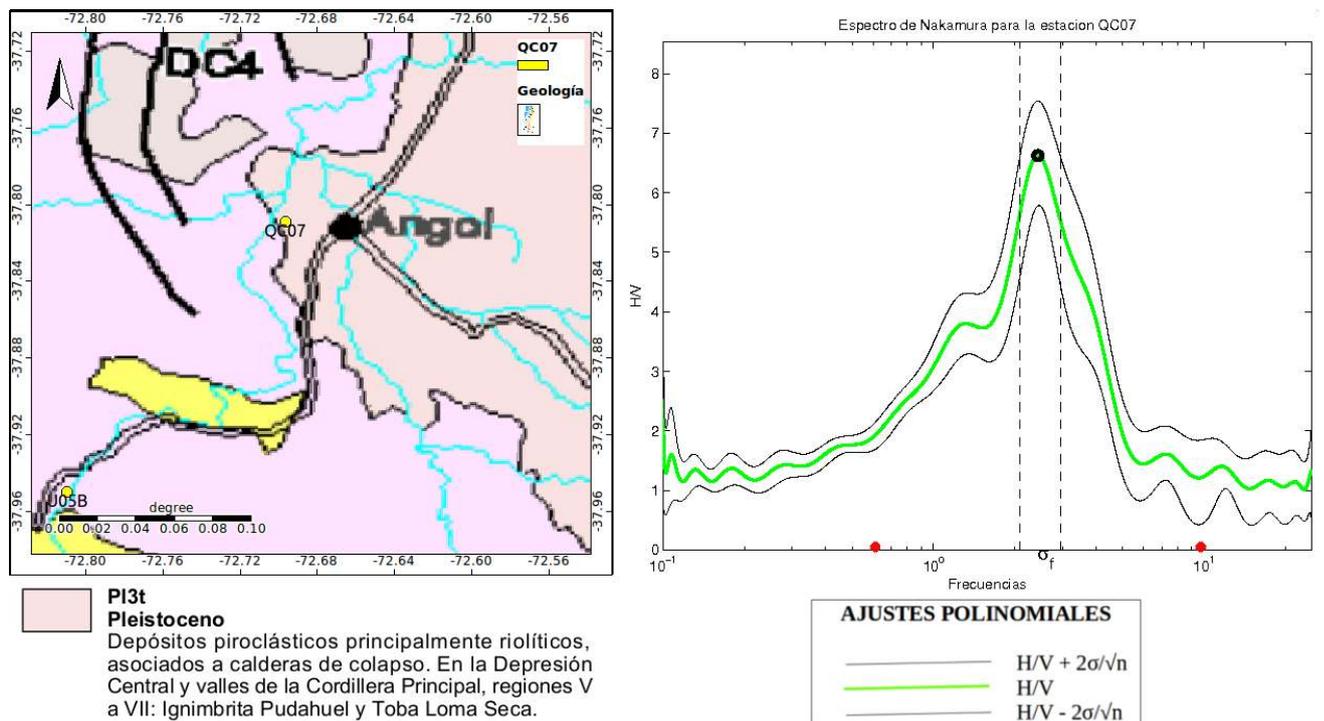


Figura C.32: A la izquierda se ve a la estación QC07 sobre roca volcánica, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.

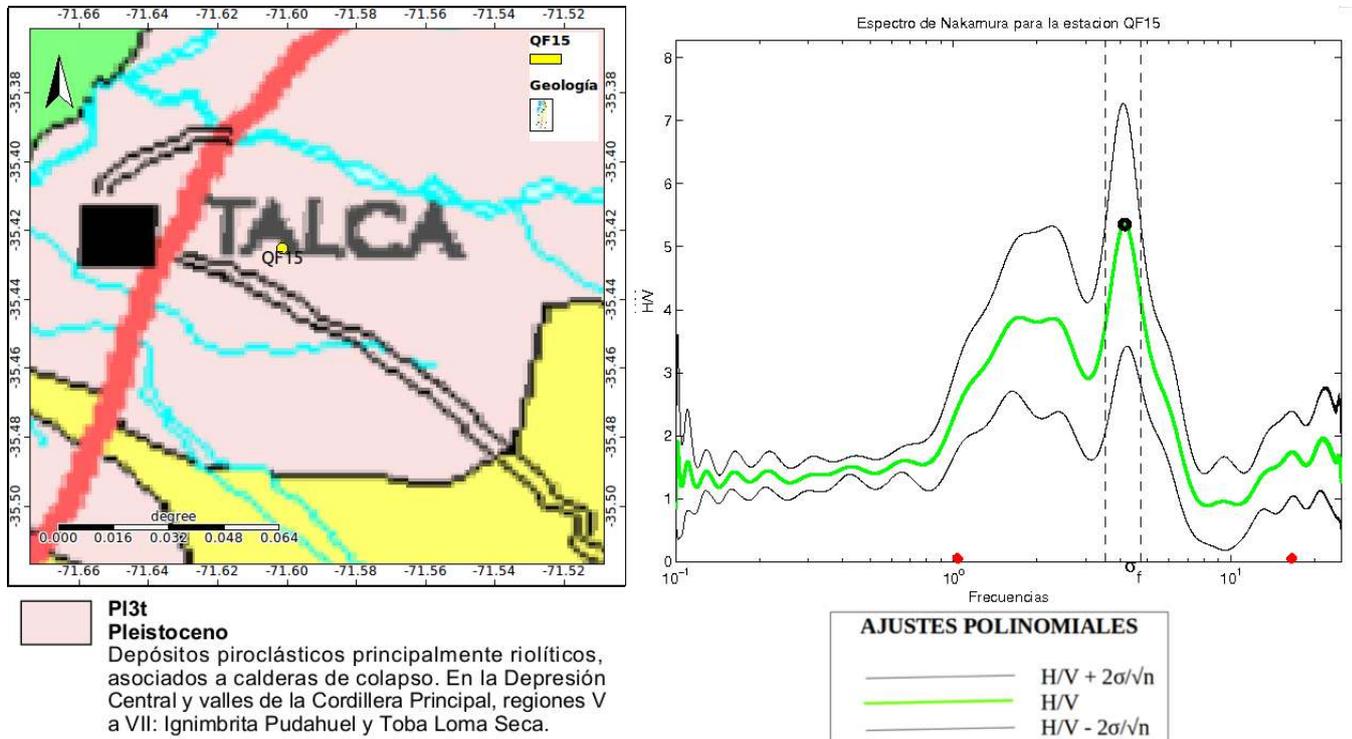


Figura C.33: A la izquierda se ve a la estación QF15 sobre roca volcánica, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.

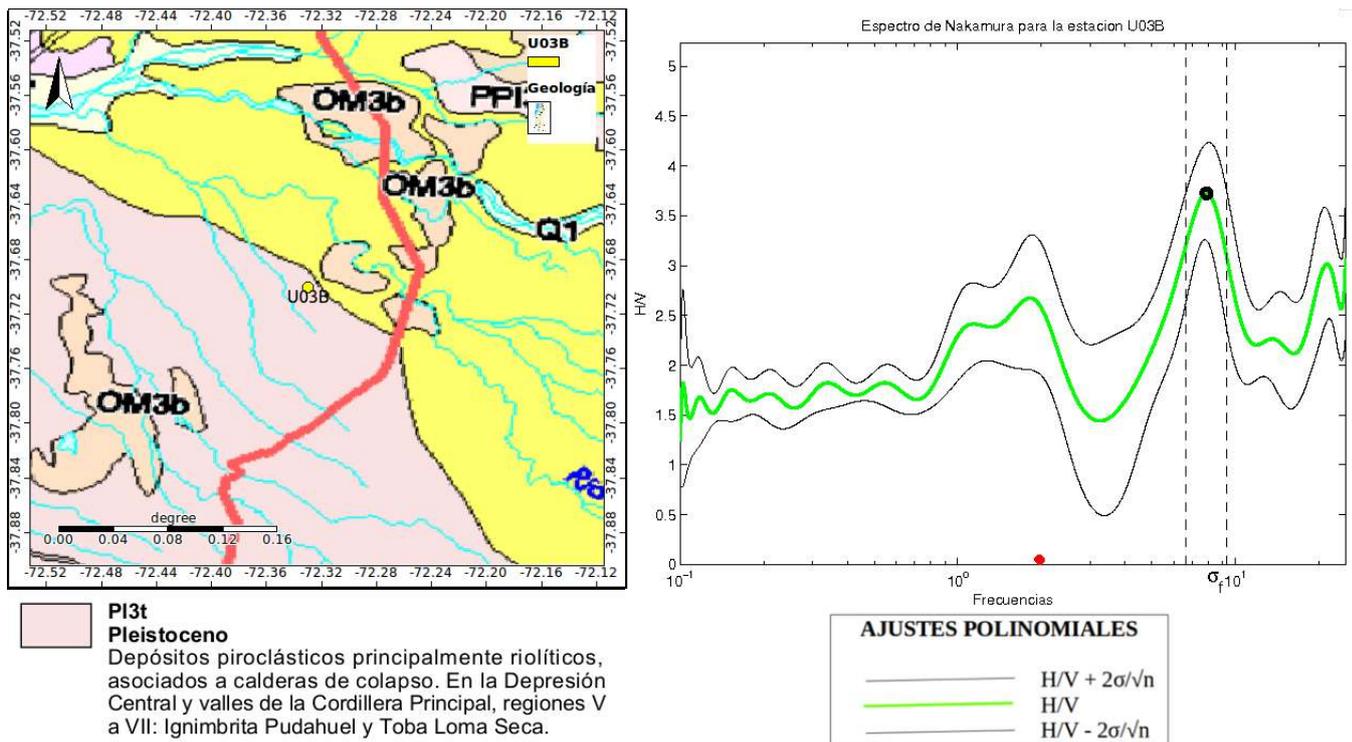


Figura C.34: A la izquierda se ve a la estación U03B sobre roca volcánica, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.

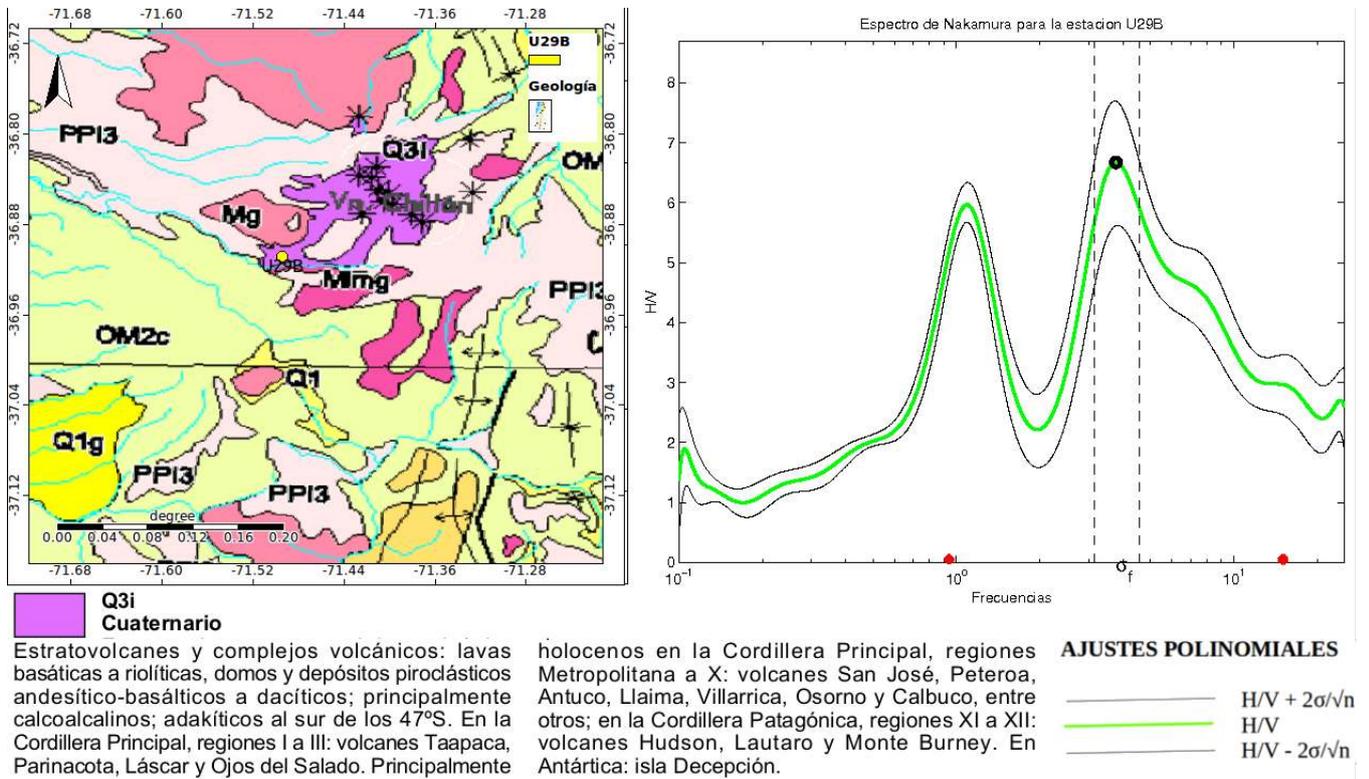


Figura C.35: A la izquierda se ve a la estación U29B sobre roca volcánica, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.

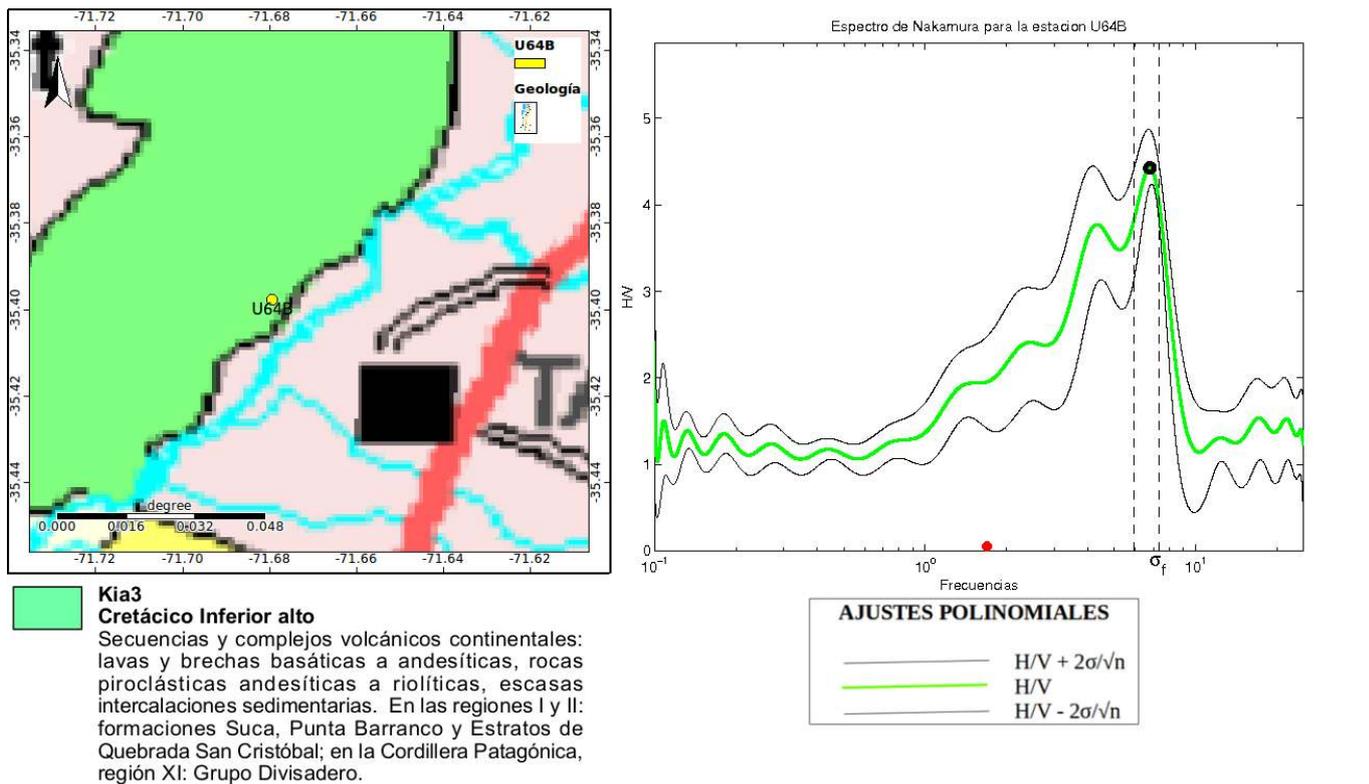


Figura C.36: A la izquierda se ve a la estación U64B sobre roca volcánica, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.

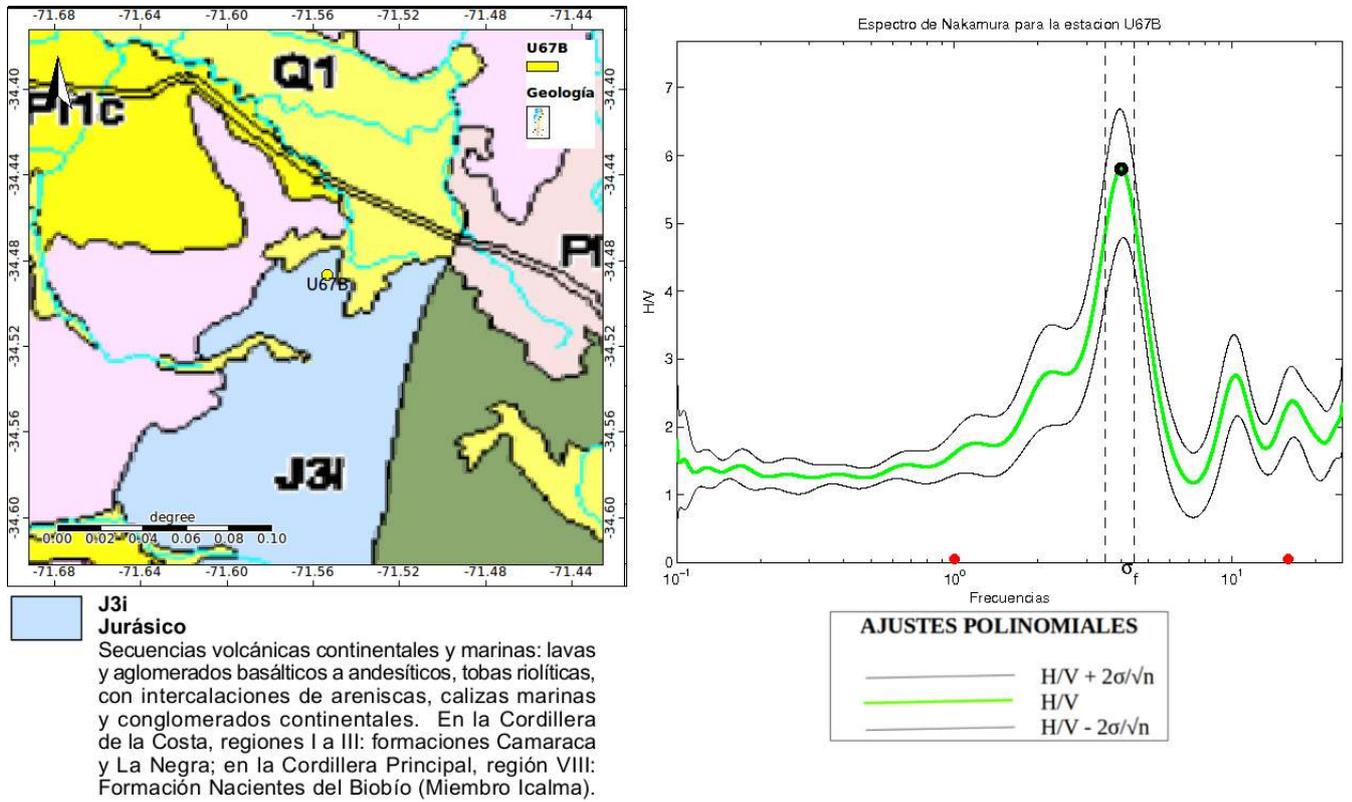


Figura C.37: A la izquierda se ve a la estación U67B sobre roca volcánica, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.

A continuación podrán apreciar las imágenes correspondientes a las estaciones sobre roca volcánica con 2 peak.

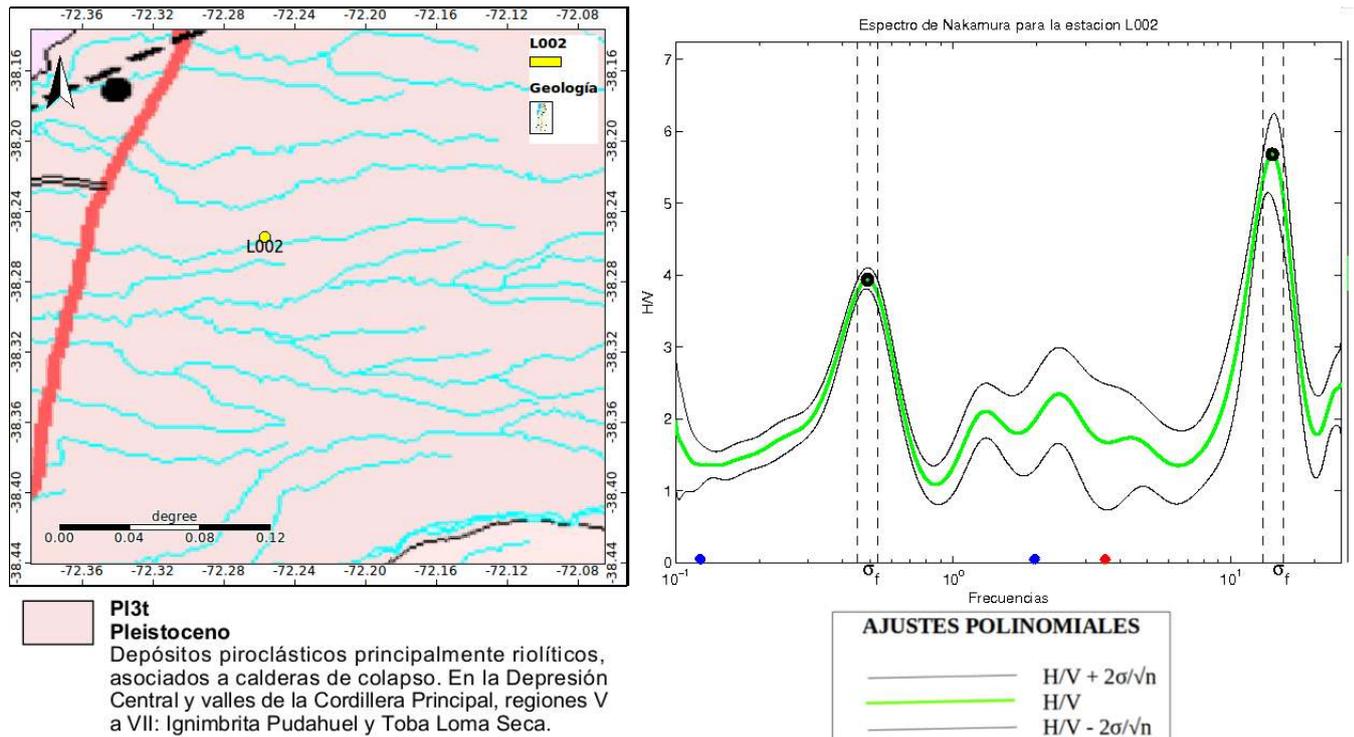


Figura C.38: A la izquierda se ve a la estación L002 sobre roca volcánica, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 2 peak.

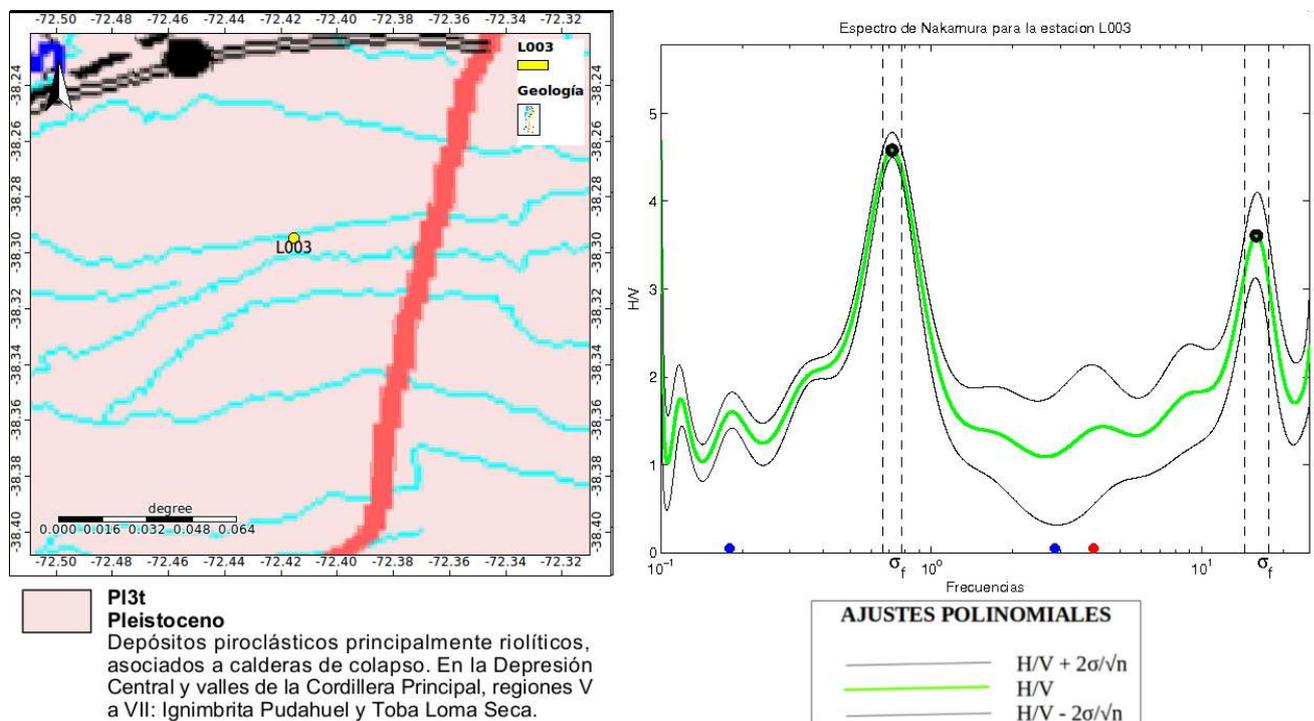
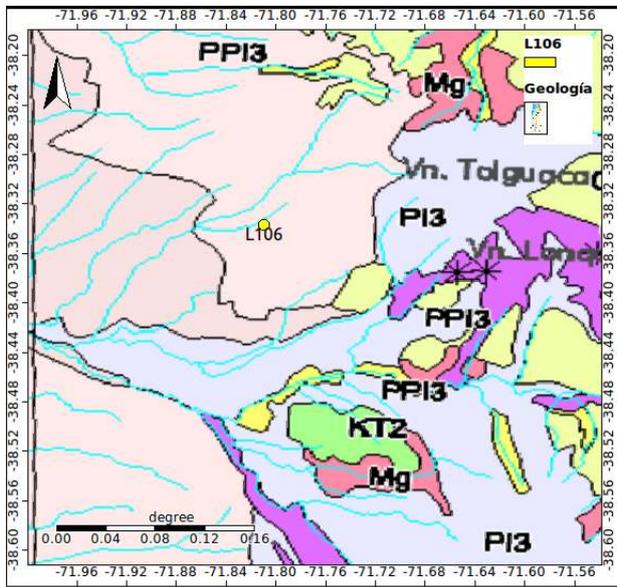


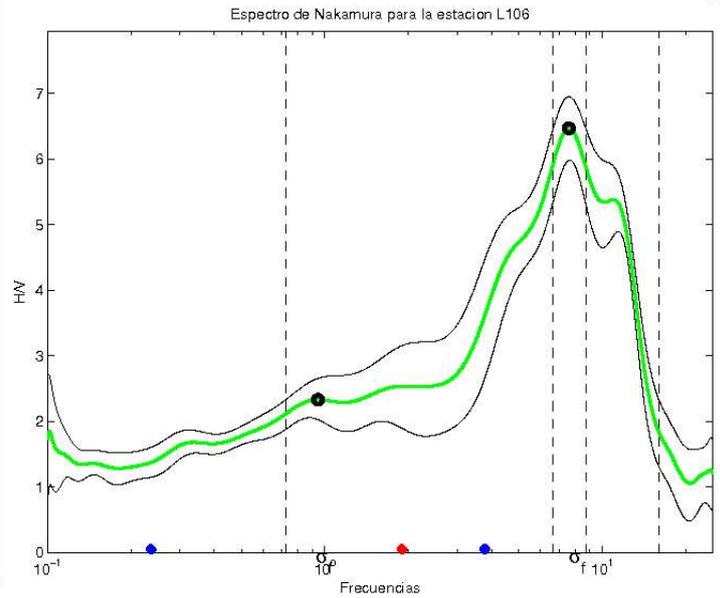
Figura C.39: A la izquierda se ve a la estación L003 sobre roca volcánica, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 2 peak.



PPI3
Plioceno-Pleistoceno

Secuencias y centros volcánicos parcialmente erodados: lavas principalmente basálticas con intercalaciones de tobas y conglomerados. En la Cordillera Principal, regiones VII a X: formaciones Cola de Zorro y Malleco;

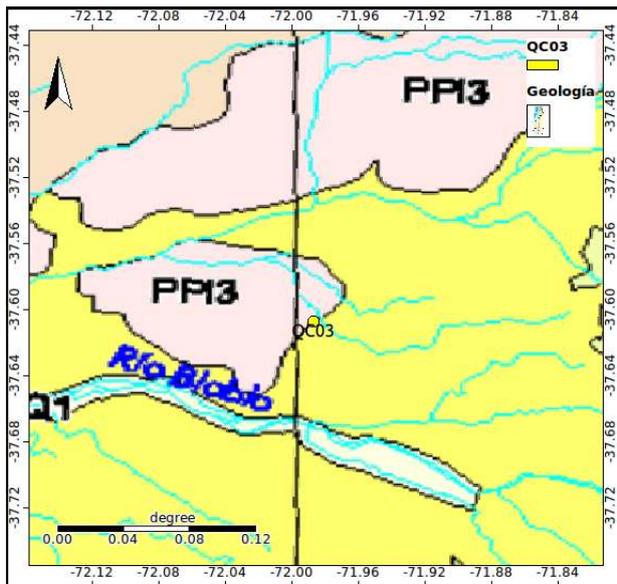
en la Cordillera Patagónica, región XII: basaltos de Pali Aike; en las islas oceánicas: volcán Poike (Isla de Pascua), archipiélago Juan Fernández, isla Salas y Gómez; islas San Félix y San Ambrosio.



AJUSTES POLINOMIALES

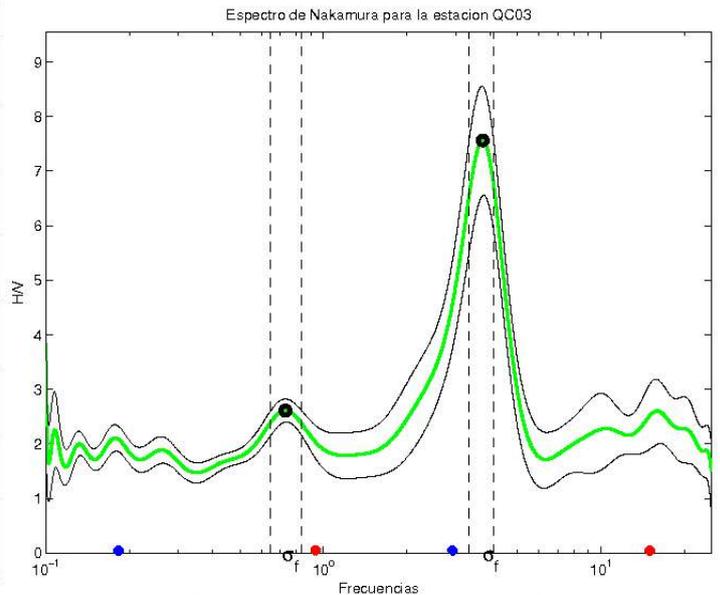
— $H/V + 2\sigma/\sqrt{n}$
— H/V
— $H/V - 2\sigma/\sqrt{n}$

Figura C.40: A la izquierda se ve a la estación L106 sobre roca volcánica, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 2 peak.



PPI3
Plioceno-Pleistoceno

Secuencias y centros volcánicos parcialmente erodados: lavas principalmente basálticas con intercalaciones de tobas y conglomerados. En la Cordillera Principal, regiones VII a X: formaciones Cola de Zorro y Malleco; en la Cordillera Patagónica, región XII: basaltos de Pali Aike; en las islas oceánicas: volcán Poike (Isla de Pascua), archipiélago Juan Fernández, isla Salas y Gómez; islas San Félix y San Ambrosio.



AJUSTES POLINOMIALES

— $H/V + 2\sigma/\sqrt{n}$
— H/V
— $H/V - 2\sigma/\sqrt{n}$

Figura C.41: A la izquierda se ve a la estación QC03 sobre roca volcánica, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 2 peak.

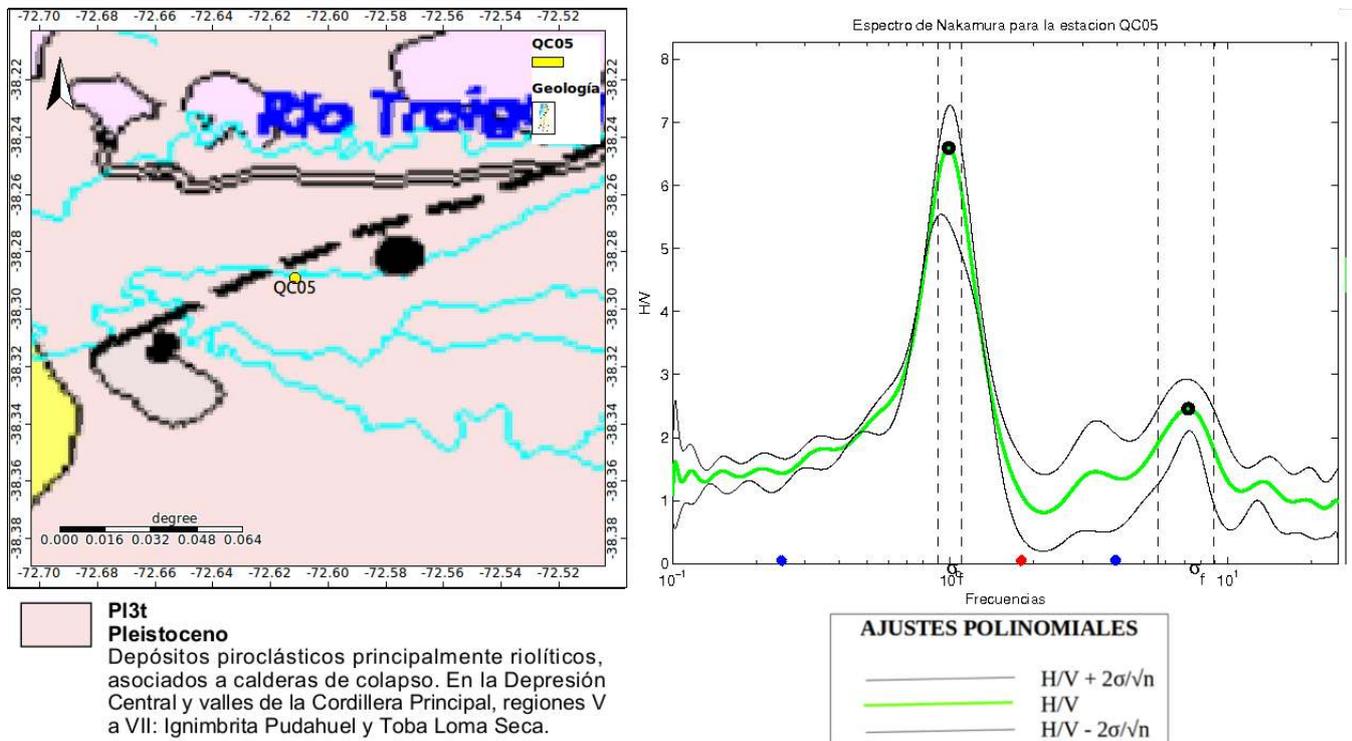


Figura C.42: A la izquierda se ve a la estación QC05 sobre roca volcánica, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 2 peak.

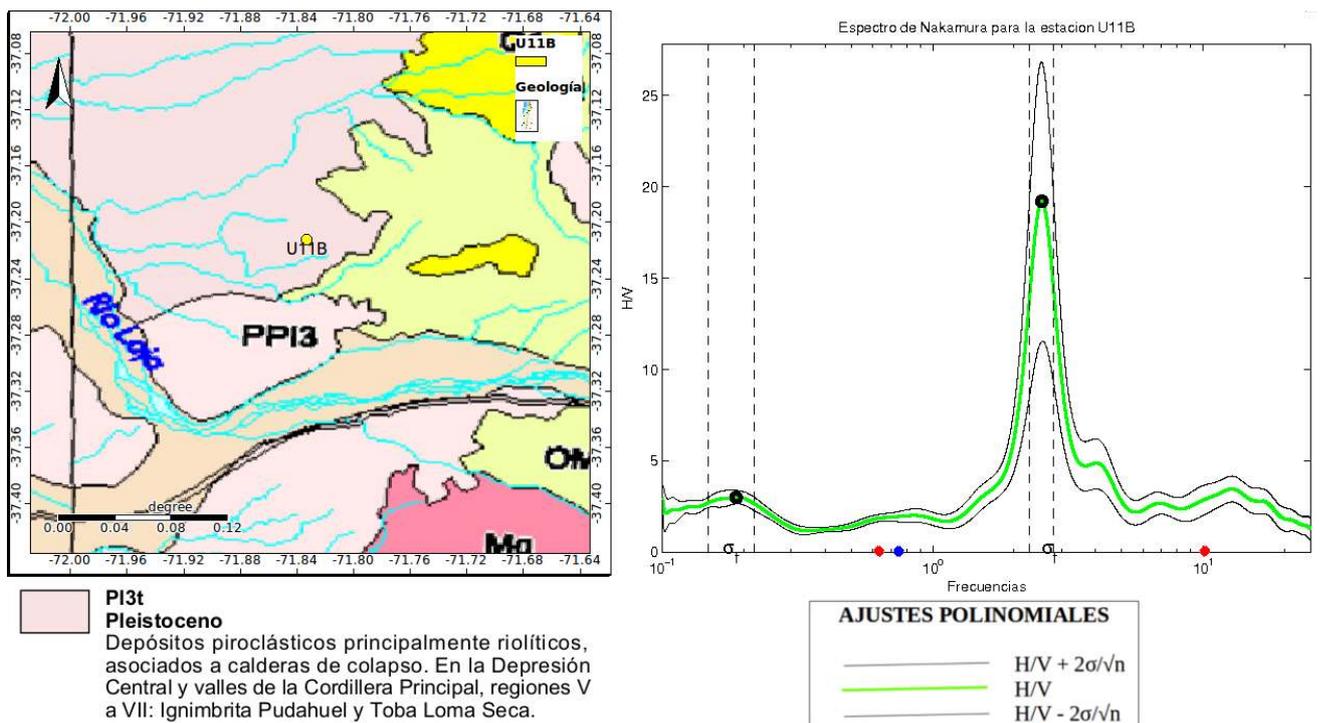


Figura C.43: A la izquierda se ve a la estación U11B sobre roca volcánica, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 2 peak.

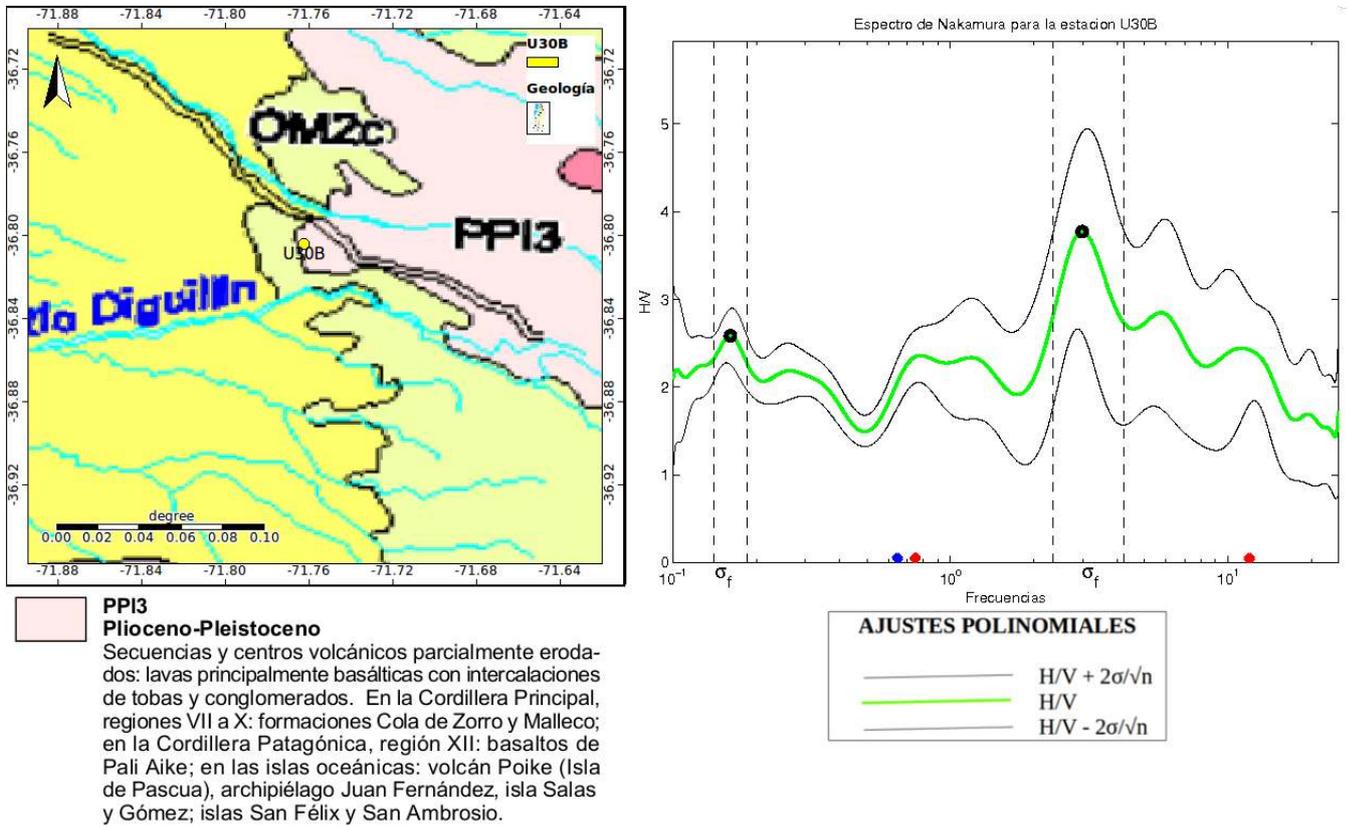


Figura C.44: A la izquierda se ve a la estación U30B sobre roca volcánica, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 2 peak.

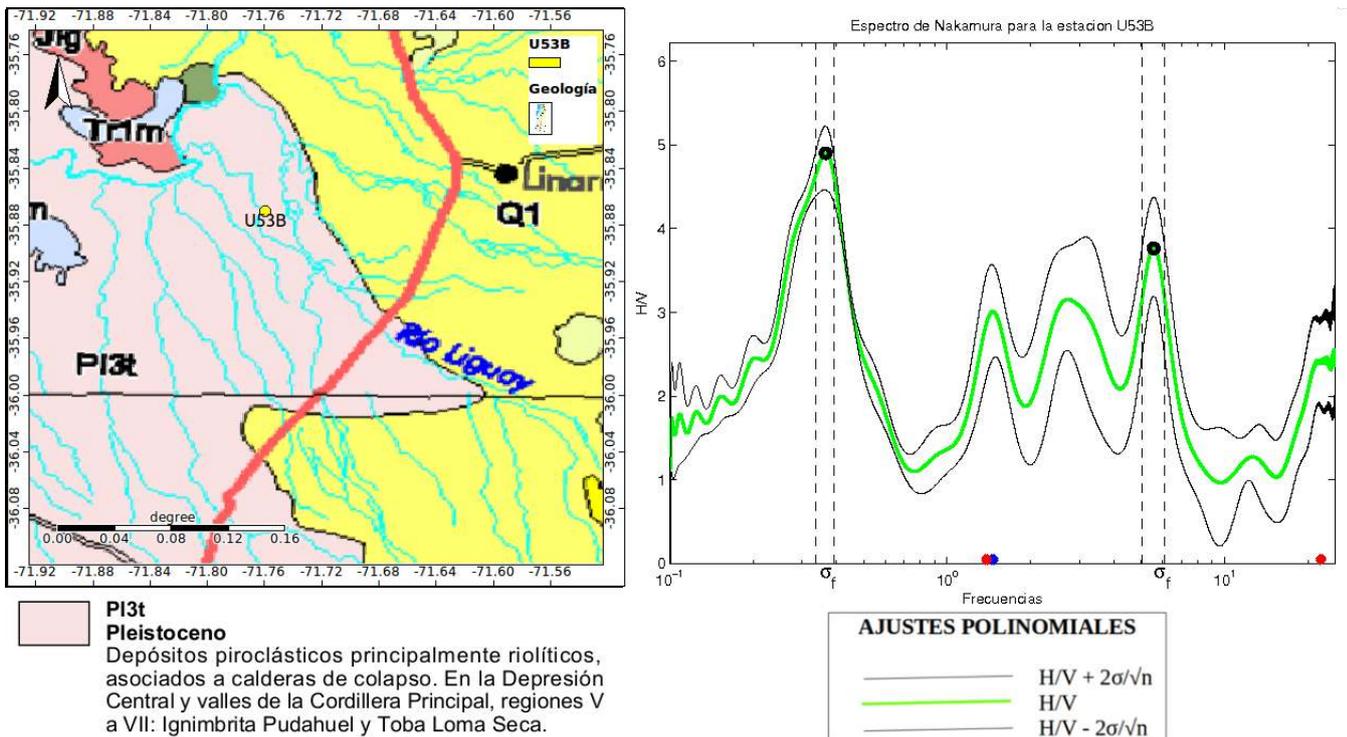


Figura C.45: A la izquierda se ve a la estación U53B sobre roca volcánica, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 2 peak.

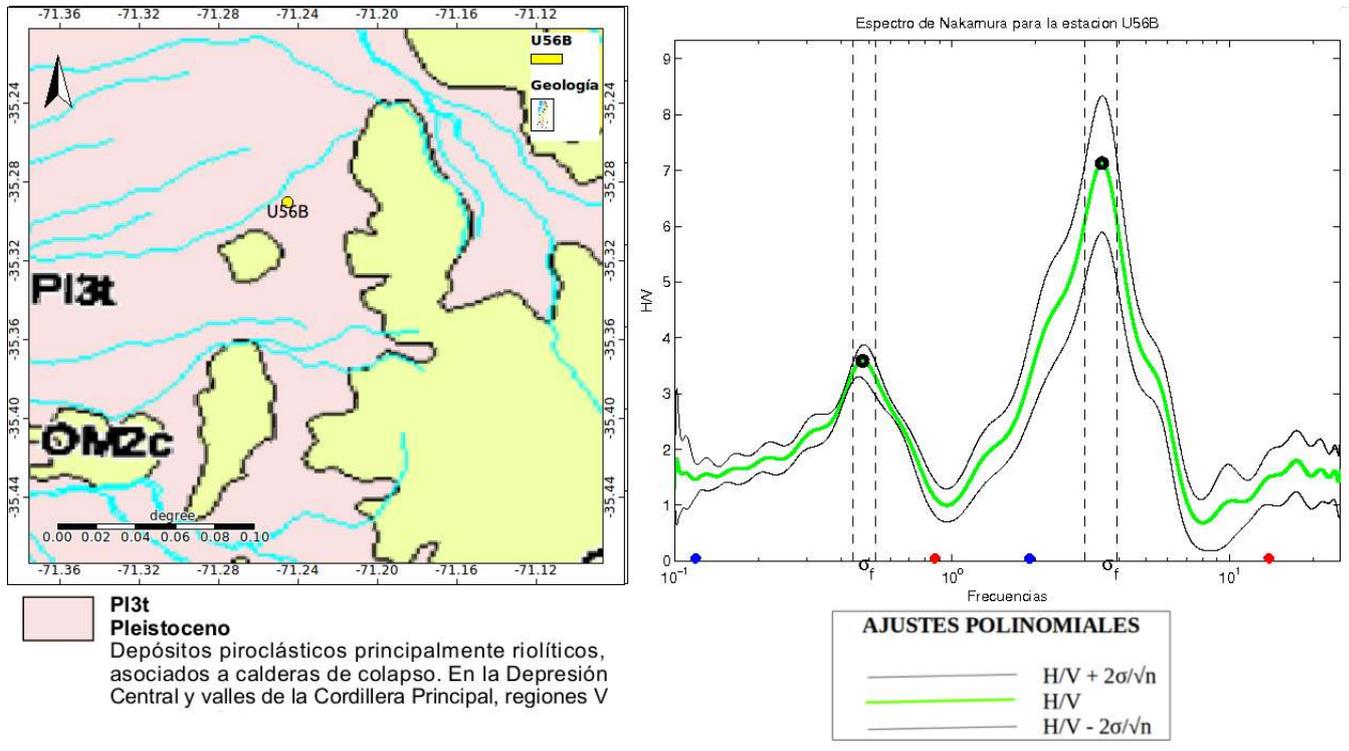


Figura C.46: A la izquierda se ve a la estación U56B sobre roca volcánica, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 2 peak.

A continuación podrán apreciar las imágenes correspondientes a las estaciones sobre roca volcanosedimentaria con 1 peak.

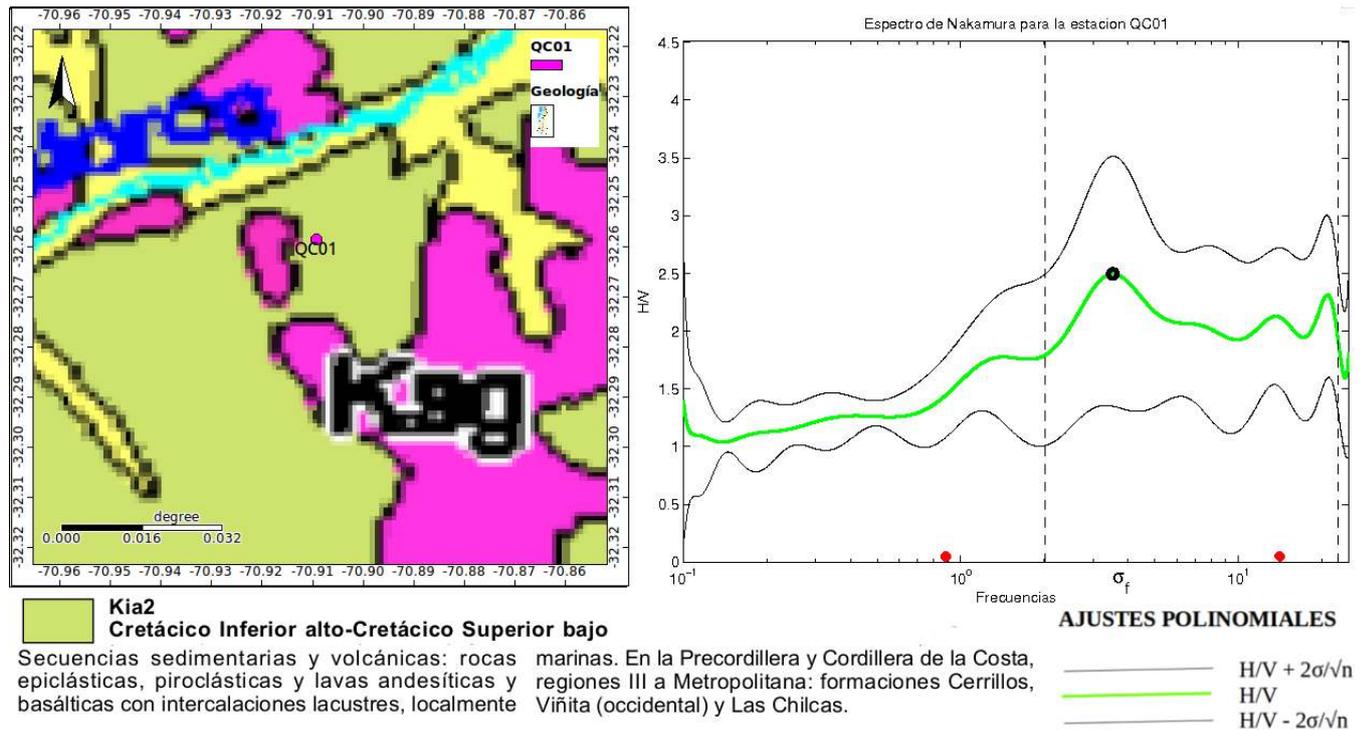


Figura C.47: A la izquierda se ve a la estación QC01 sobre roca volcanosedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.

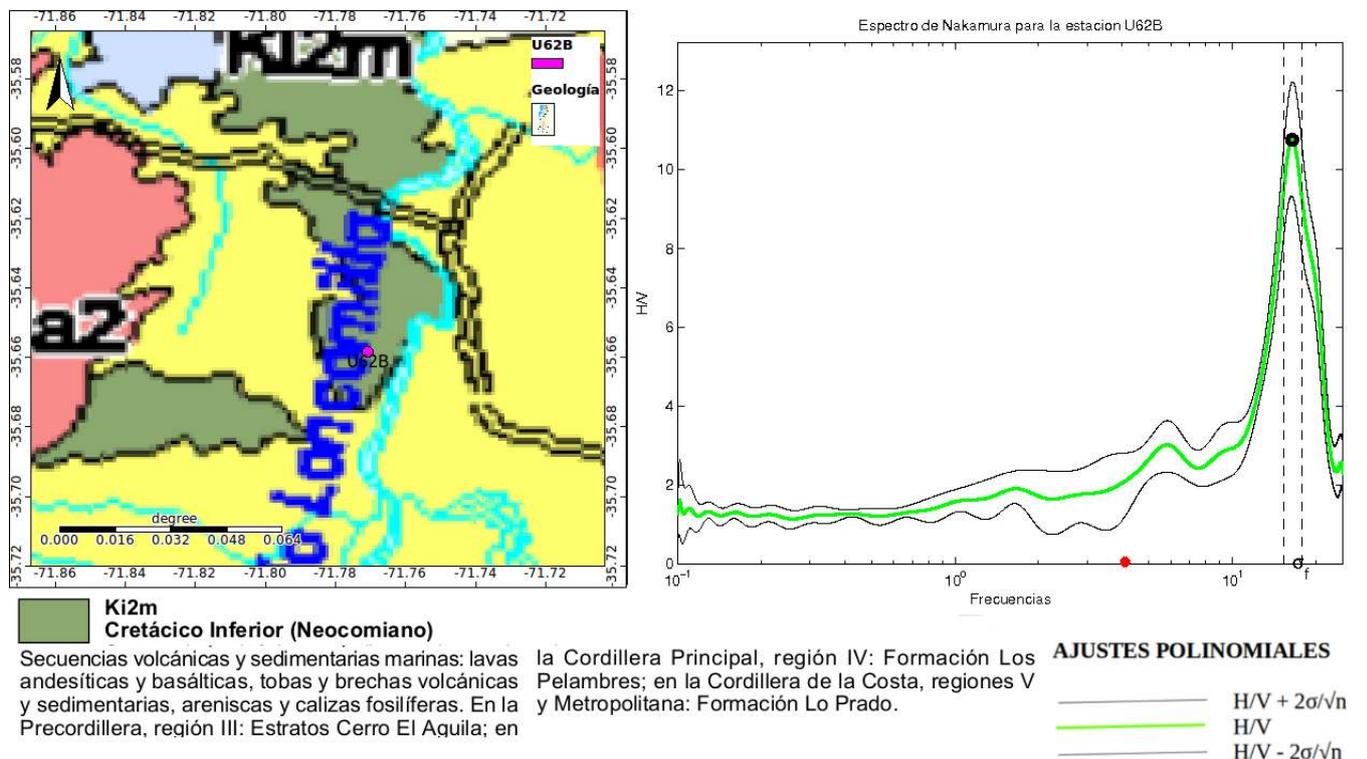


Figura C.48: A la izquierda se ve a la estación U62B sobre roca volcanosedimentaria, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 peak.

A continuación podrán apreciar las imágenes correspondientes a las estaciones sobre roca intrusiva con 1 peak.

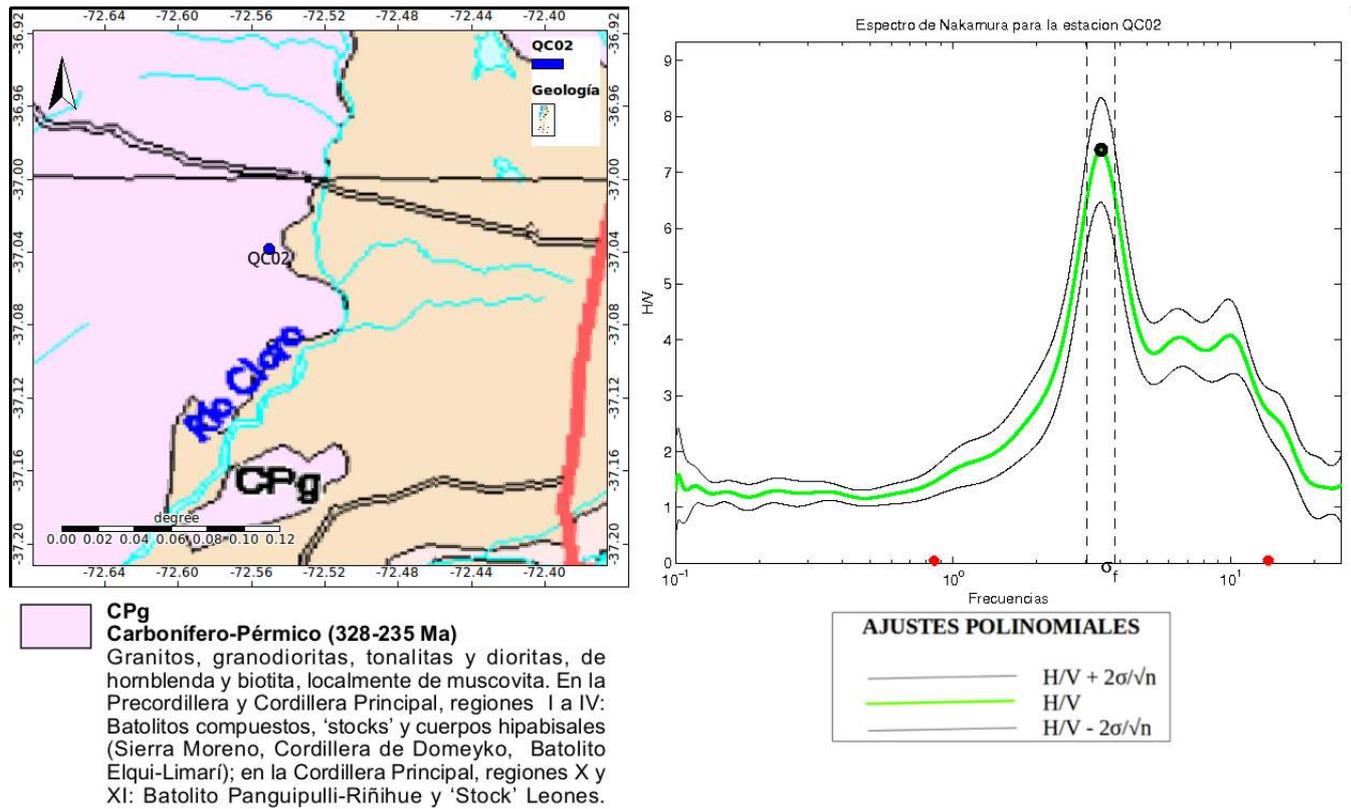


Figura C.49: A la izquierda se ve a la estación QC02 sobre roca intrusiva, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.

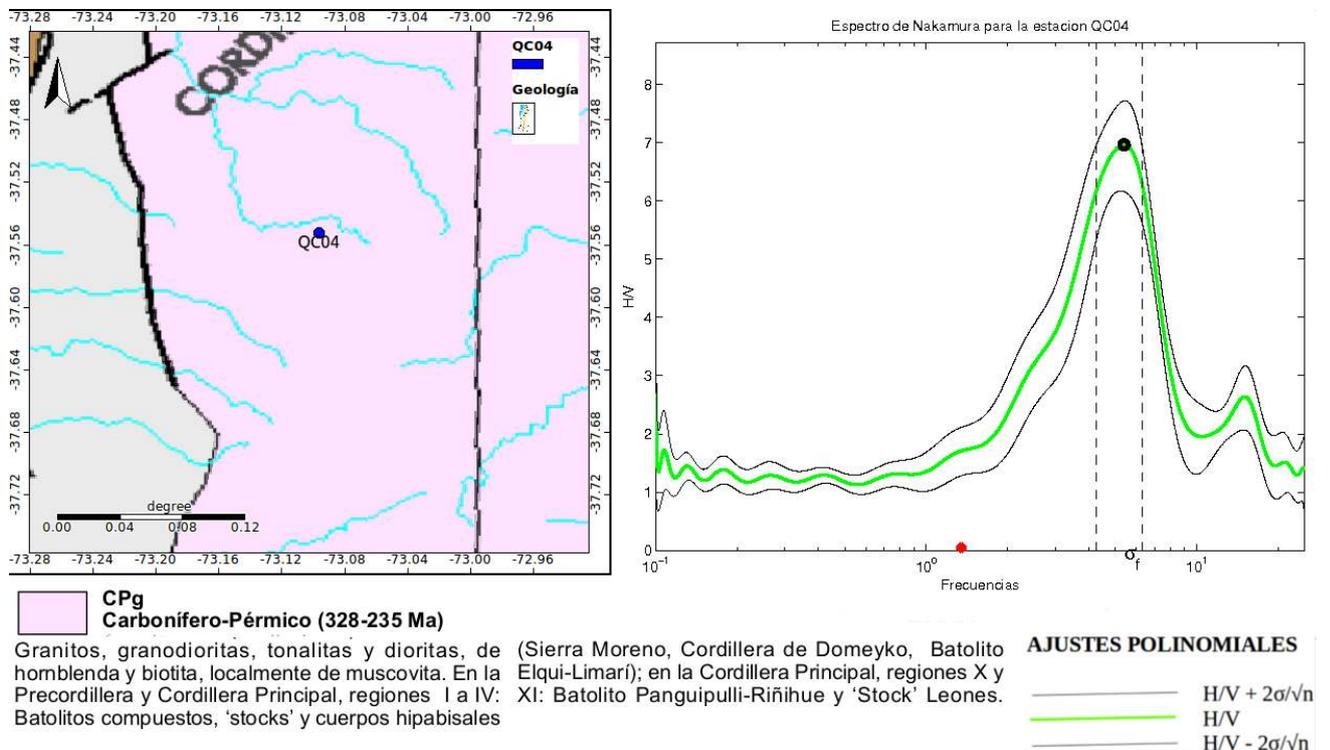


Figura C.50: A la izquierda se ve a la estación QC04 sobre roca intrusiva, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.

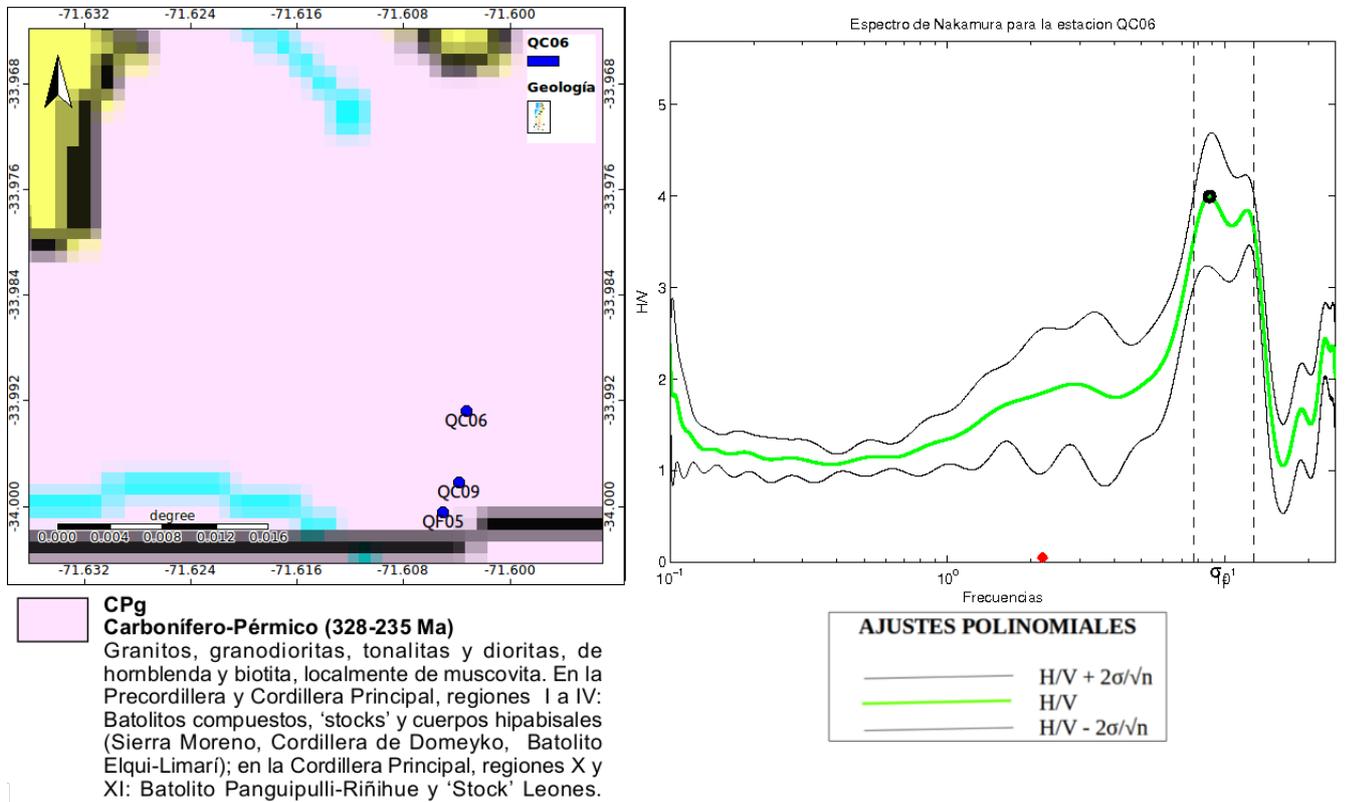


Figura C.51: A la izquierda se ve a la estación QC06 sobre roca intrusiva, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.

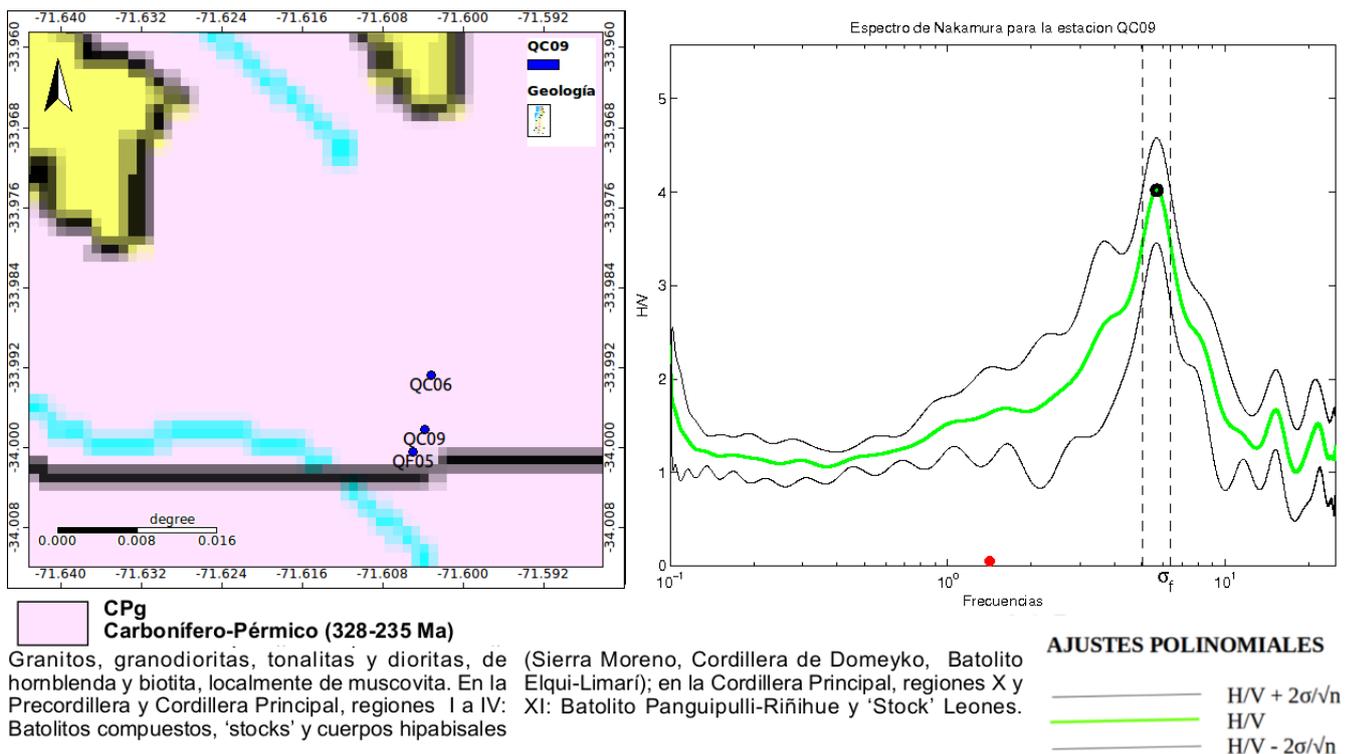


Figura C.52: A la izquierda se ve a la estación QC09 sobre roca intrusiva, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.

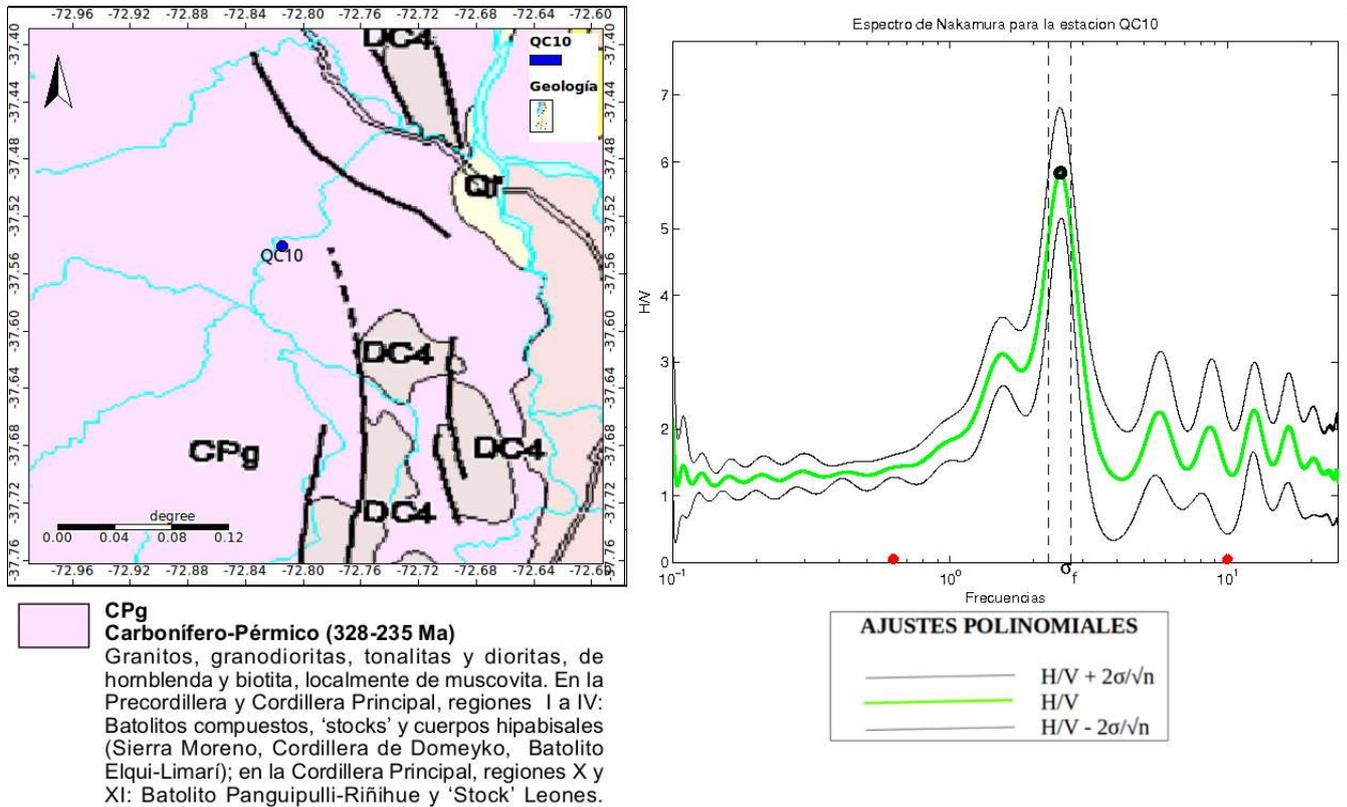


Figura C.53: A la izquierda se ve a la estación QC10 sobre roca intrusiva, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.

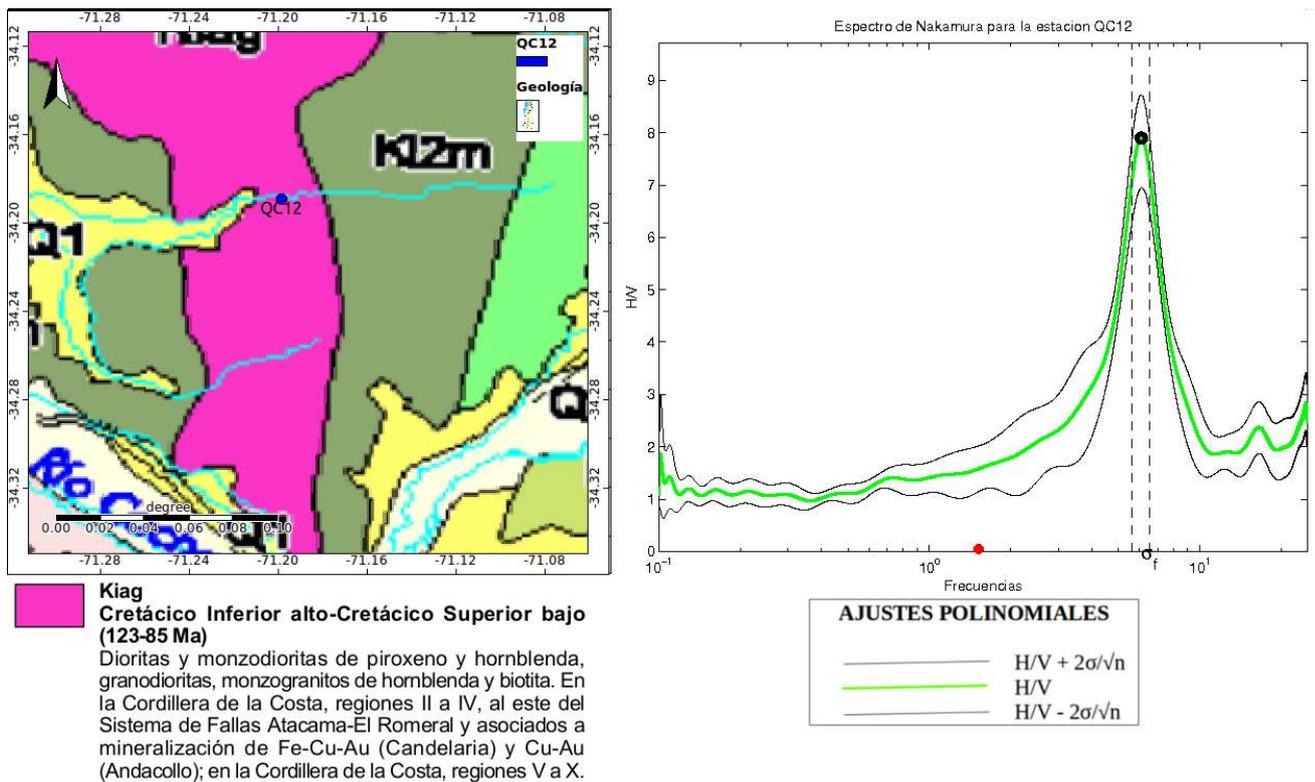


Figura C.54: A la izquierda se ve a la estación QC12 sobre roca intrusiva, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.

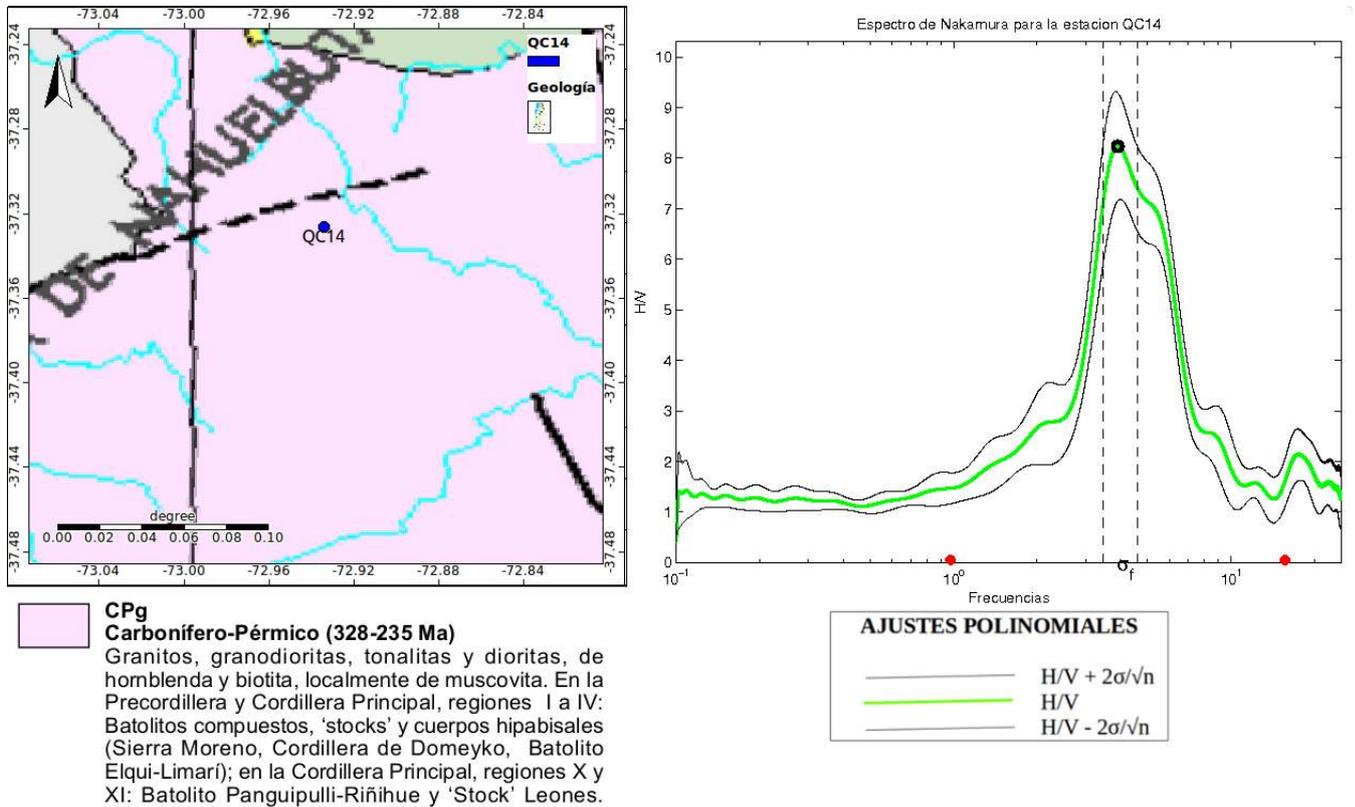


Figura C.55: A la izquierda se ve a la estación QC14 sobre roca intrusiva, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.

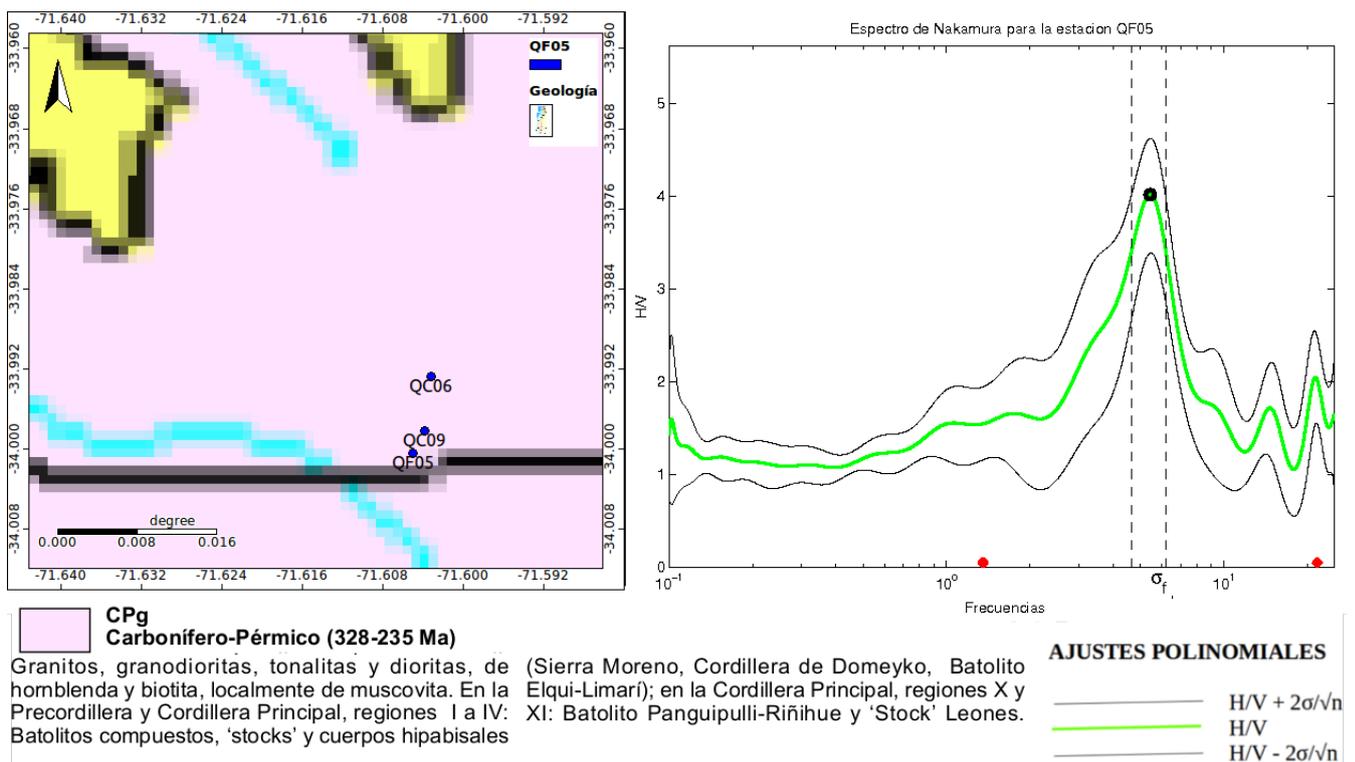


Figura C.56: A la izquierda se ve a la estación QF05 sobre roca intrusiva, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.

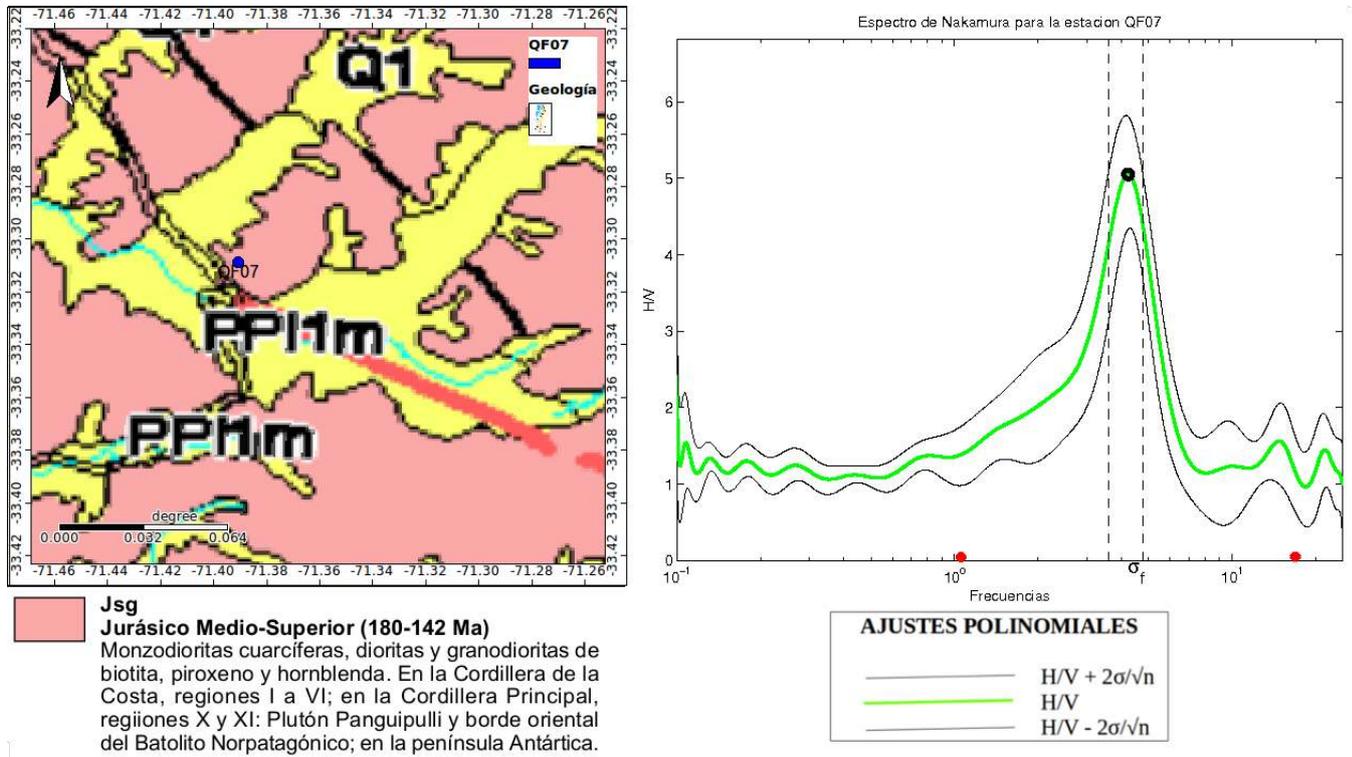


Figura C.57: A la izquierda se ve a la estación QF07 sobre roca intrusiva, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.

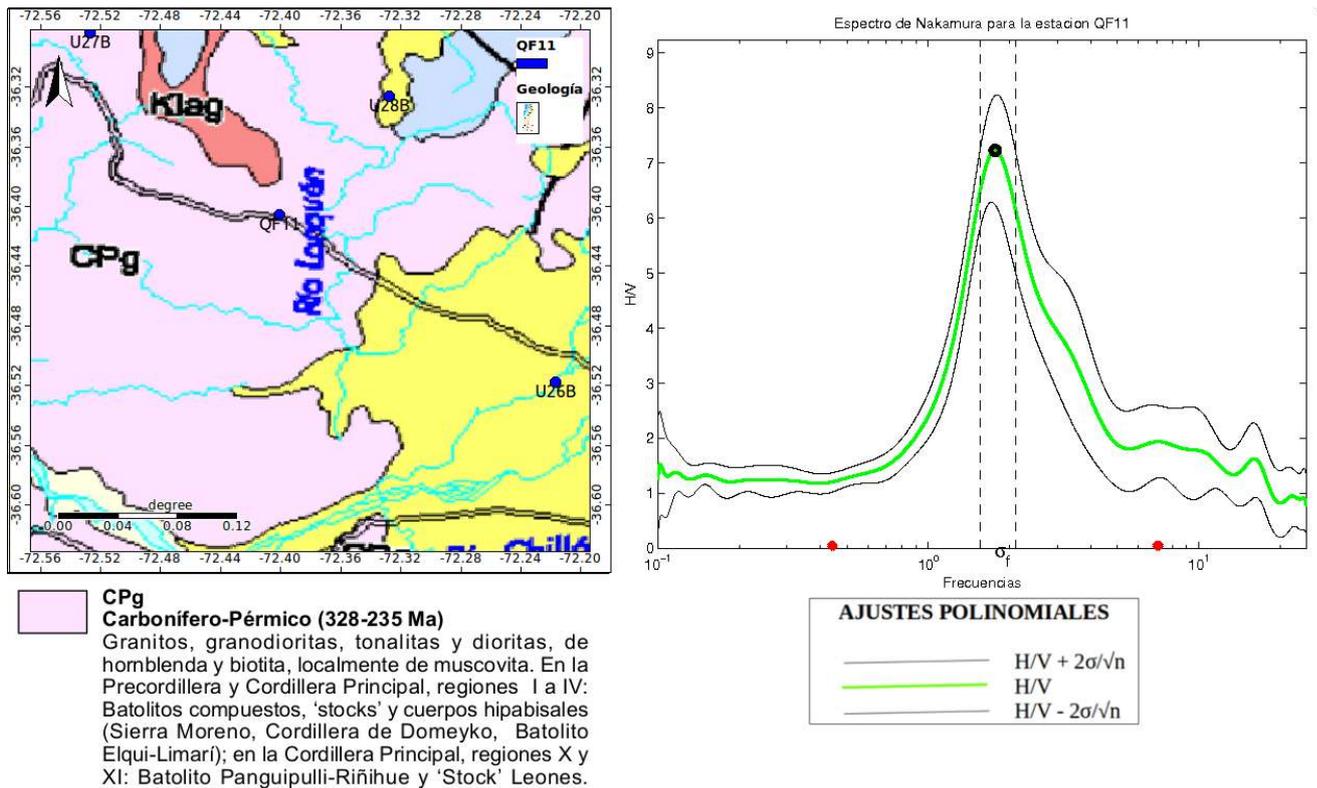


Figura C.58: A la izquierda se ve a la estación QF11 sobre roca intrusiva, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.

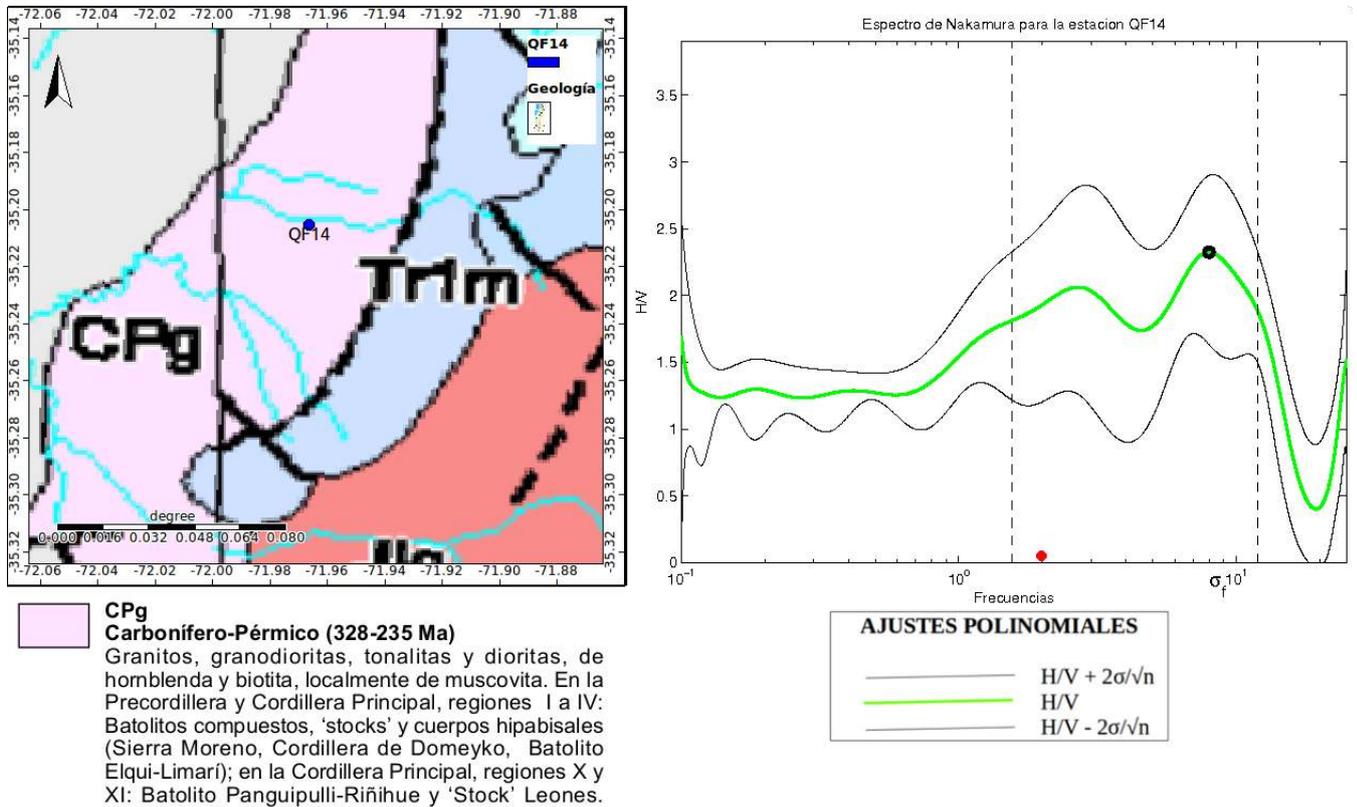


Figura C.59: A la izquierda se ve a la estación QF14 sobre roca intrusiva, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.

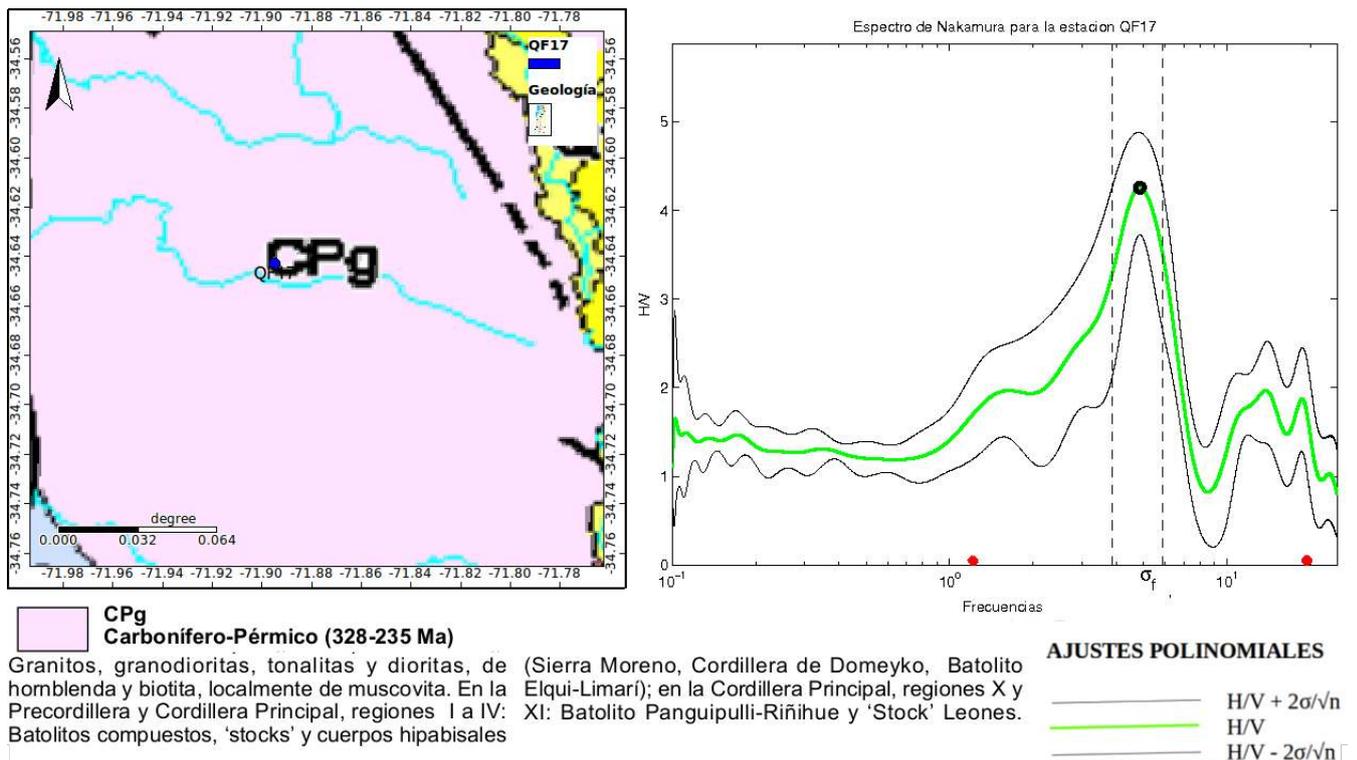


Figura C.60: A la izquierda se ve a la estación QF17 sobre roca intrusiva, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.

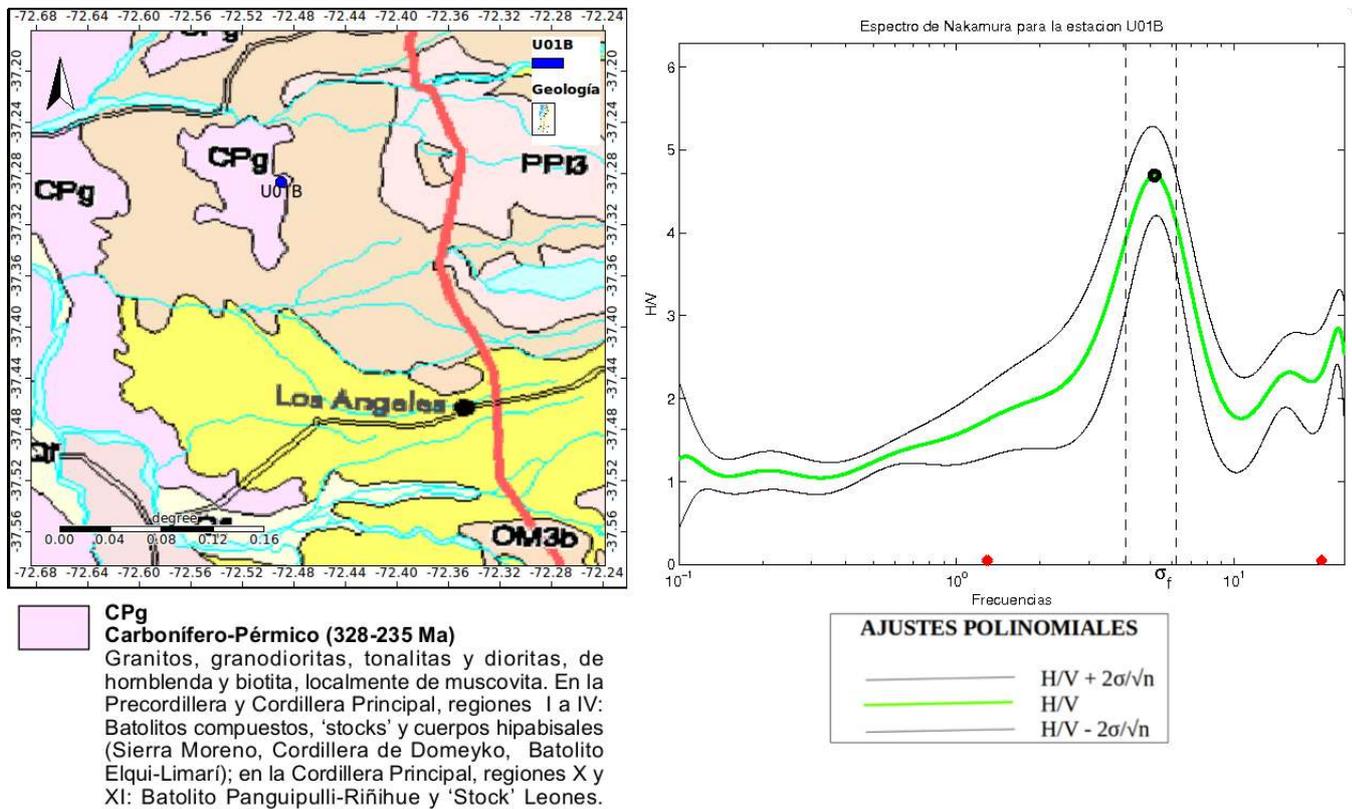


Figura C.61: A la izquierda se ve a la estación U01B sobre roca intrusiva, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.

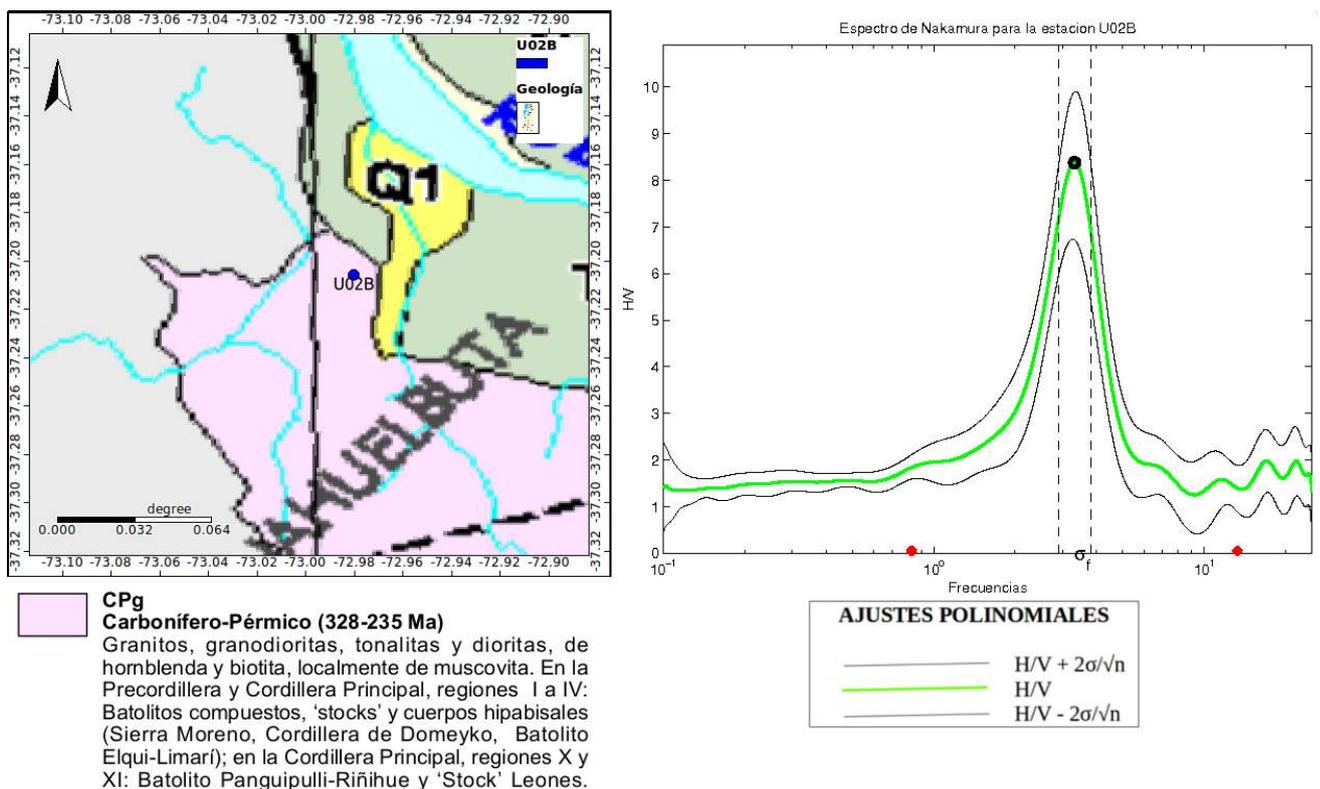


Figura C.62: A la izquierda se ve a la estación U02B sobre roca intrusiva, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.

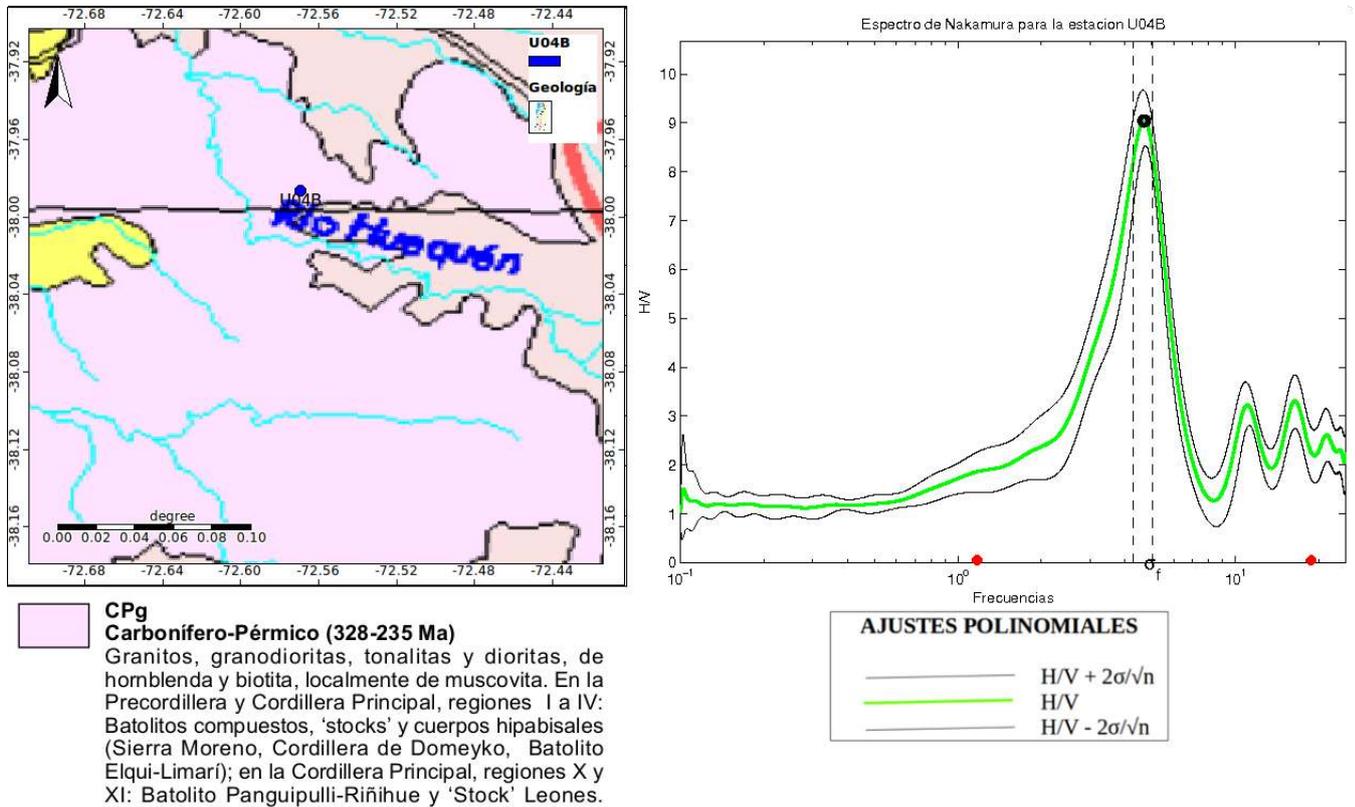


Figura C.63: A la izquierda se ve a la estación U04B sobre roca intrusiva, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.

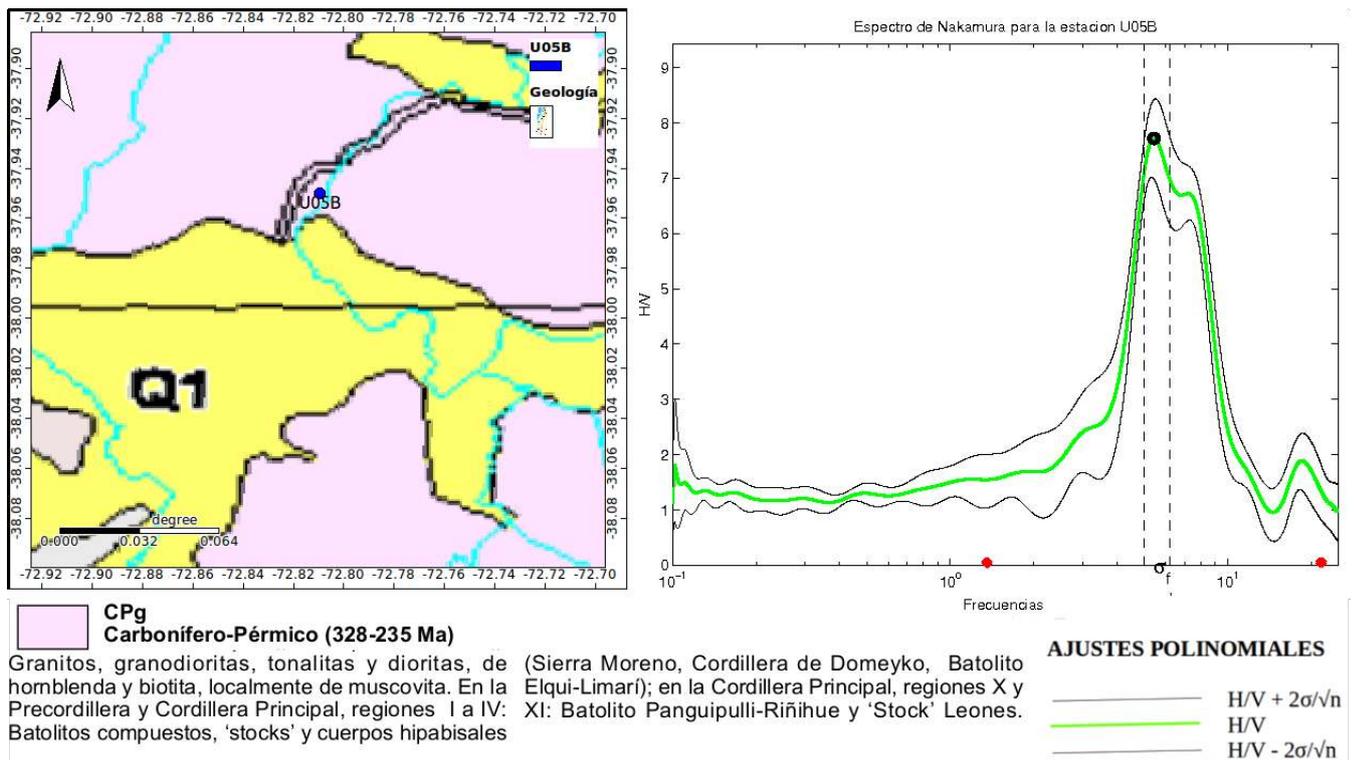


Figura C.64: A la izquierda se ve a la estación U05B sobre roca intrusiva, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.

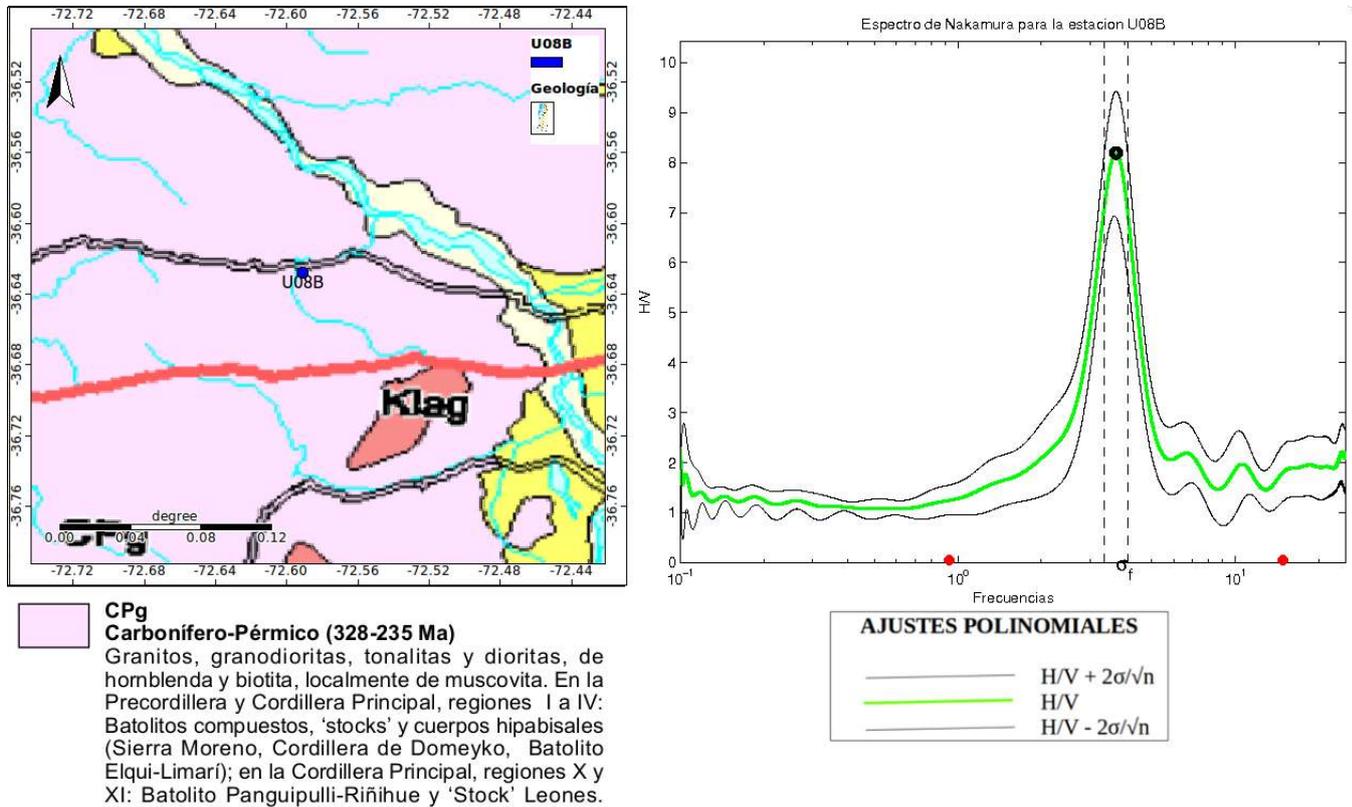


Figura C.65: A la izquierda se ve a la estación U08B sobre roca intrusiva, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.

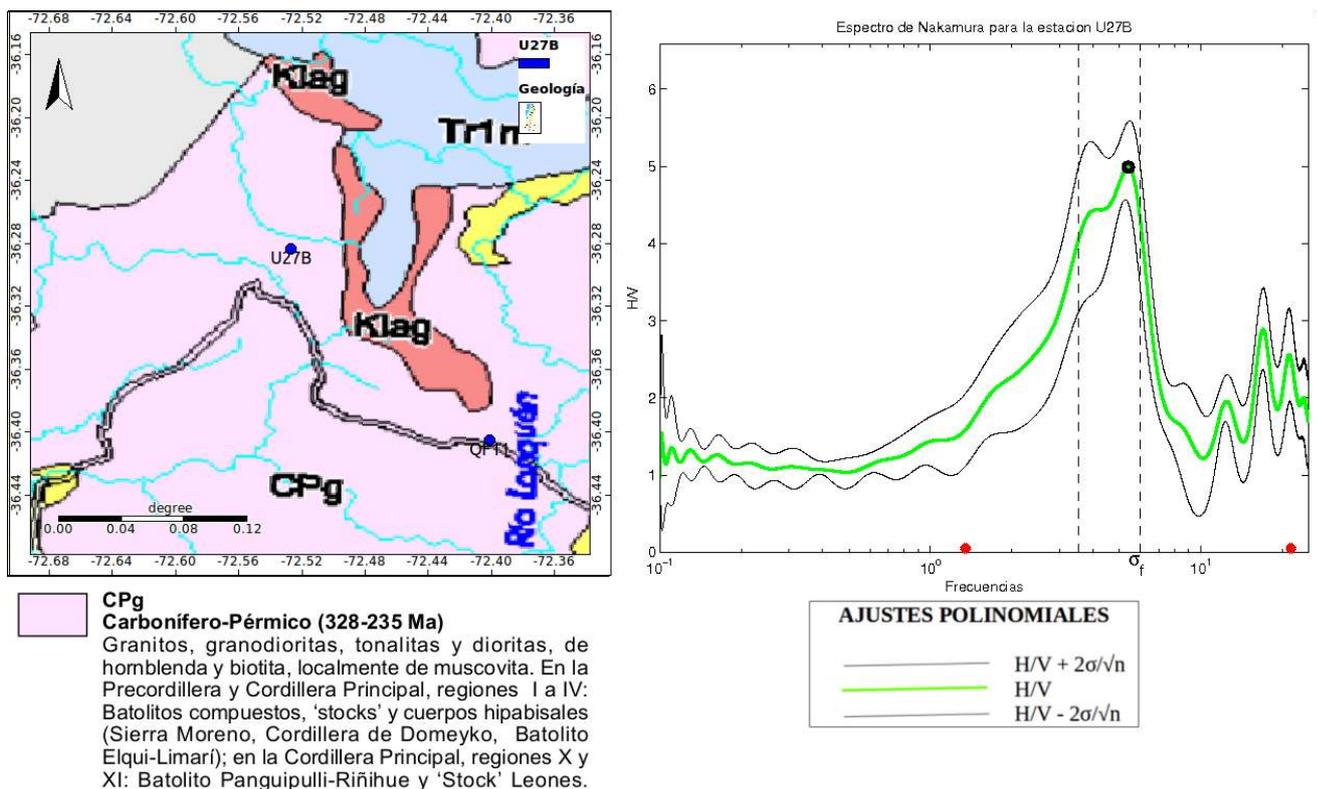


Figura C.66: A la izquierda se ve a la estación U27B sobre roca intrusiva, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.

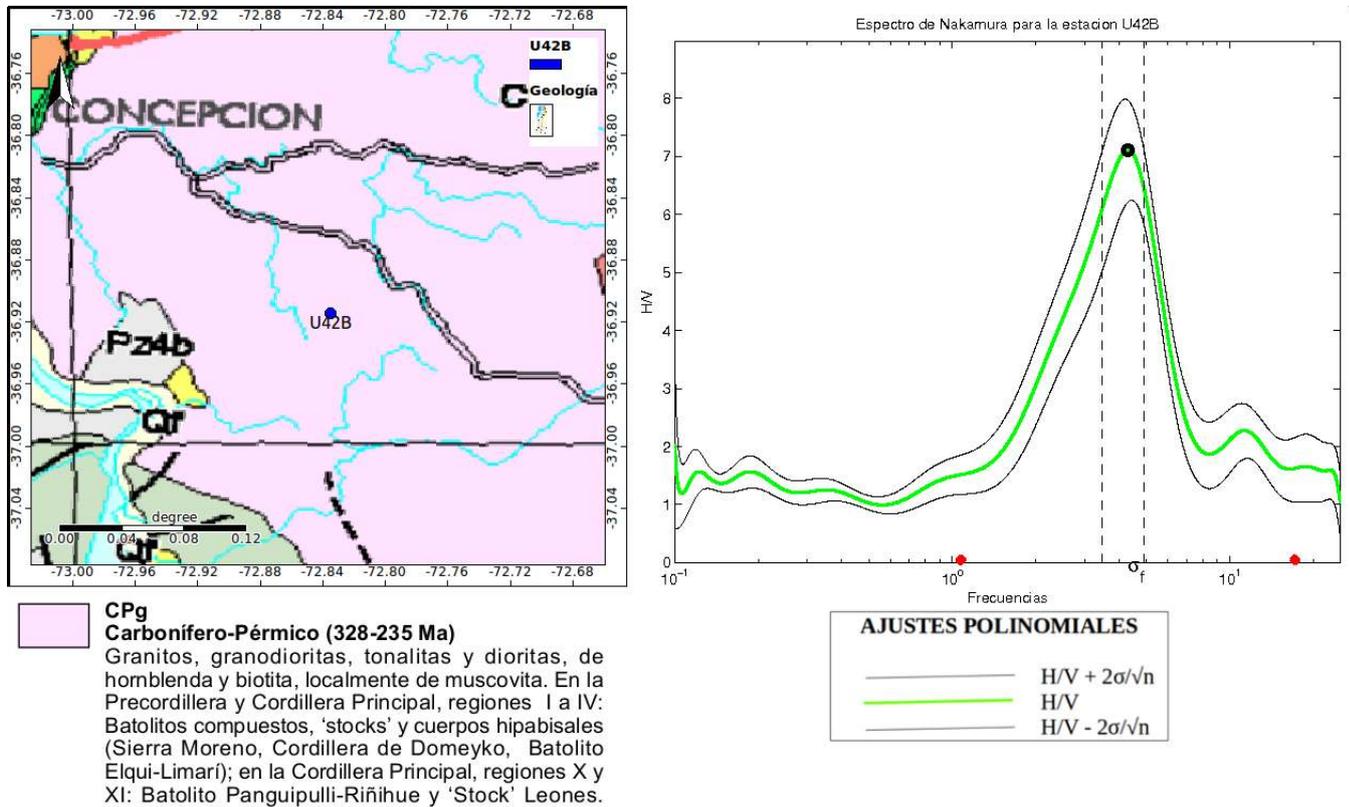


Figura C.69: A la izquierda se ve a la estación U42B sobre roca intrusiva, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.

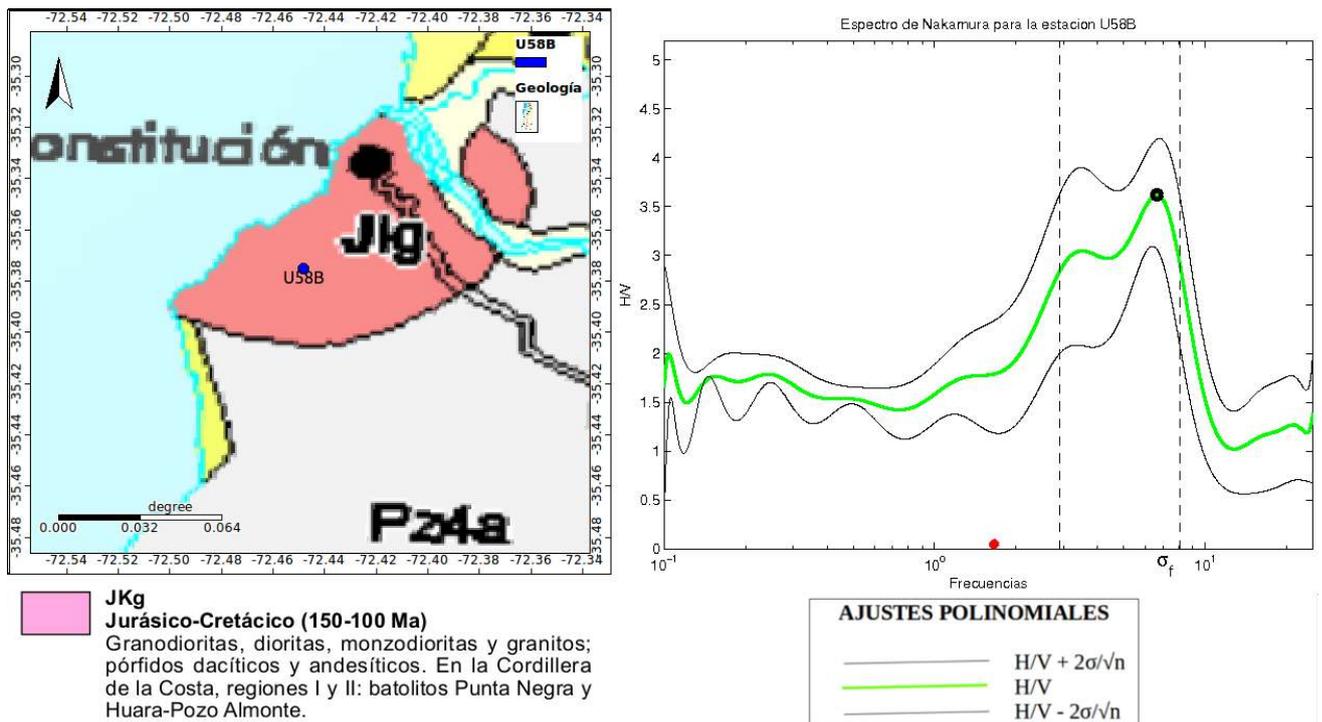


Figura C.70: A la izquierda se ve a la estación U58B sobre roca intrusiva, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.

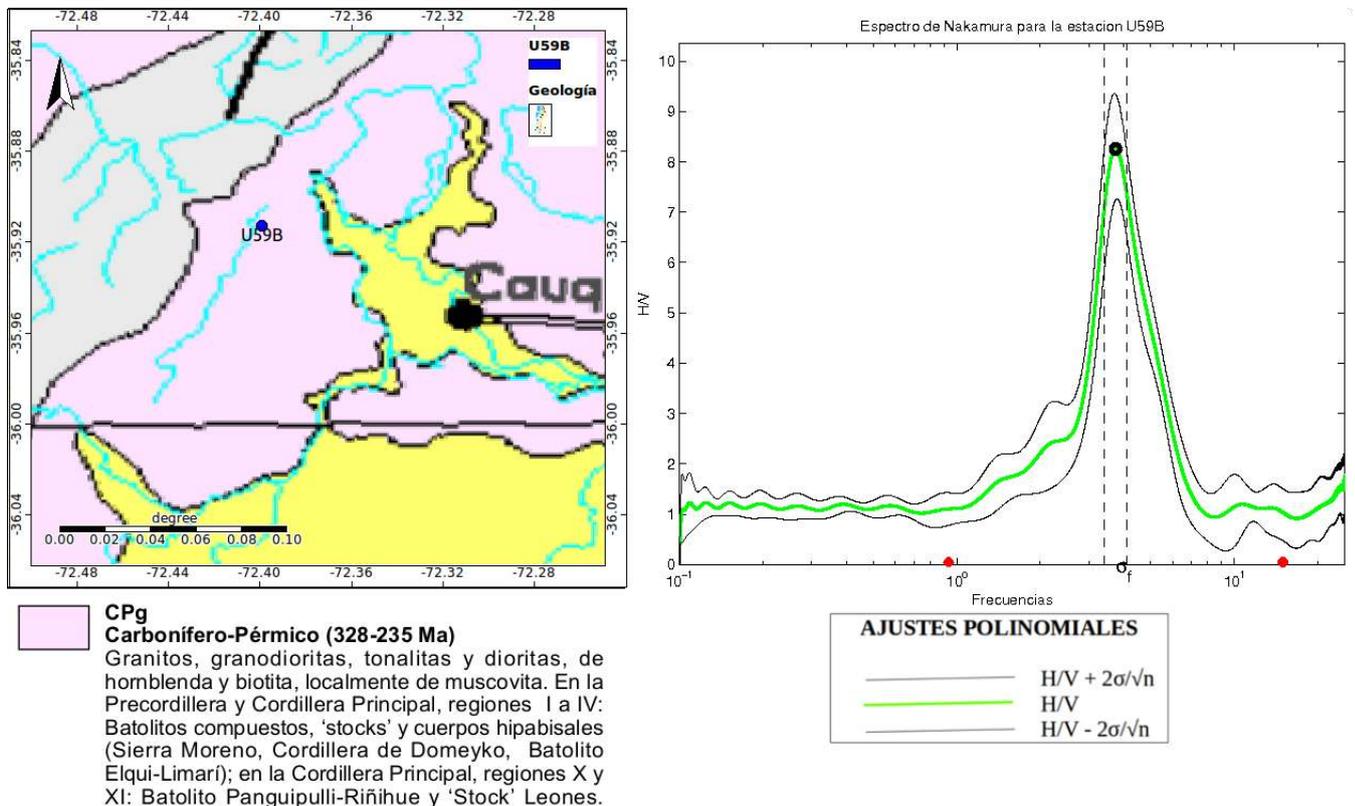


Figura C.71: A la izquierda se ve a la estación U59B sobre roca intrusiva, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.

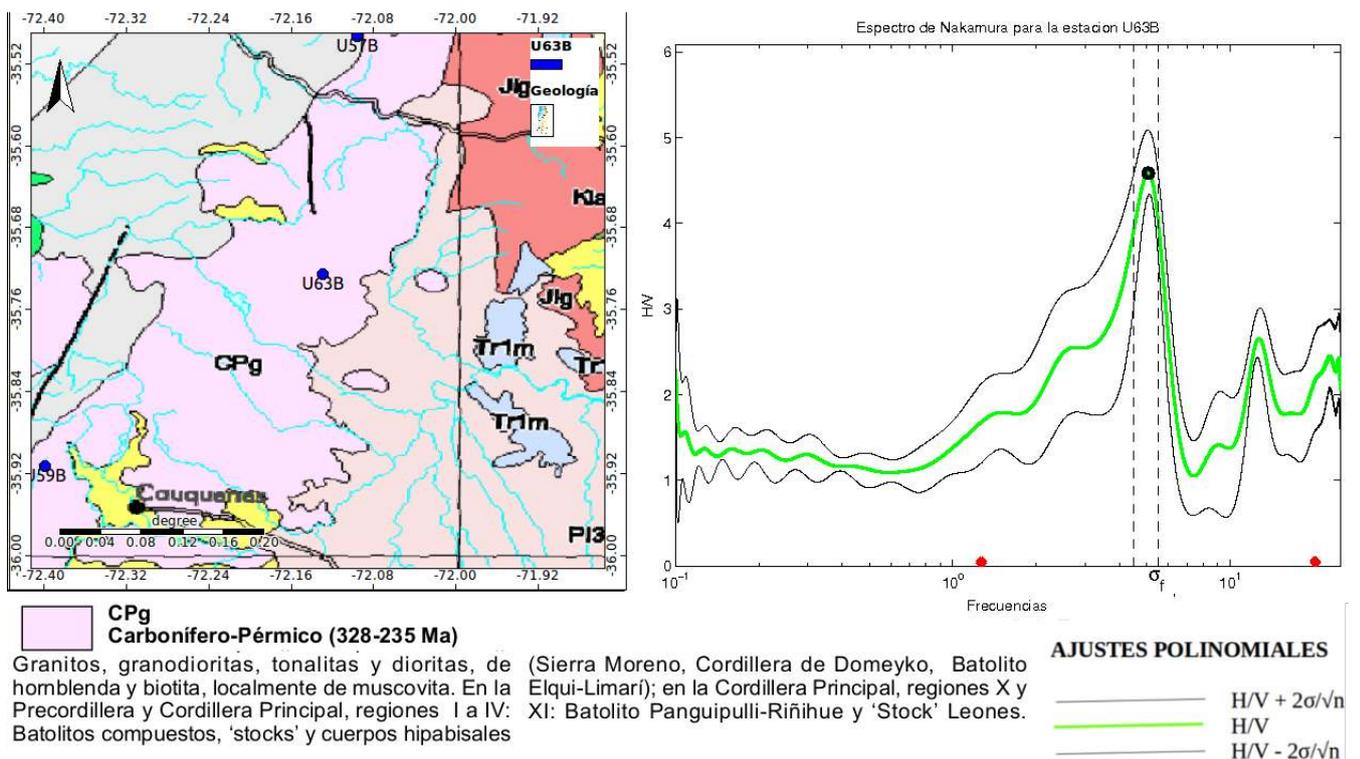


Figura C.72: A la izquierda se ve a la estación U63B sobre roca intrusiva, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.

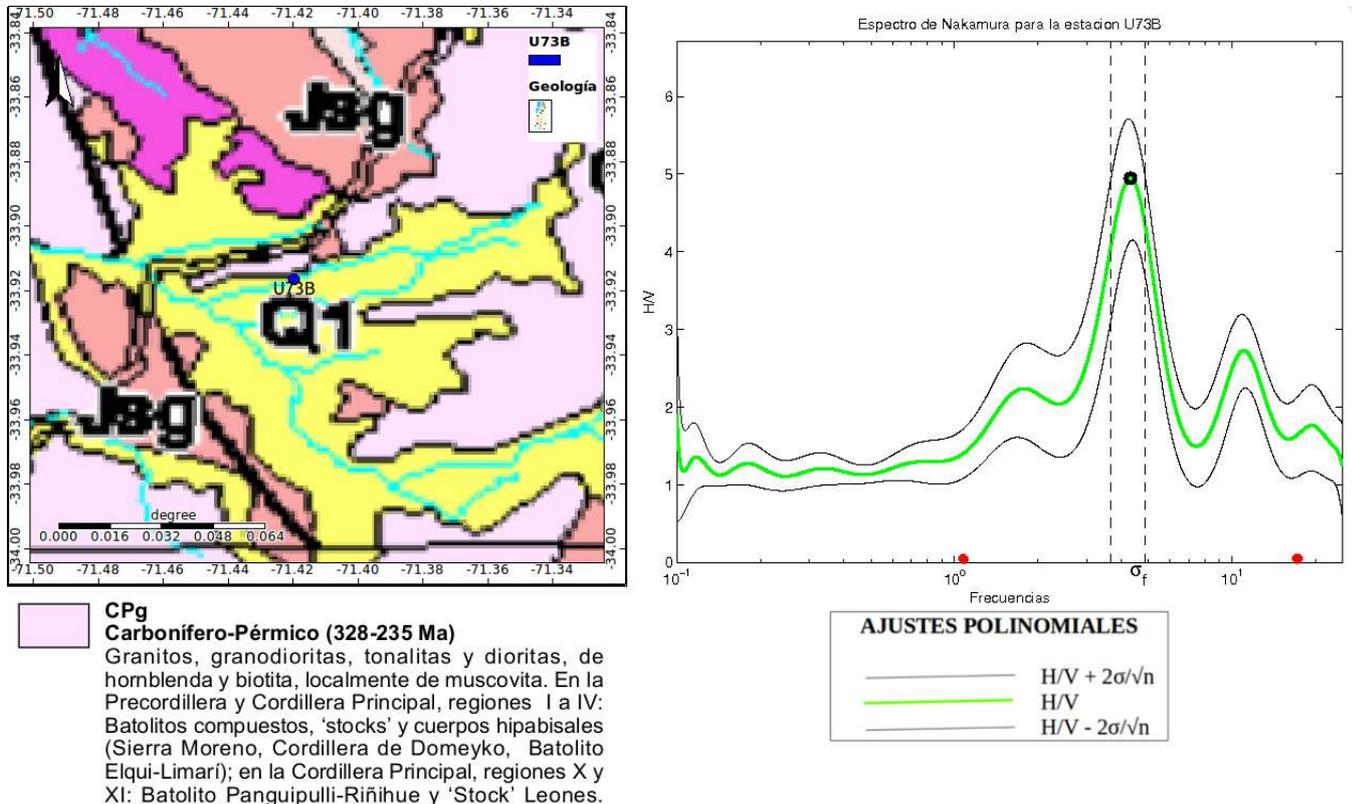


Figura C.73: A la izquierda se ve a la estación U73B sobre roca intrusiva, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.

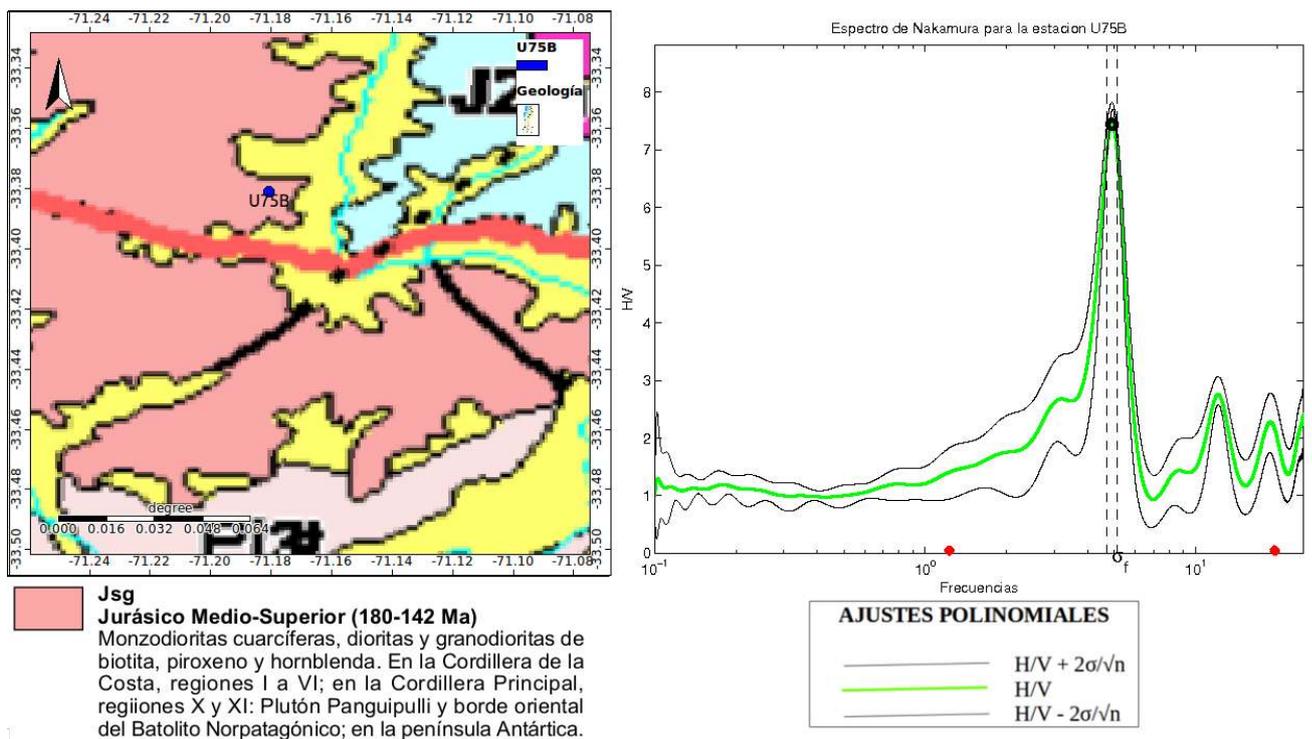


Figura C.74: A la izquierda se ve a la estación U75B sobre roca intrusiva, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.

A continuación podrán apreciar las imágenes correspondientes a las estaciones sobre roca metamórfica con 1 peak.

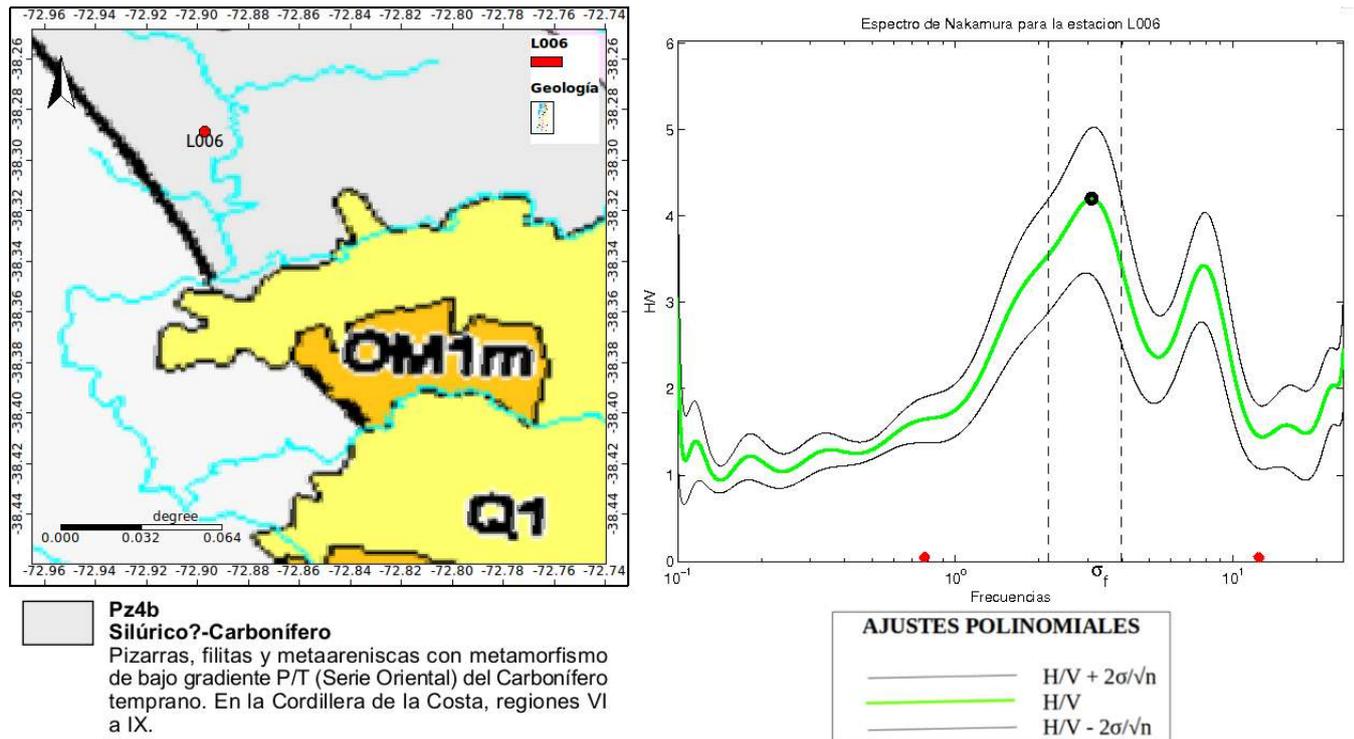


Figura C.75: A la izquierda se ve a la estación L006 sobre roca metamórfica, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.

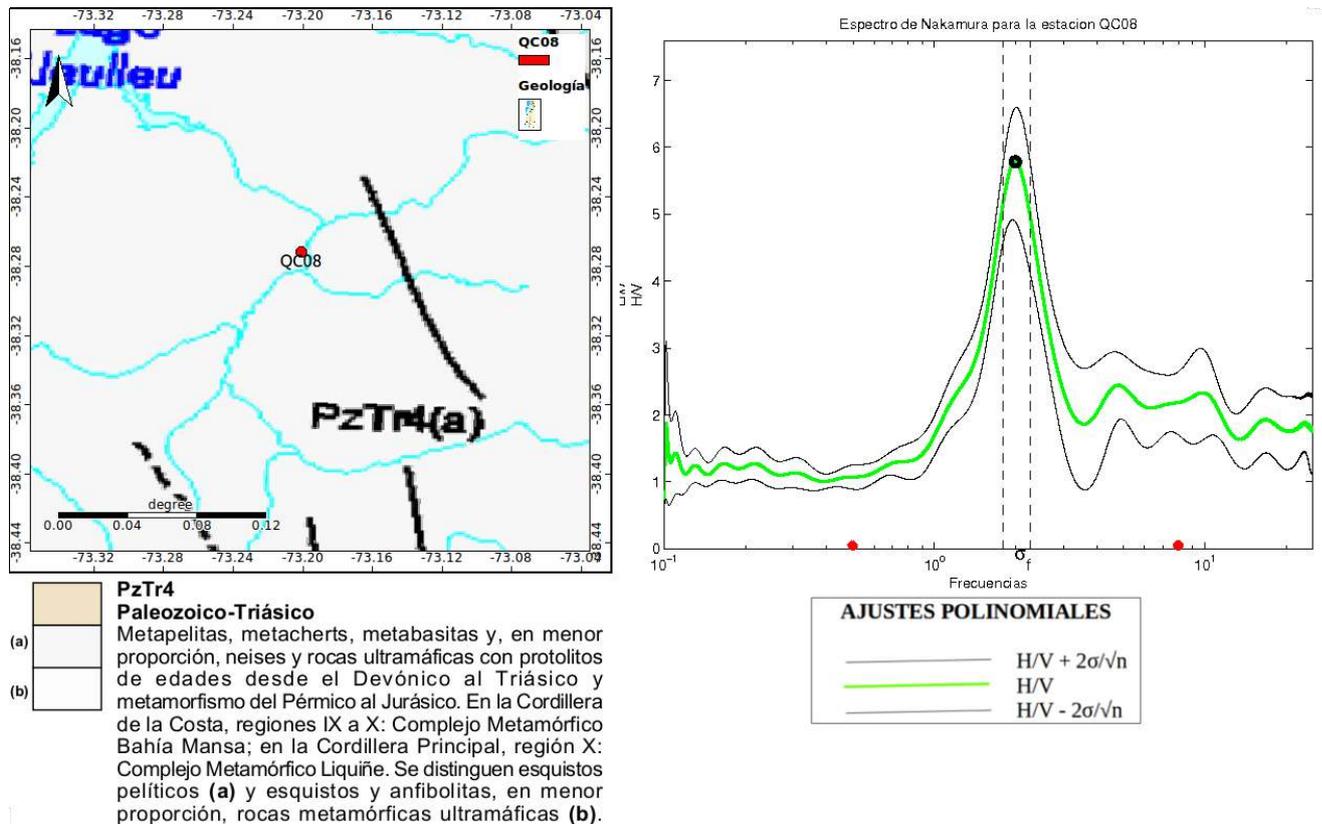


Figura C.76: A la izquierda se ve a la estación QC08 sobre roca metamórfica, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.

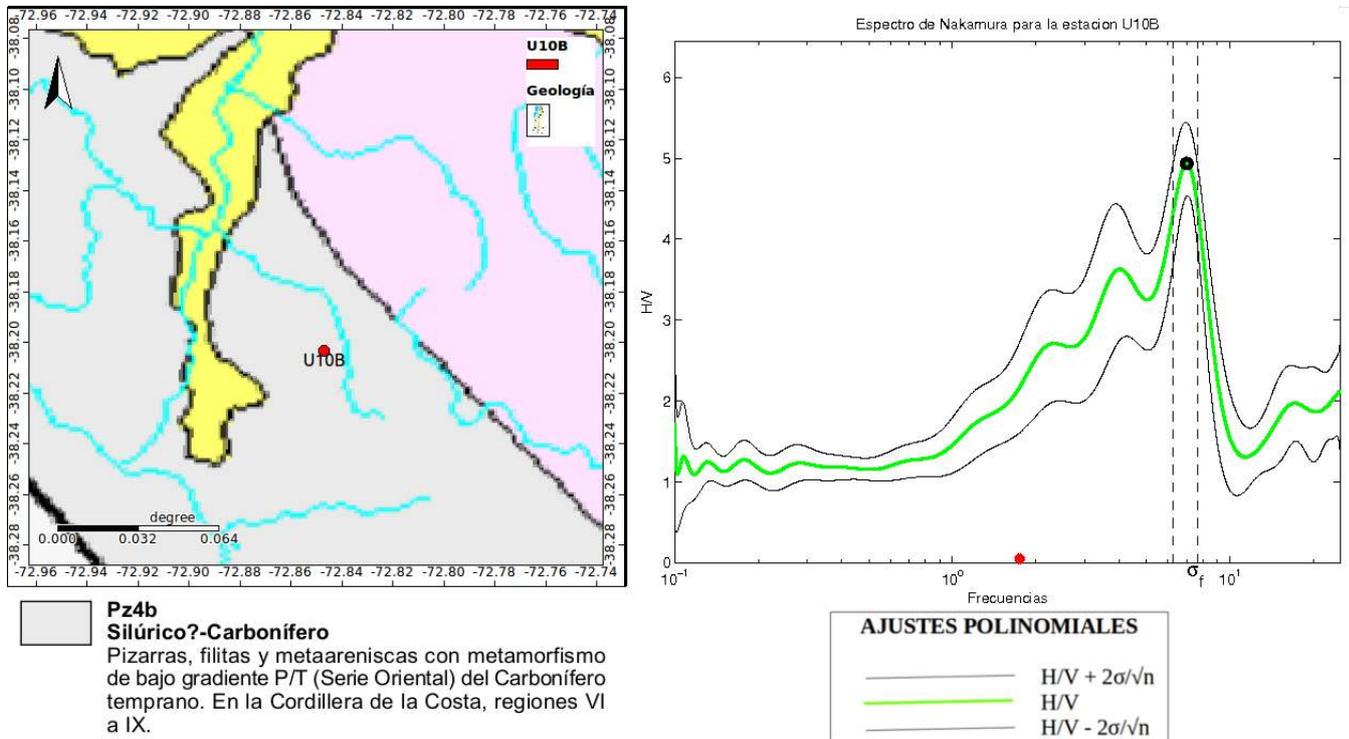


Figura C.77: A la izquierda se ve a la estación U10B sobre roca metamórfica, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.

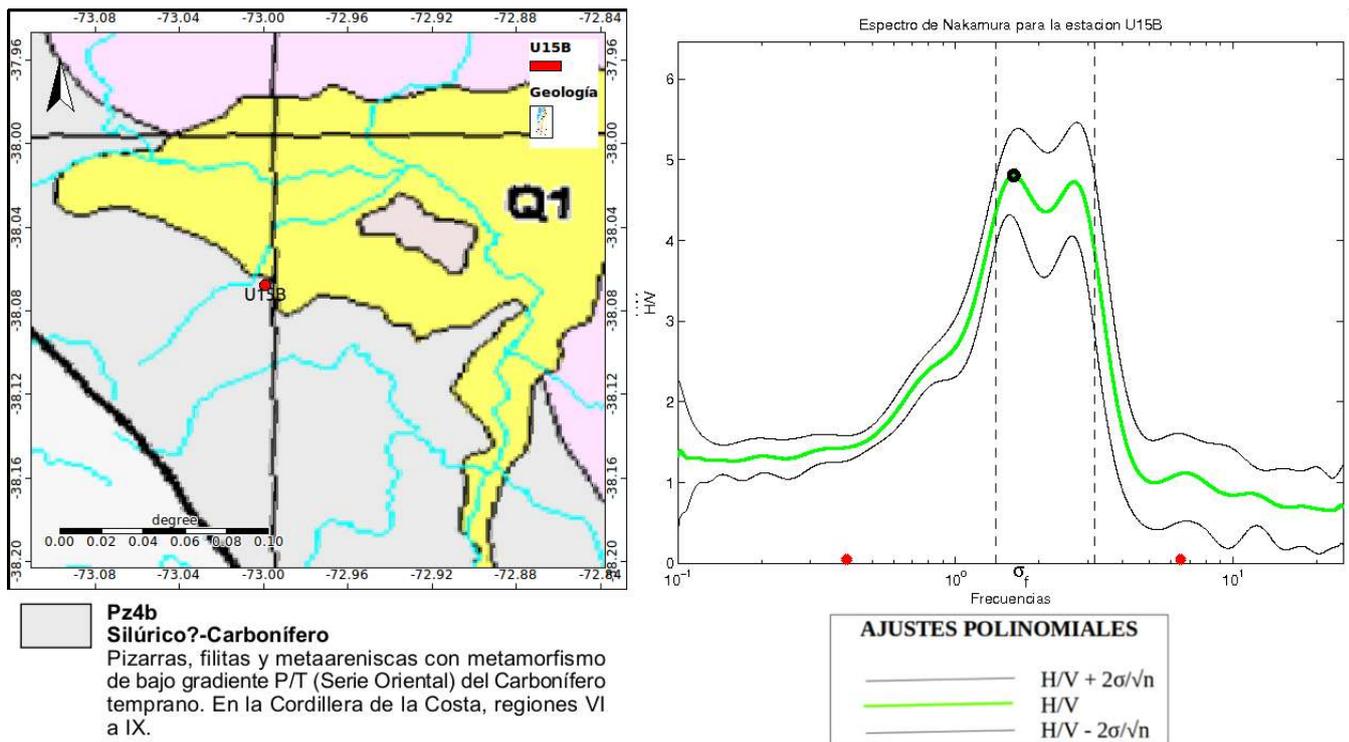


Figura C.78: A la izquierda se ve a la estación U15B sobre roca metamórfica, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.

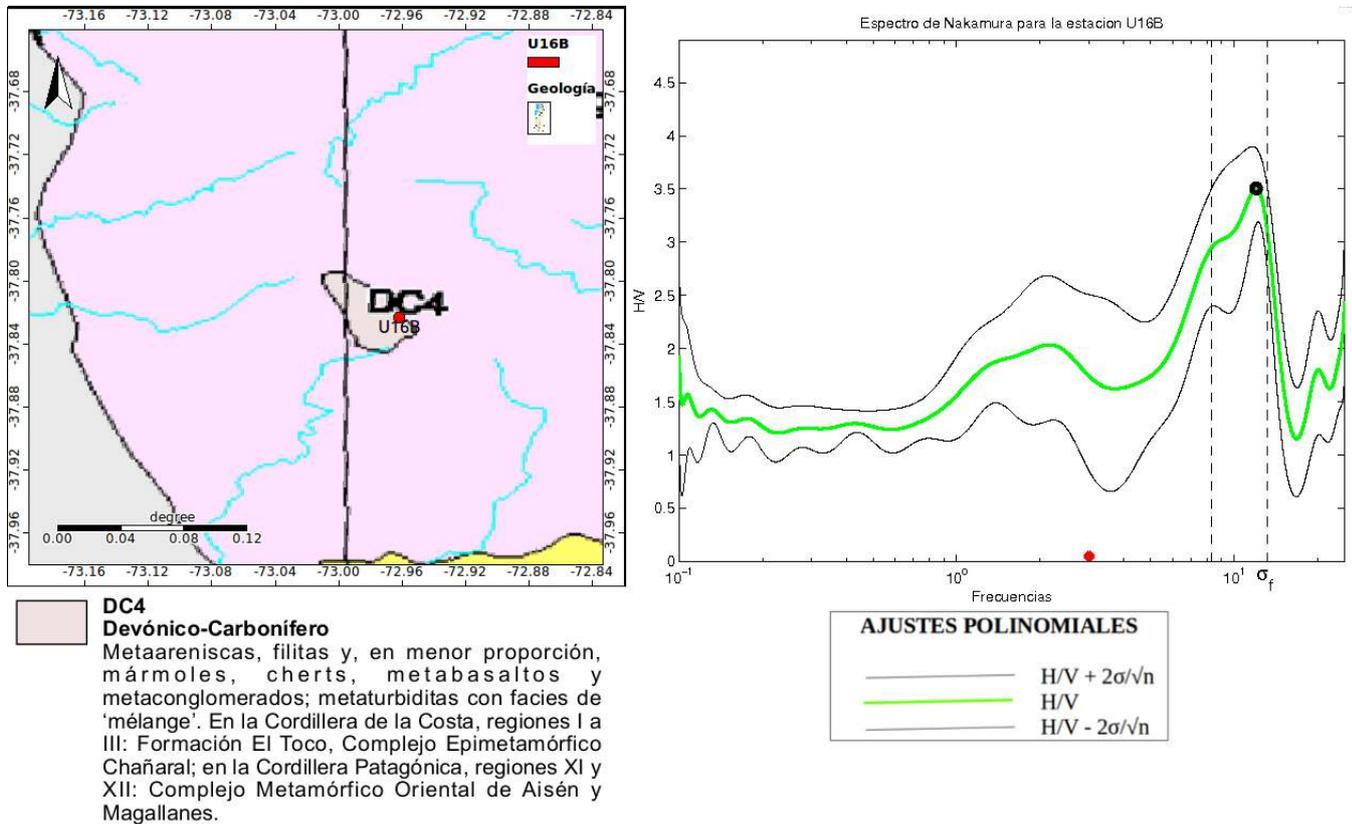


Figura C.79: A la izquierda se ve a la estación U16B sobre roca metamórfica, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.

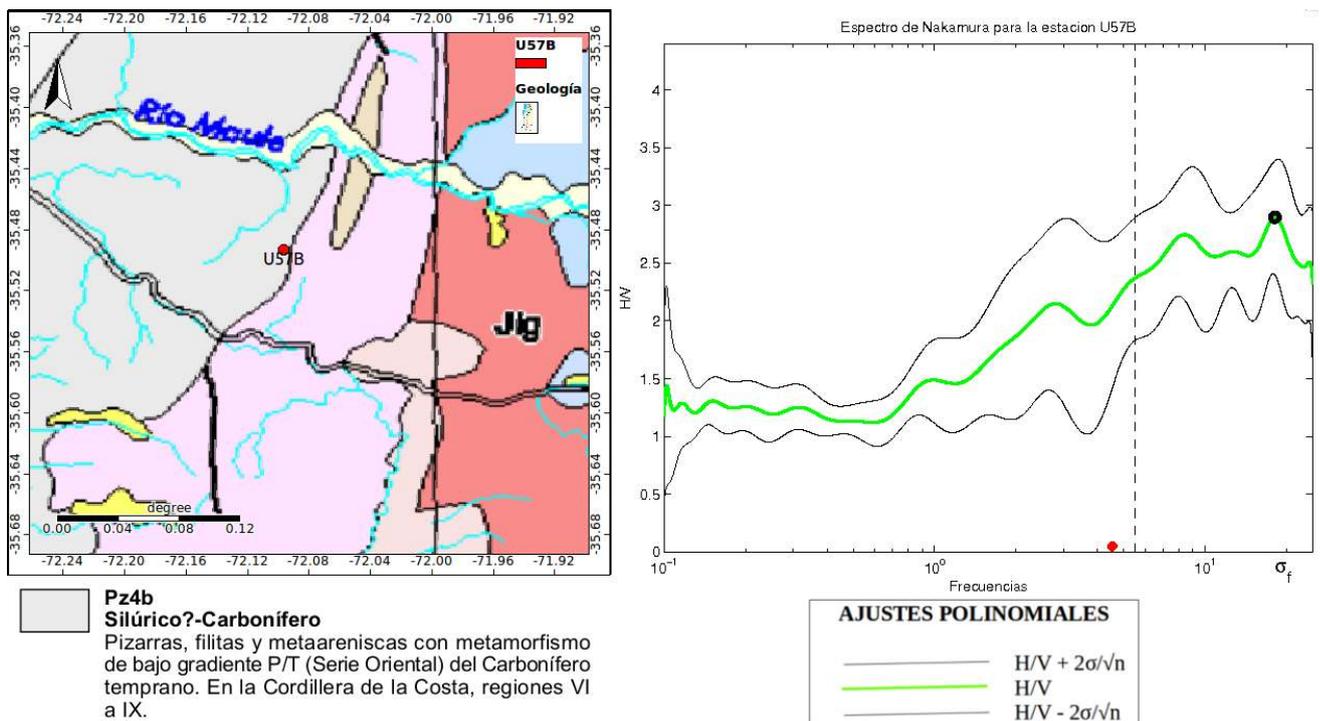


Figura C.80: A la izquierda se ve a la estación U57B sobre roca metamórfica, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.

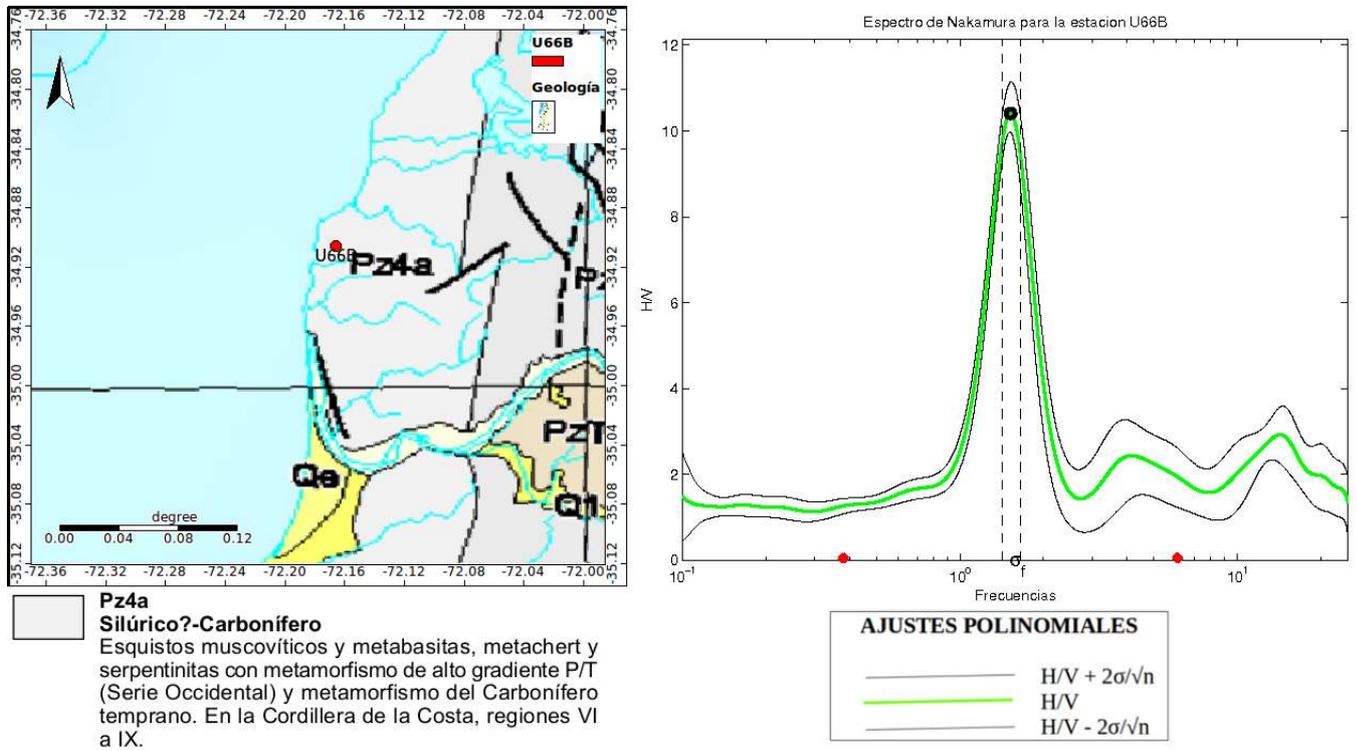


Figura C.81: A la izquierda se ve a la estación U66B sobre roca metamórfica, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.

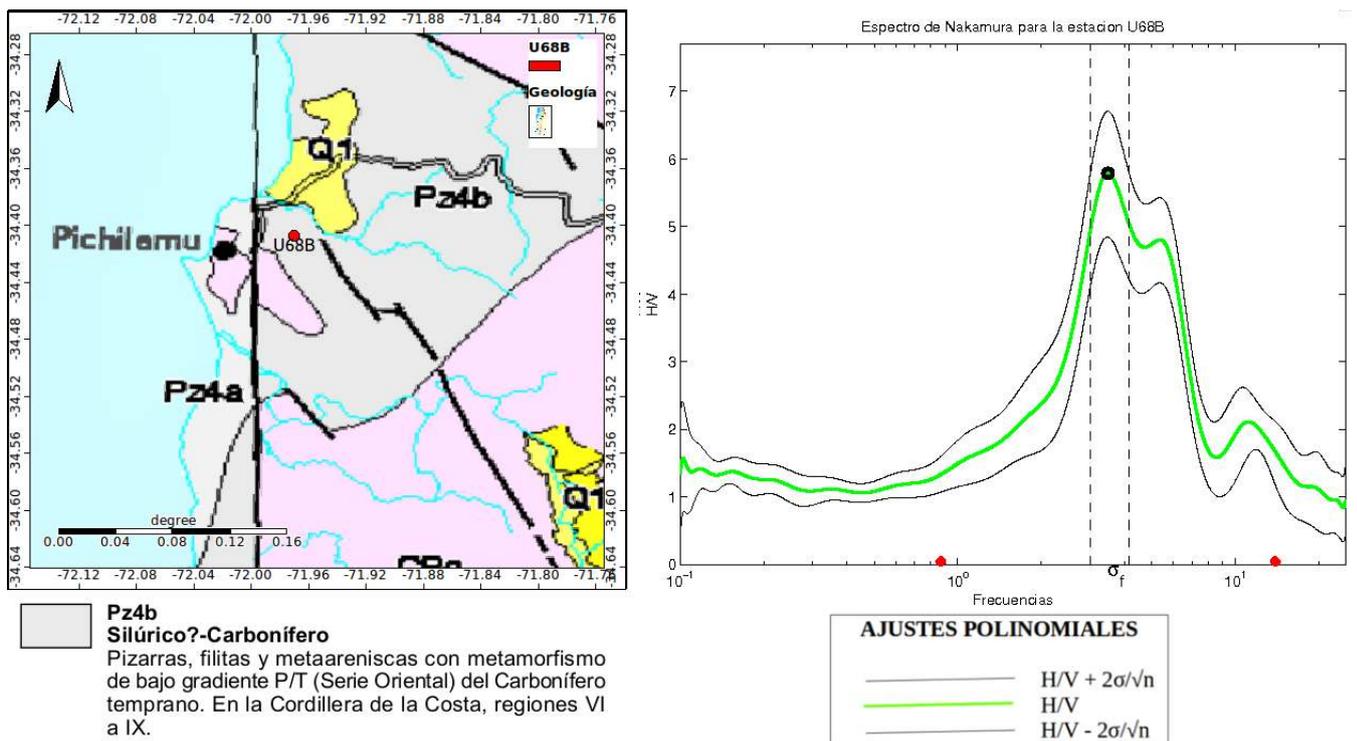


Figura C.82: A la izquierda se ve a la estación U68B sobre roca metamórfica, a la derecha la curva H/V asociada a dicha estación muestra 1 solo peak.