



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

VALIDEZ DE MODELOS DE MOVIMIENTO FUERTE PARA CHILE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

ENZO EDUARDO MAGAÑA REYES

PROFESOR GUÍA:
RUBEN BOROSCHEK KRAUSKOPF

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
FABIÁN ROJAS BARRALES
IVÁN LÓPEZ JARA

SANTIAGO DE CHILE
2022

VALIDEZ DE MODELOS DE MOVIMIENTO FUERTE PARA CHILE

En este trabajo se ha realizado un estudio para estimar la confiabilidad de distintos modelos de movimiento fuerte aplicados al caso chileno. Se han considerado modelos desarrollados a partir de una base de datos local, como los de Montalva et al. (2017)^[1] y Contreras Boroschek (2012)^[2], y también se han considerado modelos desarrollados a partir de una base de datos global como los de Abrahamson et al. (2016)^[3] y Zhao et al. (2016)^[4].

En primera instancia se ha recopilado una base de datos desde el Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER)^[5] y desde el Centro Sismológico Nacional (CSN)^[6], con un total de 786 eventos locales registrados desde 1985 hasta diciembre del 2020. De estos eventos, 427 son del tipo interplaca y 359 son del tipo intraplaca. La base de datos considera también un total de 338 estaciones con Vs30 registrado, de forma tal que esta configuración permite contar con un total de 4646 registros de aceleraciones a partir de los cuales se ha determinado la aceleración máxima del suelo (PGA) y los pseudo espectros de aceleración para la media geométrica de las componentes horizontales con un amortiguamiento crítico del 5 %.

La comparación entre lo observado y las predicciones de los modelos de movimiento fuerte se ha realizado mediante un análisis residual y en función de los parámetros likelihood (LH)^[7] y log-likelihood (LLH)^[8], con la finalidad de poder cuantificar la capacidad predictiva de los modelos. Los parámetros comparados han sido aceleración máxima del suelo y los pseudo espectros de aceleración. Esta comparación sigue un orden incremental, es decir, primero se comparan las predicciones de los modelos contra toda la base de datos sin segmentar y luego se distingue según tipo de evento, interplaca o intraplaca, según 8 Zonas Sismogénicas, Tipo de Suelo de acuerdo al Decreto Supremo DS61 y por último Zona Sísmica de acuerdo a la Norma NCh 433.

Los resultados para la distribución del residuo total normalizado y los parámetros LH y LLH se presentan en gráficos y además en tablas de resumen para comparar en cada período estructural y entre los distintos modelos. Estos resultados muestran tanto para el caso general como para los casos en que se ha segmentado la base de datos, que los modelos desarrollados a partir de una base de datos local y principalmente el modelo de Montalva et al. (2017)^[1], presentan un mejor ajuste y una mayor capacidad predictiva. Sin embargo, este modelo puede ser no conservador, subestimando PGA y los pseudo espectros de aceleración en los períodos menores a 1 segundo, por lo tanto, se recomienda complementar y ponderar sus estimaciones con los resultados que entregan otros modelos más conservadores como Contreras Boroschek (2012)^[2] o Zhao et al. (2016)^[4].

Tabla de Contenido

1. Introducción General	1
1.1. Introducción	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo General	2
1.2.2. Objetivos Específicos	2
1.3. Metodología	2
1.3.1. Desarrollar Base de Datos de Eventos Locales.	2
1.3.2. Incorporar Información y Completar Base de Datos	2
1.3.3. Filtrado de la Base de Datos	3
1.3.4. Programación los Modelos de Movimiento Fuerte	3
1.3.5. Realizar Análisis residual	3
1.3.6. Se concluye sobre la validez de los modelos	3
1.4. Alcances	4
1.4.1. Capítulo 1: Introducción General	4
1.4.2. Capítulo 2: Contexto Chileno y Modelos de Movimiento Fuerte	4
1.4.3. Capítulo 3: Base de Datos Utilizada	4
1.4.4. Capítulo 4: Análisis Residual	4
1.4.5. Capítulo 5: Resultados	4
1.4.6. Capítulo 6: Conclusiones	4
2. Contexto Chileno y Modelos de Movimiento Fuerte	5
2.1. Contexto Sismológico Chileno	5
2.2. Modelos de Movimiento Fuerte GMM	8
2.2.1. Montalva et al. (2017)	9
2.2.2. Abrahamson et al. (2016) & BC Hydro (2012)	10
2.2.3. Contreras Boroschek (2012)	11
2.2.4. Zhao et al. 2016	11
3. Base de Datos Utilizada	13
3.1. Eventos	13
3.1.1. Clasificación de Eventos por Zonas Sismotectónicas	14
3.1.2. Clasificación según Mecanismo	17
3.1.3. Histogramas de Eventos según Fecha	21
3.1.4. Histogramas de Eventos según Magnitud	23
3.2. Estaciones	25
3.2.1. Clasificación de sitio según Tipo de Suelo DS61	25
3.2.2. Clasificación según Zona Sísmica NCH 433	27

3.2.3.	Origen del Vs30 para las Estaciones de la Base de Datos	28
3.2.4.	Corrección de Vs30	29
3.3.	Registros	31
3.3.1.	Distribución de PGA vs Distancia Hipocentral	32
3.3.2.	Distribución de Magnitudes vs Distancia Hipocentral	36
3.3.3.	Registros según Tipo de Mecanismo	38
3.3.3.1.	Distribución de PGA vs Distancia Hipocentral según Mecanismo	38
3.3.3.2.	Distribución de Magnitudes vs Distancia Hipocentral según Mecanismo	40
3.3.4.	Registros según Tipo de Suelo, DS61	42
3.3.5.	Registros según Zona Sísmica, NCH 433	45
4.	Análisis Residual	49
4.1.	Análisis Residual	49
4.2.	Likelihood (LH) y log-likelihood (LLH)	50
5.	Resultados	52
5.1.	Marco de Referencia	52
5.1.1.	Estudio de Herrera et al. (2020) sobre Validez de GMM para el territorio chileno	52
5.2.	Análisis Residual según Mecanismo	56
5.2.1.	Análisis residual según mecanismo contra toda la Base de Datos	57
5.2.1.1.	Montalva et al. (2017)	57
5.2.1.2.	Abrahamson et al. (2016)	57
5.2.1.3.	Contreras Boroschek 2012	58
5.2.1.4.	Zhao et al. (2016)	58
5.2.1.5.	Resumen Análisis Residual contra Toda la Base de Datos	59
5.2.2.	Likelihood (LH) y log-Likelihood (LLH) para Toda la Base de Datos	61
5.2.3.	Análisis residual según mecanismo de la Zona 1	63
5.2.3.1.	Montalva et al. (2017)	63
5.2.3.2.	Abrahamson et al. (2016)	63
5.2.3.3.	Contreras Boroschek 2012	64
5.2.3.4.	Zhao et al. (2016)	64
5.2.3.5.	Resumen Análisis Residual Zona 1	65
5.2.4.	Likelihood (LH) y log-Likelihood (LLH) para Zona 1 de Núñez	67
5.2.5.	Análisis residual según mecanismo de la Zona 2	68
5.2.5.1.	Montalva et al. (2017)	68
5.2.5.2.	Abrahamson et al. (2016)	68
5.2.5.3.	Contreras Boroschek 2012	69
5.2.5.4.	Zhao et al. (2016)	69
5.2.5.5.	Resumen Análisis Residual Zona 2	70
5.2.6.	Likelihood (LH) y log-Likelihood (LLH) para Zona 2 de Núñez	72
5.2.7.	Análisis residual según mecanismo de la Zona 3	73
5.2.7.1.	Montalva et al. (2017)	73
5.2.7.2.	Abrahamson et al. (2016)	73
5.2.7.3.	Contreras Boroschek 2012	74

5.2.7.4.	Zhao et al. (2016)	74
5.2.7.5.	Resumen Análisis Residual Zona 3	75
5.2.8.	Likelihood (LH) y log-Likelihood para Zona 3 de Núñez	77
5.2.9.	Análisis residual según mecanismo de la Zona 4	78
5.2.9.1.	Montalva et al. (2017)	78
5.2.9.2.	Abrahamson et al. (2016)	78
5.2.9.3.	Contreras Boroschek 2012	79
5.2.9.4.	Zhao et al. (2016)	79
5.2.9.5.	Resumen Análisis Residual Zona 4	80
5.2.10.	Likelihood (LH) y log-Likelihood (LLH) para Zona 4 de Núñez	82
5.2.11.	Análisis residual según mecanismo de la Zona 5	83
5.2.11.1.	Montalva et al. (2017)	83
5.2.11.2.	Abrahamson et al. (2016)	83
5.2.11.3.	Contreras Boroschek 2012	84
5.2.11.4.	Zhao et al. (2016)	84
5.2.11.5.	Resumen Análisis Residual Zona 5	85
5.2.12.	Likelihood (LH) y log-Likelihood para Zona 5 de Núñez	87
5.2.13.	Análisis residual según mecanismo de la Zona 6	88
5.2.13.1.	Montalva et al. (2017)	88
5.2.13.2.	Abrahamson et al. (2016)	88
5.2.13.3.	Contreras Boroschek 2012	89
5.2.13.4.	Zhao et al. (2016)	89
5.2.13.5.	Resumen Análisis Residual Zona 6	90
5.2.14.	Likelihood (LH) y log-Likelihood (LLH) para Zona 6 de Núñez	92
5.2.15.	Análisis residual según mecanismo de la Zona 7	93
5.2.15.1.	Montalva et al. (2017)	93
5.2.15.2.	Abrahamson et al. (2016)	93
5.2.15.3.	Contreras Boroschek 2012	94
5.2.15.4.	Zhao et al. (2016)	94
5.2.15.5.	Resumen Análisis Residual Zona 7	95
5.2.16.	Likelihood (LH) y log-Likelihood (LLH) para Zona 7 de Núñez	97
5.2.17.	Análisis residual según mecanismo de la Zona 8	98
5.2.17.1.	Montalva et al. (2017)	98
5.2.17.2.	Abrahamson et al. (2016)	98
5.2.17.3.	Contreras Boroschek 2012	99
5.2.17.4.	Zhao et al. (2016)	99
5.2.17.5.	Resumen Análisis Residual Zona 8	100
5.2.18.	Likelihood (LH) y log-Likelihood (LLH) para Zona 8 de Núñez	102
5.2.19.	Resumen del Análisis Residual según Mecanismo para el Modelo de Montalva et al 2017	103
5.2.19.1.	Resumen para la media del ajuste	103
5.2.19.2.	Resumen para desviación estándar del ajuste	104
5.2.20.	Resumen del Análisis Residual según Mecanismo para el Modelo Abrahamson et al 2016	105
5.2.20.1.	Resumen para la media del ajuste	105
5.2.20.2.	Resumen para la desviación estándar del ajuste	106

5.2.21.	Resumen del Análisis Residual según Mecanismo para el Modelo Contreras Boroschek 2012	107
5.2.21.1.	Resumen para la media del ajuste	107
5.2.21.2.	Resumen para la desviación estándar del ajuste	108
5.2.22.	Resumen del Análisis Residual según Mecanismo para el Modelo Zhao et al 2016	109
5.2.22.1.	Resumen para la media del ajuste	109
5.2.22.2.	Resumen para la desviación estándar del ajuste	110
5.3.	Distribución del Residuo Total Normalizado para Montalva et al. (2017)	111
5.3.1.	Zona 1	112
5.3.2.	Zona 2	113
5.3.3.	Zona 3	114
5.3.4.	Zona 4	115
5.3.5.	Zona 5	116
5.3.6.	Zona 6	117
5.3.7.	Zona 7	118
5.3.8.	Zona 8	119
5.4.	Análisis Residual según Tipo de Suelo, DS61	120
5.4.1.	Montalva et al. (2017)	121
5.4.2.	Abrahamson et al. (2016)	121
5.4.3.	Contreras Boroschek 2012	122
5.4.4.	Zhao et al. (2016)	122
5.5.	Resumen del Análisis Residual según Tipo de Suelo DS61	123
5.5.1.	Resumen para la media del ajuste	123
5.5.2.	Resumen para el para la desviación estándar del ajuste	124
5.6.	Likelihood (LH) y log-Likelihood (LLH) según Tipo de Suelo DS61	126
5.6.1.	Suelo Tipo A	126
5.6.2.	Suelo Tipo B	127
5.6.3.	Suelo Tipo C	128
5.6.4.	Suelo Tipo D	129
5.7.	Análisis Residual según Zona Sísmica NCH 433	130
5.7.1.	Montalva et al. (2017)	131
5.7.2.	Abrahamson et al. (2016)	131
5.7.3.	Contreras Boroschek 2012	132
5.7.4.	Zhao et al. (2016)	132
5.8.	Resumen del Análisis Residual según Zona Sísmica NCH 433	133
5.8.1.	Resumen para la media del ajuste	133
5.8.2.	Resumen para la desviación estándar del ajuste	133
5.9.	Likelihood (LH) y log-Likelihood (LLH) según Zona Sísmica NCH 433	135
5.9.1.	Zona Sísmica 1 NCH 433	135
5.9.2.	Zona Sísmica 2 NCH 433	136
5.9.3.	Zona Sísmica 3 NCH 433	136
6.	Conclusiones	138
6.1.	Análisis contra toda la Base de Datos	138
6.2.	Análisis según Mecanismo en las distintas Zonas de Sismotectónicas	140
6.3.	Comparación con el estudio de Herrera et al. (2020)	141

6.4. Análisis según Tipo de Suelo, DS61	142
6.5. Análisis según Zona Sísmica NCH 433	143
6.6. Consideraciones para próximos trabajos	144
6.7. Comentarios	145

Bibliografía	146
---------------------	------------

Índice de Tablas

3.1.	Zonas sismotectónicas consideradas en este estudio, definidas por Nuñez (2014) ^[14] , en base a Susa (2004) ^[15]	14
3.2.	Cantidad de Eventos según Mecanismo para las Zonas Sismotectónicas	18
3.3.	Total de eventos según Mecanismo	18
3.4.	Clasificación Sísmica según el terreno de fundación, DS61	25
3.5.	Clasificación Tipo de Suelo en función de Vs30	26
3.6.	Cantidad de Estaciones según tipo de Suelo	26
3.7.	Cantidad de Estaciones según Zona NCH 433	27
3.8.	Cantidad de Estaciones según origen de Vs30	29
3.9.	Inverted S-Wave Velocity Models Concepción, Midorikawa et al. (2014) ^[20]	29
3.10.	Velocidades de onda de compresión y corte estimados a través de ensayo sísmico downhole para los distintos estratos, estación Constitución, Boroschek et al. (2012) ^[20]	30
3.11.	Resumen de las correcciones de Vs30	31
3.12.	Cantidad de Registros según Mecanismo	32
3.13.	Cantidad de Registros según Tipo de Suelo	42
3.14.	Cantidad de Registros según Zona NCH 433	45
5.1.	Resumen Análisis Residual contra Toda la Base de Datos, μ	59
5.2.	Resumen Análisis Residual contra Toda la Base de Datos, σ	59
5.3.	Resumen Análisis Residual Zona 1, μ	65
5.4.	Resumen Análisis Residual Zona 1, σ	65
5.5.	Resumen Análisis Residual Zona 2, μ	70
5.6.	Resumen Análisis Residual Zona 2, σ	70
5.7.	Resumen Análisis Residual Zona 3, μ	75
5.8.	Resumen Análisis Residual Zona 3, σ	75
5.9.	Resumen Análisis Residual Zona 4, μ	80
5.10.	Resumen Análisis Residual Zona 4, σ	80
5.11.	Resumen Análisis Residual Zona 5, μ	85
5.12.	Resumen Análisis Residual Zona 5, σ	85
5.13.	Resumen Análisis Residual Zona 6, μ	90
5.14.	Resumen Análisis Residual Zona 6, σ	90
5.15.	Resumen Análisis Residual Zona 7, μ	95
5.16.	Resumen Análisis Residual Zona 7, σ	95
5.17.	Resumen Análisis Residual Zona 8, μ	100
5.18.	Resumen Análisis Residual Zona 8, σ	100
5.19.	Resumen del análisis residual según mecanismo, Montalva et al 2017, parámetro μ	103
5.20.	Resumen del analisis residual según mecanismo, Montalva et al 2017, parámetro σ	104

5.21.	Resumen del análisis residual según mecanismo, Abrahamson et al 2016, parámetro μ	105
5.22.	Resumen del análisis residual según mecanismo, Abrahamson et al 2016, parámetro σ	106
5.23.	Resumen del análisis residual según mecanismo, Contreras Boroschek 2012, parámetro μ	107
5.24.	Resumen del análisis residual según mecanismo, Contreras Boroschek 2012, parámetro σ	108
5.25.	Resumen del análisis residual según mecanismo, Zhao et al 2016, parámetro μ	109
5.26.	Resumen del análisis residual según mecanismo, Zhao et al 2016, parámetro σ	110
5.27.	Resumen análisis residual según tipo de suelo, parámetro μ	123
5.28.	Resumen análisis residual según tipo de suelo, parámetro σ	124
5.29.	Resumen análisis residual según Zona NCH 433, parámetro μ	133
5.30.	Resumen análisis residual según Zona NCH 433, parámetro σ	133

Índice de Ilustraciones

2.1.	Placas Tectónicas en el Territorio Chileno, Centro Sismológico Nacional ^[9]	6
2.2.	Perfil Sísmico Chileno, Centro Sismológico Nacional ^[10]	8
3.1.	Zonas sismotectónicas consideradas en este estudio, definidas por Nuñez (2014) ^[14] , en base a Susa (2004) ^[15]	15
3.2.	Zonificación propuesta en el estudio de Herrera et al. (2020) ^[16]	16
3.3.	Zonificación propuesta en el estudio de Poulous et al. (2018) ^[17]	16
3.4.	Histograma de Eventos según Zona Sismotectónica	17
3.5.	Distribución espacial de todos los eventos en la Base de Datos	19
3.6.	Eventos de la Base de Datos desde la Zona 1 a la Zona 6 de Nuñez	20
3.7.	Eventos de la Base de Datos desde la Zona 7 a la Zona 8 de Nuñez	21
3.8.	Histograma de eventos por fecha contra toda la Base de Datos	21
3.9.	Histograma de eventos por fecha Zona 1 a Zona 2 de Nuñez	22
3.10.	Histograma de eventos por fecha Zona 3 y Zona 4 de Nuñez	22
3.11.	Histograma de eventos por fecha Zona 5 y Zona 6 de Nuñez	22
3.12.	Histograma de eventos por fecha Zona 7 y Zona 8 de Nuñez	23
3.13.	Histograma de eventos por magnitud contra Toda la Base de Datos	23
3.14.	Histograma de eventos por magnitud Zona 1 y Zona 2 de Nuñez	24
3.15.	Histograma de eventos por magnitud Zona 3 y Zona 4 de Nuñez	24
3.16.	Histograma de eventos por magnitud Zona 5 y Zona 6 de Nuñez	24
3.17.	Histograma de eventos por magnitud Zona 7 y Zona 8 de Nuñez	25
3.18.	Histograma de Estaciones según Tipo de Suelo DS61	26
3.19.	Zonificación Sísmica NCH 433	27
3.20.	Histograma de Estaciones según Zona Sísmica, NCH 433	28
3.21.	Estación GO04 Observatorio Tololo, Vicuña, Centro Sismoológico Nacional ^[22]	30
3.22.	Mapa de las Estaciones según tipo de suelo	31
3.23.	PGA vs Distancia Hipocentral, Base de Datos Completa	33
3.24.	PGA vs Distancia Hipocentral según Zona de Nuñez (Zona 1 y Zona 2)	33
3.25.	PGA vs Distancia Hipocentral según Zona de Nuñez (Zona 3 y Zona 4)	34
3.26.	PGA vs Distancia Hipocentral según Zona de Nuñez (Zona 5 y Zona 6)	34
3.27.	PGA vs Distancia Hipocentral según Zona de Nuñez (Zona 7 y Zona 8)	35
3.28.	Magnitud vs Distancia Hipocentral, Base de Datos Completa	36
3.29.	Magnitud vs Distancia según Zona de Nuñez (Zona 1 y Zona 2)	36
3.30.	Magnitud vs Distancia según Zona de Nuñez (Zona 3 y Zona 4)	37
3.31.	Magnitud vs Distancia según Zona de Nuñez (Zona 5 y Zona 6)	37
3.32.	Magnitud vs Distancia según Zona de Nuñez (Zona 7 y Zona 8)	37
3.33.	Histograma de Registros por Zona Sismotectónica según Mecanismo	38
3.34.	PGA vs Distancia Hipocentral según Mecanismo, Base de Datos Completa	38
3.35.	PGA vs Distancia según Mecanismo, Zona 1 y Zona 2 de Nuñez	39

3.36.	PGA vs Distancia según Mecanismo, Zona 3 y Zona 4 de Nuñez	39
3.37.	PGA vs Distancia según Mecanismo, Zona 5 y Zona 6 de Nuñez	39
3.38.	PGA vs Distancia según Mecanismo, Zona 7 y Zona 8 de Nuñez	40
3.39.	Magnitud vs Distancia Hipocentral según Mecanismo, Base de Datos Completa	40
3.40.	Magnitudes vs Distancia según Mecanismo, Zona 1 y Zona 2 de Nuñez	41
3.41.	Magnitudes vs Distancia según Mecanismo, Zona 3 y Zona 4 de Nuñez	41
3.42.	Magnitudes vs Distancia según Mecanismo, Zona 5 y Zona 6 de Nuñez	41
3.43.	Magnitudes vs Distancia según Mecanismo, Zona 7 y Zona 8 de Nuñez	42
3.44.	Histograma de registros según Tipo de Suelo DS61	42
3.45.	Histograma de registros para las Zonas Sismotectónicas según Tipo de Suelo DS61	43
3.46.	Distribución por PGA, magnitud y distancia hipocentral de los registros de aceleraciones de la base de datos en suelo Tipo A	43
3.47.	Distribución por PGA, magnitud y distancia hipocentral de los registros de aceleraciones de la base de datos en suelo Tipo B	44
3.48.	Distribución por PGA, magnitud y distancia hipocentral de los registros de aceleraciones de la base de datos en suelo Tipo C	44
3.49.	Distribución por PGA, magnitud y distancia hipocentral de los registros de aceleraciones de la base de datos en suelo Tipo D	45
3.50.	Histograma de registros según Zona Sísmica NCH 433	46
3.51.	Histograma de registros para las Zonas Sismotectónicas según Zona Sísmica NCH 433	46
3.52.	Distribución por PGA, magnitud y distancia de los registros de aceleraciones de la base de datos en Zona Sísmica 1 NCH 433	47
3.53.	Distribución por PGA, magnitud y distancia de los registros de aceleraciones de la base de datos en Zona Sísmica 2 NCH 433	47
3.54.	Distribución por PGA, magnitud y distancia de los registros de aceleraciones de la base de datos en Zona Sísmica 3 NCH 433	48
5.1.	Base de Datos Estudio Herrera et al. (2020) ^[16]	53
5.2.	Análisis Residual Herrera et al. (2020)	54
5.3.	LH y LLH Herrera et al. (2020)	54
5.4.	Análisis Residual según Mecanismo para toda la Base de Datos, modelo Mon- talva et al. (2017)	57
5.5.	Análisis Residual según Mecanismo para toda la Base de Datos, modelo Abraham- son et al. (2016)	57
5.6.	Análisis Residual según Mecanismo para toda la Base de Datos, modelo Con- treras Boroschek (2012)	58
5.7.	Análisis Residual según Mecanismo para toda la Base de Datos, modelo Zhao et al. (2016)	58
5.8.	LH medio y LLH para toda la Base de Datos	61
5.9.	Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 1, modelo Montalva et al 2017	63
5.10.	Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 1, modelo Abrahamson et al 2016	63
5.11.	Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 1, modelo Contreras Boroschek 2012	64
5.12.	Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 1, modelo Zhao et al 2016 .	64
5.13.	LH medio y LLH para Zona 1	67
5.14.	Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 2, modelo Montalva et al 2017	68

5.15.	Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 2, modelo Abrahamson et al 2016	68
5.16.	Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 2, modelo Contreras Boroschek 2012	69
5.17.	Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 2, modelo Zhao et al 2016	69
5.18.	LH medio y LLH para Zona 2	72
5.19.	Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 3, modelo Montalva et al 2017	73
5.20.	Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 3, modelo Abrahamson et al 2016	73
5.21.	Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 3, modelo Contreras Boroschek 2012	74
5.22.	Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 3, modelo Zhao et al 2016	74
5.23.	LH medio y LLH para Zona 3	77
5.24.	Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 4, modelo Montalva et al 2017	78
5.25.	Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 4, modelo Abrahamson et al 2016	78
5.26.	Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 4, modelo Contreras Boroschek 2012	79
5.27.	Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 4, modelo Zhao et al 2016	79
5.28.	LH medio y LLH para Zona 4	82
5.29.	Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 5, modelo Montalva et al 2017	83
5.30.	Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 5, modelo Abrahamson et al 2016	83
5.31.	Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 5, modelo Contreras Boroschek 2012	84
5.32.	Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 5, modelo Zhao et al 2016	84
5.33.	LH medio y LLH para Zona 5	87
5.34.	Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 6, modelo Montalva et al 2017	88
5.35.	Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 6, modelo Abrahamson et al 2016	88
5.36.	Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 6, modelo Contreras Boroschek 2012	89
5.37.	Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 6, modelo Zhao et al 2016	89
5.38.	LH medio y LLH para Zona 6	92
5.39.	Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 7, modelo Montalva et al 2017	93
5.40.	Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 7, modelo Abrahamson et al 2016	93
5.41.	Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 7, modelo Contreras Boroschek 2012	94
5.42.	Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 7, modelo Zhao et al 2016	94
5.43.	LH medio y LLH para Zona 7	97
5.44.	Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 8, modelo Montalva et al 2017	98
5.45.	Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 8, modelo Abrahamson et al 2016	98
5.46.	Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 8, modelo Contreras Boroschek 2012	99
5.47.	Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 8, modelo Zhao et al 2016	99

5.48.	LH medio y LLH para Zona 8	102
5.49.	Distribución de Zt para Montalva et al. (2017), Zona 1	112
5.50.	Distribución de Zt para Montalva et al. (2017), Zona 2	113
5.51.	Distribución de Zt para Montalva et al. (2017), Zona 3	114
5.52.	Distribución de Zt para Montalva et al. (2017), Zona 4	115
5.53.	Distribución de Zt para Montalva et al. (2017), Zona 5	116
5.54.	Distribución de Zt para Montalva et al. (2017), Zona 6	117
5.55.	Distribución de Zt para Montalva et al. (2017), Zona 7	118
5.56.	Distribución de Zt para Montalva et al. (2017), Zona 8	119
5.57.	Análisis Residual según tipo de suelo, modelo Montalva et al 2017	121
5.58.	Análisis Residual según tipo de suelo, modelo Abrahamson et al 2016	121
5.59.	Análisis Residual según tipo de suelo, modelo Contreras Boroschek 2012	122
5.60.	Análisis Residual según tipo de suelo, modelo Zhao et al 2016	122
5.61.	LH medio y LLH para Suelo Tipo A	126
5.62.	LH medio y LLH para Suelo Tipo B	127
5.63.	LH medio y LLH para Suelo Tipo C	128
5.64.	LH medio y LLH para Suelo Tipo D	129
5.65.	Análisis Residual según Zona NCH 433, modelo Montalva et al 2017	131
5.66.	Análisis Residual según Zona NCH 433, modelo Abrahamson et al 2016	131
5.67.	Análisis Residual según Zona NCH 433, modelo Contreras Boroschek 2012	132
5.68.	Análisis Residual según Zona NCH 433, modelo Zhao et al 2016	132
5.69.	LH medio y LLH para Zona Sísmica 1 NCH 433	135
5.70.	LH medio y LLH para Zona Sísmica 2 NCH 433	136
5.71.	LH medio y LLH para Zona Sísmica 3 NCH 433	136

Capítulo 1

Introducción General

1.1. Introducción

La subducción de la Placa de Nazca bajo la Placa Sudamericana, con una tasa de convergencia en torno a los 6 a 7 cm por año, constituye una de las regiones sísmicas más activas en el mundo y representa una fuente frecuente de terremotos para Chile. Los terremotos interplaca e intraplaca asociados a esta interacción pueden alcanzar magnitudes significativas, con áreas de ruptura considerables y pueden generar tsunamis, lo cuál pone en riesgo la integridad de la población y de las estructuras civiles a lo largo del territorio nacional.

En este contexto, los modelos de movimiento fuerte (GMM por sus siglas en inglés), o curvas de atenuación, son una herramienta necesaria y relevante para poder predecir la intensidad de estos eventos. Los modelos de movimiento fuerte, en función de elementos inherentes al evento que se quiere simular, como magnitud, tipo de evento y profundidad focal, así como también en función de elementos inherentes al sitio que se desea estudiar, como tipo de suelo, zona sísmica y distancia fuente-sitio; permiten estimar parámetros de intensidad, tales como la aceleración máxima del suelo (PGA) y aceleraciones espectrales para distintos períodos estructurales. Estos modelos son necesarios y relevantes para desarrollar estudios de amenaza sísmica, los cuales constituyen un requisito para las bases de diseño de cualquier proyecto civil en nuestro país.

Para el territorio chileno se han desarrollado distintos modelos de movimiento fuerte como los de Montalva et al. (2017)^[1] y Contreras Boroschek (2012)^[2], estos dos modelos se han desarrollado a partir de una base de datos que considera únicamente registros y estaciones locales. Actualmente, también se aplican modelos como los de Abrahamson et al. (2016)^[3] y Zhao et al. (2016)^[4], los cuales se han desarrollado a partir de una base de datos global que considera eventos y datos provenientes de distintas zonas del mundo. En este contexto, la principal motivación del presente trabajo es poder determinar la validez de estos modelos a lo largo del territorio nacional y bajo qué condiciones es recomendable aplicar uno u otro modelo. El poder contar con esta información es esencial para poder llevar a cabo mejores estudios de amenaza sísmica, los cuales son un requerimiento para los criterios de diseño de distintas estructuras lo largo del territorio nacional. Estos estudios, a su vez, permiten un mejor desarrollo de códigos y normativas de construcción de diseño sísmico en Chile.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

El objetivo general del presente trabajo es estimar la confiabilidad de distintos modelos de movimiento fuerte para el caso chileno, distinguiendo tipo de evento (interplaca o intraplaca), zona sísmica normativa y tipo de suelo.

1.2.2. Objetivos Específicos

Los objetivos específicos son los siguientes:

1. Completar una base de datos con eventos locales que permita comparar observaciones con las predicciones de los modelos.
2. Programar o disponer en Matlab de los modelos de movimiento fuerte Montalva et al. (2017)^[1], Abrahamson et al. (2016)^[3], Contreras Boroschek (2012)^[2] y Zhao et al. (2016)^[4].
3. Realizar un análisis residual para validar la capacidad predictiva de los modelos.
4. Comparar observaciones y predicciones contra toda la base de datos, luego distinguiendo según tipo de evento, zona sísmica normativa y tipo de suelo.
5. Concluir qué modelo presenta la mejor capacidad predictiva y bajo qué condiciones.

1.3. Metodología

La metodología adoptada para desarrollar el presente trabajo es la siguiente:

1.3.1. Desarrollar Base de Datos de Eventos Locales.

Para desarrollar la base de datos se descargan registros desde Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) Ground Motion Database^[5], los cuales se complementan con registros desde el Centro Sismológico Nacional (CSN)^[6].

En cuanto a registros y espectros de aceleración predominan los obtenidos desde PEER. En cuanto información relativa a las estaciones o caracterización de sitios, predominan los datos de CSN.

1.3.2. Incorporar Información y Completar Base de Datos

Para completar la base de datos, se incluye tipo de evento (interplaca o intraplaca), zona sísmogénica, coordenadas hipocentrales, profundidad focal y magnitud. En cuanto a información relativa al sitio se incluye, coordenadas de las estaciones, Vs30, tipo de suelo y distancia hipocentral entre fuente y sitio.

Relativo a los registros, se incluyen las aceleraciones observadas para componentes horizontales y verticales en caso de estar disponibles (CSN). Mediante un programa de integración

y corrección de registros se obtienen velocidades, y desplazamientos de estos registros. Se determina PGA y se calcula los pseudo espectros de aceleraciones para la media geométrica de las componentes horizontales, con un amortiguamiento crítico del 5 %. Esto se incorpora a los registros de PEER que contienen PGA y los pseudo espectros de aceleración para la media geométrica de las componentes horizontales con un 5 % de amortiguamiento crítico.

1.3.3. Filtrado de la Base de Datos

Luego de completar la base de datos se filtran los datos para considerar únicamente registros con las siguientes características.

- $PGA \geq 0.01$ [g].
- Distancia Hipocentral ≤ 300 [km].
- Magnitud $M_w \geq 4.8$

1.3.4. Programación los Modelos de Movimiento Fuerte

Se programa o dispone de los modelos de movimiento fuerte en Matlab. Los modelos a programar para el caso chileno son los siguientes:

- Montalva et al. (2017)^[1]
- Abrahamson et al. (2016)^[3]
- Contreras Boroschek (2012)^[2]
- Zhao et al. (2016)^[4]

1.3.5. Realizar Análisis residual

Para comparar las observaciones de la base de datos con la predicciones de los modelos, se realiza un análisis residual. De esta forma se calcula un residual total normalizado, en función del cuál se pueden determinar conceptos como Likelihood medio (LH, desarrollado por Scherbaum et al., 2004)^[7] y log-Likelihood (LLH, desarrollado por Scherbaum et al., 2009)^[8] que permiten cuantificar la calidad predictiva de los modelos. Los parámetros a comparar son PGA y la pseudo aceleración espectral de la media geométrica de las componentes horizontales con amortiguamiento crítico del 5 %.

Se realiza un análisis incremental, es decir, primero se comparan las predicciones contra toda la base de datos y luego, se hace una comparación segmentando la base de datos según tipo de evento (interplaca o intraplaca), zona sismogénica, zona sísmica según norma NCH 433 y según tipo de suelo de acuerdo con el Decreto Supremo 61 (*DS61*).

1.3.6. Se concluye sobre la validez de los modelos

Finalmente a partir del análisis residual se concluye sobre la calidad predictiva de los modelos, de forma tal de poder establecer cuál de ellos se ajusta mejor al contexto chileno y bajo qué condiciones.

1.4. Alcances

A continuación se presentan los alcances de cada capítulo en el presente informe:

1.4.1. Capítulo 1: Introducción General

En este capítulo se introduce el tema general a tratar en el presente informe. Se incluyen Objetivos, Metodología y Alcances de cada capítulo.

1.4.2. Capítulo 2: Contexto Chileno y Modelos de Movimiento Fuerte

En este capítulo se presentan las características que hacen de Chile un país con frecuente actividad sísmica y se pone énfasis en la necesidad de contar con modelos de movimiento fuerte que puedan ser aplicados al caso chileno. Además, se presentan las características de los modelos a estudiar, rango de validez y la base de datos a partir de la cuál se han desarrollado.

1.4.3. Capítulo 3: Base de Datos Utilizada

En este capítulo se presenta la base de datos que se ha recopilado para comparar observaciones y predicciones de los modelos. Además, se definen las distintas zonas sísmicas que se han considerado, las clasificaciones según tipo de mecanismo, según zona sísmica normativa y según tipo de suelo.

1.4.4. Capítulo 4: Análisis Residual

En este capítulo se pone en contexto y se define en qué consiste un análisis residual. Se presentan las expresiones matemáticas que permiten desarrollar el análisis residual y calcular los parámetros LH y LLH.

1.4.5. Capítulo 5: Resultados

En este capítulo se presentan los resultados del análisis residual, primero para toda la base de datos en las distintas zonas sismogénicas definidas. Luego se distingue según tipo de evento, tipo de suelo y por último, según zona sísmica normativa

Además se presentan los resultados de estudios anteriores asociados a determinar la validez de modelos de movimiento fuerte para Chile, ésto con la intención de establecer un marco de referencia para los resultados.

1.4.6. Capítulo 6: Conclusiones

En este capítulo se discuten los resultados presentados en el capítulo anterior y se comparan los resultados con los obtenidos en estudios anteriores. Se realiza además un juicio objetivo en base a los parámetros calculados y un juicio de valor para determinar qué modelo se ajusta mejor al caso chileno y bajo qué condiciones es recomendable complementar la información que se pueda obtener a partir de los distintos modelos.

Capítulo 2

Contexto Chileno y Modelos de Movimiento Fuerte

En el presente capítulo se desarrolla un marco teórico con la finalidad de poner en contexto los distintos temas a tratar en este estudio.

En primera instancia, se aborda el contexto sismológico chileno, los tipos de sismos que se generan y la necesidad de contar con relaciones de atenuación o modelos de movimiento fuerte (*Ground-Motion Model, GMM*) que estimen la demanda sísmica para los distintos terremotos que ocurren a lo largo del territorio nacional.

A continuación, se describen los distintos modelos a analizar, la base de datos a partir de la cual se han desarrollado y su rango de validez para ser aplicados.

2.1. Contexto Sismológico Chileno

El contexto sísmico chileno se encuentra fuertemente marcado por la subducción de la Placa de Nazca bajo la Placa Sudamericana. Esta interacción provoca distintos tipos de sismos a lo largo del territorio nacional.

Gran parte del territorio chileno continental se ubica sobre la Placa Sudamericana, esta placa se encuentra en contacto al oeste con la Placa de Nazca, hasta la Península de Taitao.

La placa oceánica de Nazca, la cual es más densa que la continental, penetra bajo la Placa Sudamericana, formando una zona de subducción. El primer contacto entre placas produce un valle profundo, llamado fosa o trinchera (“trench”), que ocurre bajo el océano, costa afuera del continente.

Ambas placas convergen a una velocidad aproximada de 6 a 7 cm/año. Esta interacción controla gran parte de la sismotectónica del país, aunque también inciden y producen sismos, el contacto entre la placa Sudamericana y Scotia, así como también la posible subducción de parte de la placa Antártica bajo la Sudamericana.

En la Figura 2.1, se muestra la interacción de las placas descritas recientemente a lo largo del territorio continental chileno.

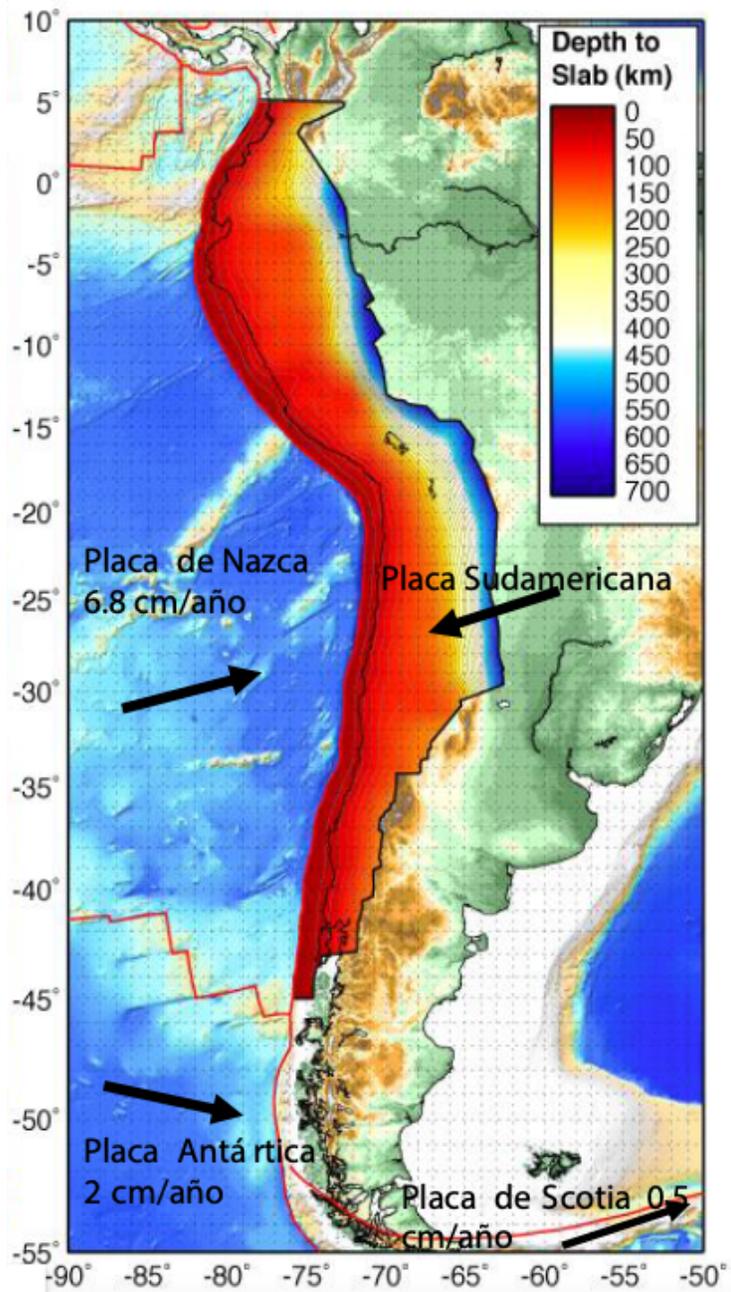


Figura 2.1: Placas Tectónicas en el Territorio Chileno, Centro Sismológico Nacional^[9]

Los principales tipos de sismos que se generan producto de la interacción entre la Placa de Nazca y la Placa Sudamericana son Sismos Interplaca, Sismos Intraplaca de profundidad intermedia, Sismos Superficiales o Corticales y los Sismos Outer-Rise.

- **a) Sismos interplaca:**

Son conocidos como terremotos de subducción y corresponden a sismos compresionales con mecanismos de falla inversa. En cuanto a su magnitud, ésta es proporcional al desplazamiento y al área de la zona de desplazamiento. La profundidad de estos terremotos se limita a un máximo de 60 km de la zona de acoplamiento. El terremoto de Valdivia de 1960 de magnitud Mw 9.5 y el terremoto del Maule del 2010 de magnitud Mw 8.8 son sismos del tipo interplaca.

- **b) Sismos Intraplaca de profundidad intermedia:**

Ocurren a profundidades superiores a 50 km, al interior de la placa oceánica. Pueden alcanzar profundidades de hasta 250 km en Chile. En comparación a sismos interplaca de similar magnitud, se ha observado que los sismos intraplaca presentan un mayor potencial de daño. El terremoto de Chillan en 1939 de magnitud Ms 8.0 o el de Punitaqui de 1997 de magnitud Mw 7.1 son ejemplos de sismos intraplaca de profundidad intermedia.

- **c) Sismos Superficiales o Corticales:**

Son sismos que ocurren a profundidades menores a 60 km, dentro de la placa continental en la corteza. Este tipo de sismos son producto de las deformaciones que se producen por la convergencia entre la placa de Nazca y la placa continental. Estas deformaciones son responsables de generar alzamientos como la Cordillera de los Andes. Los terremotos de Curicó de 2005 de magnitud Mw 6.6 y Chusmiza de 2001 de magnitud Mw 6.3 son sismos superficiales o corticales.

- **d) Sismos Outer-Rise:**

Son sismos que ocurren a profundidades menores a 30 km, costa afuera de la fosa oceánica. Se producen principalmente por las deformaciones de la placa de Nazca como producto de los esfuerzos de flexión sobre dicha placa antes de subductar. La zona outer-rise corresponde a la zona de máxima curvatura. En general poseen magnitudes inferiores a 7.0. El terremoto frente a las costas de Valparaíso en 2001 de magnitud Mw 6.7 es un sismo del tipo Outer-Rise.

En la siguiente figura, se muestra el perfil sísmico chileno. Los sismos en la letra *a)* corresponden a sismos interplaca, los sismos en la letra *b)* corresponden a sismos intraplaca de profundidad intermedia, los sismos en la letra *c)* corresponden a sismos superficiales o corticales, por último, los sismos en la *d)* corresponden a sismos outer-rise.

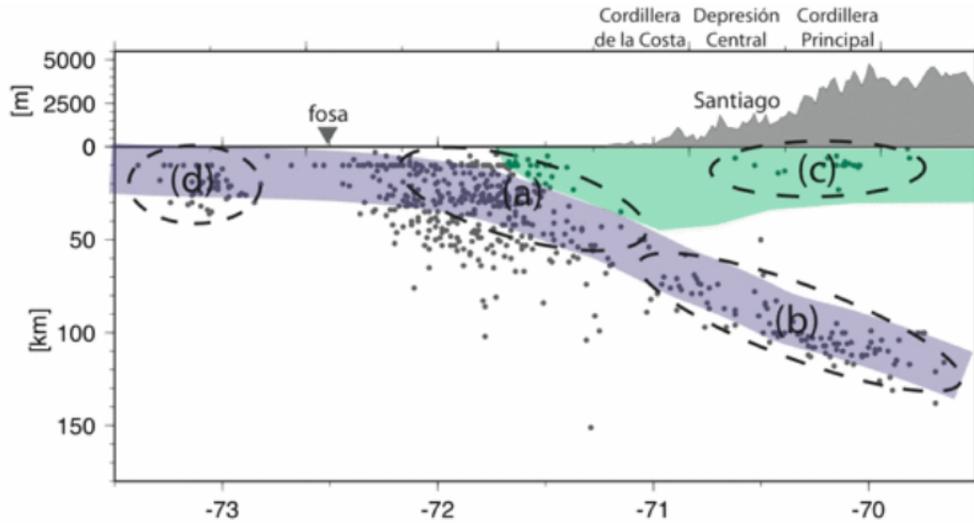


Figura 2.2: Perfil Sísmico Chileno, Centro Sismológico Nacional^[10]

2.2. Modelos de Movimiento Fuerte GMM

La intensa actividad sísmica en Chile producto de la interacción entre las placas de Nazca y Sudamericana hace necesario contar con relaciones de atenuación o modelos de movimiento fuerte que permitan estimar la demanda sísmica a lo largo del país.

Los modelos de movimiento fuerte (*Ground-Motion Model, GMM*) o relaciones de atenuación consisten en una serie de ecuaciones o expresiones matemáticas que permiten relacionar parámetros sísmicos en estudio, como por ejemplo la aceleración máxima del suelo (PGA) o aceleraciones horizontales espectrales (SA), con parámetros propios del sismo y del sitio como magnitud, tipo de sismo, distancia a la fuente o tipo de suelo, entre otros.

Estas expresiones matemáticas se obtienen a partir de ajustes de registros sísmicos por medio de análisis de regresión. Los registros sísmicos pueden pertenecer a una determinada zona considerando únicamente data local, o bien, pueden pertenecer a distintas zonas y tipos de interacción de placas, considerando data global.

El desarrollo y el estudio de la validez de modelos de movimiento fuerte que estimen la demanda sísmica para Chile pueden constituir una herramienta necesaria y relevante en la evaluación del peligro sísmico para este país y eventualmente para otras zonas de subducción o de características similares en resto del mundo.

En este contexto, diversos autores han desarrollado modelos de movimiento fuerte que son aplicables para el caso chileno. En el presente estudio se estudia la validez de modelos de movimiento fuerte de Montalva et al. (2017)^[1], Abrahamson et al. (2016)^[3], Contreras Boroschek (2012)^[2] y Zhao et al. (2016)^[4]. Estos modelos entregan relaciones para aceleraciones horizontales máximas del suelo (PGA) y para las aceleraciones horizontales espectrales (SA), con un 5% de razón de amortiguamiento crítico.

Se ha determinado estudiar estos modelos debido a que son altamente aplicados en la

práctica profesional para el desarrollo de estudios de amenaza sísmica en Chile, además, ya se dispone de los códigos y coeficientes para programar estos modelos en Matlab. El modelo de Idini et al. (2017)^[11], también aplica para el caso chileno, sin embargo, sus términos asociados a efectos sitio, al no considerar efectos no lineales, pueden ser poco apropiados para sitios con $Vs30$ menor a 400 m/s, para el caso chileno se tiene que un gran número de estaciones presentan esta condición para $Vs30$.

2.2.1. Montalva et al. (2017)

El modelo de Montalva et al. (2017)^[1] ha sido desarrollado específicamente para la zona de subducción chilena. El modelo predice la máxima aceleración horizontal del suelo (PGA) y el pseudo espectro de aceleración para la media geométrica de las componentes horizontales, considerando un amortiguamiento crítico del 5 % para 22 períodos estructurales entre 0.02 y 10 s. También entrega el logaritmo natural de la desviación estándar para las pseudo aceleraciones espectrales.

Su base de datos considera eventos ocurridos entre 1985 y 2015, como los megaterremotos del Maule 2010 Mw 8.8, Iquique 2014 Mw 8.1 e Illapel 2015 Mw 8.3. Incluye parámetros relativos al sismo como magnitud local y de momento, coordenadas epicentrales y profundidad focal. También incluye parámetros relativos a la relación fuente-sitio como azimut epicentral e hipocentral y distancia más próxima al plano de ruptura. La caracterización de sitio se ha realizado en función de la velocidad de onda de corte en los primeros 30 metros ($Vs30$).

El modelo se ha desarrollado siguiendo la forma funcional del modelo de Abrahamson et al. (2016)^[3]. Las características y rango de validez para el modelo de Montalva et al. (2017)^[1] son las siguientes:

- Utiliza data desde 1985 hasta 2015 recopilada desde el Integrated Plate boundary Observatory Chile, Renadic y Centro Sismológico Nacional (CSN). Con un total de 461 registros de 281 eventos interplaca y 1313 registros de 192 eventos intraplaca.
- La caracterización de sitio se ha realizado en función del $Vs30$. La base de datos cuenta con 57 estaciones cuyo $Vs30$ se ha registrado y otras 178 estaciones cuyo $Vs30$ se ha estimado en función de la forma topográfica y frecuencia natural predominante en el sitio. Se registran valores entre 108 y 1951 m/s para el $Vs30$. Pero el modelo se valida para valores de $Vs30$ entre 100 y 1000 m/s.
- Se clasifican los sismos en 2 tipos, Interplaca e Intraplaca. La clasificación es en función de su locación con respecto a los ejes de la fosa oceánica y en función de su mecanismo focal cuando este se encuentra disponible. Los eventos asociados a falla inversa y ubicados entre la fosa oceánica y la costa de Perú-Chile, de profundidad focal ≤ 50 km clasifican como interplaca. Los eventos asociados a fallas normales, con profundidades focales mayores a 50 km clasifican con intraplaca. Por último, los eventos corticales son excluidos.
- Clasificación antearco y trasarco. Para eventos trasarco no se tiene data suficiente, por lo tanto, considera los coeficientes de Abrahamson et al (2016) para el caso.
- Utiliza modelo de plano finito de ruptura para determinar distancias cuando se encuentra disponible, de lo contrario, aplica relaciones empíricas para estimar el plano de falla.

- Las profundidades focales van entre 5 y 50 km para eventos interplaca y entre 40 y 280 km para eventos intraplaca.
- El modelo presenta comportamiento razonable hasta distancias de 1000 km pero puede ser valido únicamente hasta distancias ≤ 300 km considerando la distribución de la data. El modelo es estrictamente valido para magnitudes $5 \leq Mw \leq 8$, pero podría aplicarse hasta magnitudes Mw 9, dado que se han incluido registros asociados al Terremoto del Maule 2010 Mw 8.8 en su base datos.
- Tiene una desviación estándar solo en función del periodo o PGA, no diferencia por fuente sísmica.

2.2.2. Abrahamson et al. (2016) & BC Hydro (2012)

El modelo calcula aceleración máxima del suelo (PGA) y las pseudo aceleraciones espectrales de la media geométrica de las componentes horizontales para un amortiguamiento crítico del 5% para períodos estructurales hasta 10 s. También entrega desviación estándar del logaritmo natural de las pseudo aceleraciones espectrales.

Los valores de entrada del modelo son un vector de períodos entre 0 y 10 s, magnitud de momento del evento, profundidad focal, tipo de evento, sitio antearco o trasarco, tipo de evento, interplaca o intraplaca y velocidad de onda de corte en los primeros 30 m (Vs_{30}). Entrega además el logaritmo natural de la desviación estándar para el pseudo espectro de aceleración.

Las características del modelo, su base de datos y rango de validez son las siguientes:

- Utiliza data de Atkinson and Boore (2013) combinado con data adicional de Japon, Taiwan, Sudamérica, Centro América y Mexico. incluye data de los terremotos del Maule 2010 Mw 8.8, Chile y Tohoku 2011 Mw 9.0, Japon. Cuenta con un total de 3557 registros para eventos interplaca y 6389 registros para eventos intraplaca.
- Usa componentes filtradas 1.2 veces la frecuencia de pasa alto.
- Caracterización de sitios según Vs_{30} . Máximo $Vs_{30} = 1000$ m/s.
- Calsificación de eventos en dos tipos, Interplaca o Intraplaca. Clasificación de ubicación en dos tipos, antearco y trasarco.
- Para distancias entre la fuente y estación considera r_{rup} distancia más cercana al plano de ruptura para eventos interplaca y r_{hypo} distancia hipocentral para eventos intraplaca..
- El rango de validez para magnitudes es de $6 \leq Mw \leq 9$ para eventos interplaca y de $5 \leq Mw \leq 8$ para eventos intraplaca.
- Considera profundidad focal solo para eventos intraplaca con una profundidad máxima de 120 km.
- Tiene una desviación estándar solo en función del periodo o PGA, no diferencia por fuente sísmica.

2.2.3. Contreras Boroschek (2012)

El modelo de Contreras Boroschek (2012)^[2] entrega la aceleración horizontal máxima del suelo (PGA), la pseudo aceleración espectral de la media geométrica las componentes horizontales para un 5 % de amortiguamiento crítico y la desviación estándar del logaritmo base 10 de las pseudo aceleraciones. El modelo trabaja para períodos estructurales desde 0.04 hasta 3 segundos.

Los valores de entrada para el modelo son un vector de períodos de hasta 3 segundos, magnitud de momento, distancia más cercana a la ruptura R_{rup} , profundidad focal, tipo de evento, y tipo de suelo.

Las características del modelo, base de datos utilizada y rango de validez son las siguientes:

- Utiliza data local desde 1985 hasta 2010, la cuál fue generada a partir de datos de aceleraciones publicados en estudios previos (Medina, 1998^[12]; Ruiz, 2002^[13]) y registros obtenidos por la Red de Cobertura Nacional de Acelerógrafos (RENADIC) y la Red Conjunta RAGIC, ambas manejadas por el Departamento de Ingeniería Civil de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.
- La caracterización de sitios considera 2 categorías, roca y suelo. Clasifican como roca los sitios con $Vs30 \geq 900$ m/s, $RQD \geq 50$ % o esfuerzo de compresión $q_u \geq 10$ MPa. De lo contrario clasifica como suelo.
- Modelo valido para profundidad focal de hasta 100 km.
- Se clasifican eventos en 2 tipos, interplaca e intraplaca. Para eventos interplaca considera una magnitud de momento máxima de Mw 8.8. Para eventos intraplaca considera una magnitud de momento máxima de Mw 8.0.
- Para distancias fuente estación, considera la distancia más cercana a la ruptura r_{rup} .
- El modelo presenta un buen ajuste para eventos de magnitudes entre Mw 8.3 y Mw 8.8.

2.2.4. Zhao et al. 2016

El modelo de Zhao et al. (2016)^[4] entrega la aceleración horizontal máxima del suelo (PGA), la pseudo aceleración espectral de la media geométrica de las componentes horizontales para un amortiguamiento crítico del 5 % y la desviación estándar del logaritmo natural de las pseudo aceleraciones. El modelo trabaja para 36 períodos estructurales desde 0.01 hasta 5 segundos.

Los valores de entrada para el modelo son un vector de períodos para el pseudo espectro de aceleración de la media geométrica de las componente horizontales hasta los 5 segundos, magnitud de momento, distancia más cercana a la ruptura, profundidad focal y tipo de suelo.

Las características de la base de datos utilizada para la regresión y el rango de validez para el modelo son las siguientes:

- Utiliza una base de datos global desde 1968 hasta 2012. Con profundidades focales de entre 10 y 170 km para eventos intraplaca y profundidades de hasta 50 km para eventos interplaca.
- El modelo tiene una versión para eventos intraplaca (2016a), una versión para modelos interplaca (2016b), y versión para eventos corticales (2016c). La clasificación entre los tipos de evento es en función del mecanismo focal, coordenadas y profundidad focal.
- Para la caracterización de sitios, se consideran 4 tipos de suelo. Tipo I para Roca, es decir, sitios con clasificación NEHRP A, B, o C, $Vs_{30} > 600$ m/s y período natural menor a 2 segundos. Tipo II para suelo duro, es decir, sitios con clasificación NEHRP C, $300 < Vs_{30} \leq 600$ m/s y período natural entre 0.2 y 0.4 segundos. Tipo III para suelo medio, es decir, sitios con clasificación NEHRP D, $200 < Vs_{30} \leq 300$ m/s y período natural entre 0.4 y 0.6 segundos. Por último, suelo blando, es decir, sitios con clasificación NEHRP E o F, $Vs_{30} \leq 200$ m/s y período natural mayor o igual a 0.6 segundos.
- El modelo es válido para profundidades focales de hasta 25 km y magnitud de momento M_w 9.0 para eventos interplaca. El modelo es válido para profundidades focales de hasta 100 km y magnitud de momento M_w 8.0 para eventos intraplaca.

Capítulo 3

Base de Datos Utilizada

La base de datos utilizada en el presente estudio está compuesta por datos recopilados desde el Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) Ground Motion Database^[5] en su proyecto para zonas de subducción. Este proyecto cuenta con registros provenientes desde las regiones de Alaska, Cascadia, Centro América y México, Japón, Nueva Zelanda, Sudamérica y Taiwan.

Para el presente trabajo se han considerado únicamente los registros correspondientes a la zona de Súdamerica, específicamente aquellos situados en el territorio chileno, dentro de los cuales destacan registros del departamento de Ingeniería Civil de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.

Se ha trabajado directamente con los pseudo espectros de aceleración disponibles en la base de datos de PEER^[5], es decir, no se han procesado los registros individuales de aceleración para las distintas componentes. El pseudo espectro de aceleración disponible en la base de datos de PEER^[5] se ha calculado para la media geométrica de las componentes horizontales horizontales considerando un amortiguamiento crítico del 5 %.

Los pseudo espectros de aceleración provenientes desde la base de datos de PEER^[5] abarcan desde el año 1985 hasta 2015, y se han complementado con registros de movimiento fuerte desde el año 2016 hasta diciembre del 2020, provenientes desde el Centro Sismológico Nacional (CSN)^[6]. Para este caso se ha trabajado con los registros de aceleración para cada componente individualmente, los cuales se han procesado para eliminar ruido y distorsión con una frecuencia máxima de 0.4 veces su frecuencia de muestreo. Posteriormente se han calculado los pseudo espectros de aceleración para la media geométrica de las componentes horizontales con amortiguamiento crítico del 5 % hasta un periodo T de 5 segundos, que corresponde al máximo período común en que los modelos de movimiento fuerte estudiados en el presente trabajo pueden ser aplicados.

3.1. Eventos

Desde PEER se tienen 421 eventos registrados entre 1985 hasta diciembre de 2015, los cuales se han complementado con 365 eventos desde CSN registrados entre 2016 y diciembre del 2020, obteniendo así un total de 786 eventos. En ambos casos se cuenta con datos de magnitud de momento, latitud, longitud y profundidad focal para cada evento. Todos los

eventos considerados en la base de datos presentan una magnitud de momento mayor o igual a 4.8 Mw.

3.1.1. Clasificación de Eventos por Zonas Sismotectónicas

Para el presente estudio se propone una división del territorio nacional en 8 zonas, esto en función de la regionalización propuesta por Ignacio Nuñez en su memoria sobre Nuevo Peligro Sísmico para Chile^[14]. Esta regionalización agrega una Zona Austral a la propuesta por Davor Susa (2004)^[15]. Dicha regionalización surge a partir de un catálogo de sismos interplaca con magnitudes mayores o iguales a 7.0 Ms. Cada una de las zonas sismotectónicas de la regionalización queda determinada por el largo de ruptura de los mayores sismos históricos. En la Tabla 3.1 se muestran los límites de cada zona, y en la Figura 3.1 se muestra el mapa del territorio nacional según la regionalización propuesta.

Tabla 3.1: Zonas sismotectónicas consideradas en este estudio, definidas por Nuñez (2014)^[14], en base a Susa (2004)^[15]

ZONA	Latitud °S
Z1: Definida por el terremoto de 1868	16.5 - 19
Z2: Definida por el terremoto de 1877	18,7 - 22.7
Z3: Definida por Límite inferior del terremoto de 1877 y Límite superior del terremoto de 1922	22.7 - 25.4
Z4: Definida por el terremoto de 1922	25.4 - 28.9
Z5: Definida por Límite inferior del terremoto de 1922 y Límite superior del terremoto de 1906	28.9 - 31.7
Z6: Definida por el terremoto de 1906	31.7 - 35.1
Z7: Definida por Límite inferior del terremoto de 1906 y Límite inferior del terremoto de 1835	35.1 - 37.5
Z8: Definida por Límite inferior del terremoto de 1835 y Límite inferior del terremoto de 1960	37.5 - 47
Zona Austral	47 - 56

Dentro de la base de datos destaca el Terremoto de Tocopilla 2007 Mw 7.7 en Zona 2, el Terremoto de Iquique Mw 8.2, también en Zona 2, el terremoto de Illapel 2015 Mw 8.4 en Zona 5, el Terremoto del Maule 2010 Mw 8.8 en Zona 7 y el Terrmoto de Melinka 2016 Mw 7.6 en Zona 8.

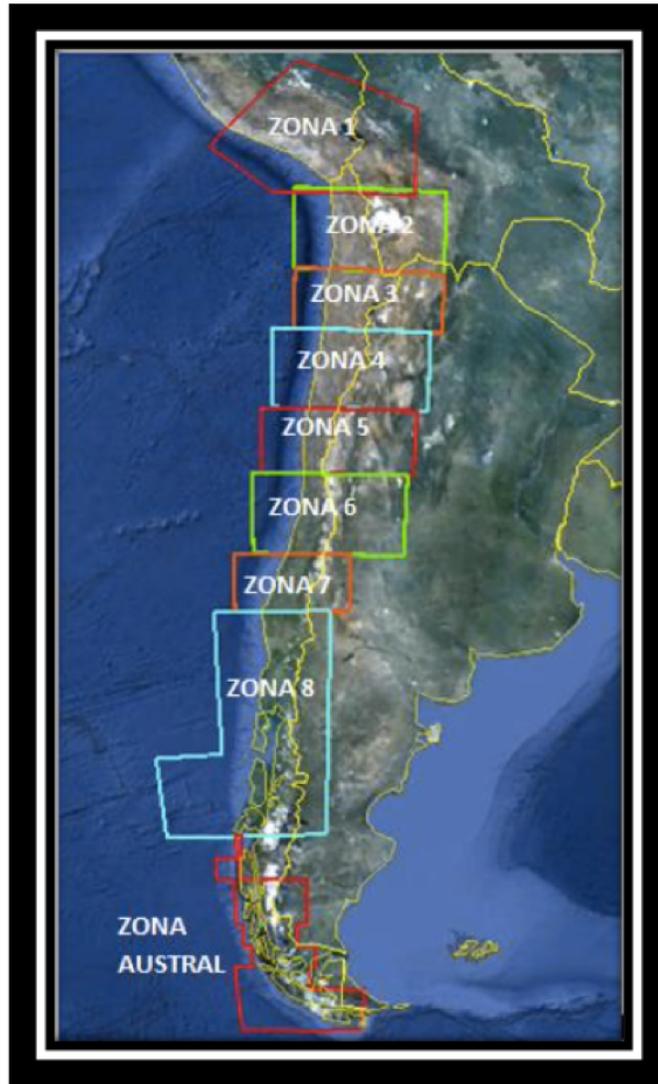


Figura 3.1: Zonas sismotectónicas consideradas en este estudio, definidas por Nuñez (2014)^[14], en base a Susa (2004)^[15]

La razón por la cuál se ha optado por esta zonificación y no por otras más modernas como las propuestas en el estudio de Herrera et al. (2020)^[16] o en el estudio de Poulous et al. (2018)^[17] es que la zonificación de Nuñez entrega una distribución que permite que se tenga un número similar de registros interplaca e intraplaca para las distintas zonas propuestas, lo que permite comparar cómo se ajustan los modelos al distinguir según mecanismo en las distintas zonas.

En relación a la zonificación de Herrera en la Figura 3.2 se tiene que la zonificación de Nuñez propone un mayor número de zonas para segmentar la base de datos, a partir de esto es posible distinguir mejor ciertas tendencias al analizar la distribución de los residuos en zonas de menor extensión.

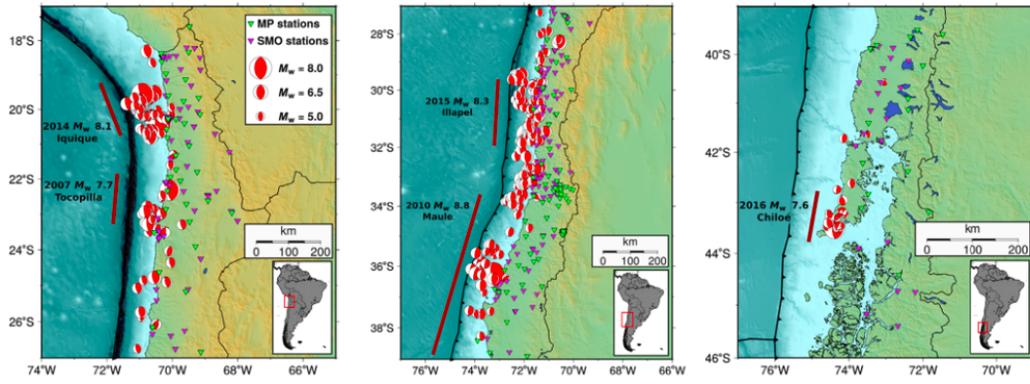


Figura 3.2: Zonificación propuesta en el estudio de Herrera et al. (2020)^[16]

En relación a la zonificación de Puolous en la Figura 3.3, se tiene que en las Zonas 1, 2 y 3 se concentrarían registros de eventos interplaca, mientras que en el resto de las zonas se concentrarían registros de eventos intraplaca. Esta condición no permitiría comparar el ajuste de los modelos al distinguir según mecanismo en una misma zona.

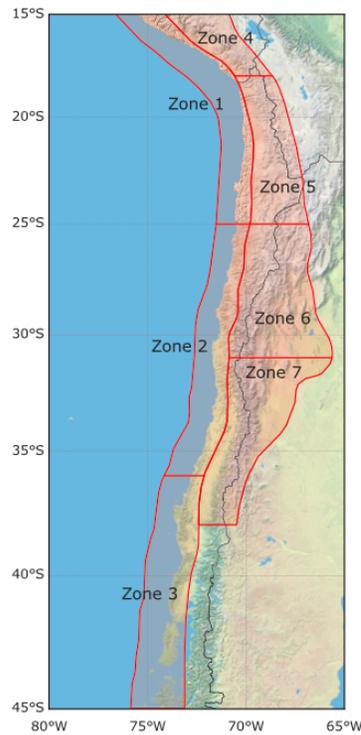


Figura 3.3: Zonificación propuesta en el estudio de Poulous et al. (2018)^[17]

En la Figura 3.4 se muestra la cantidad de eventos para cada zona sismotectónica en la base de datos utilizada de acuerdo a la zonificación de Nuñez.

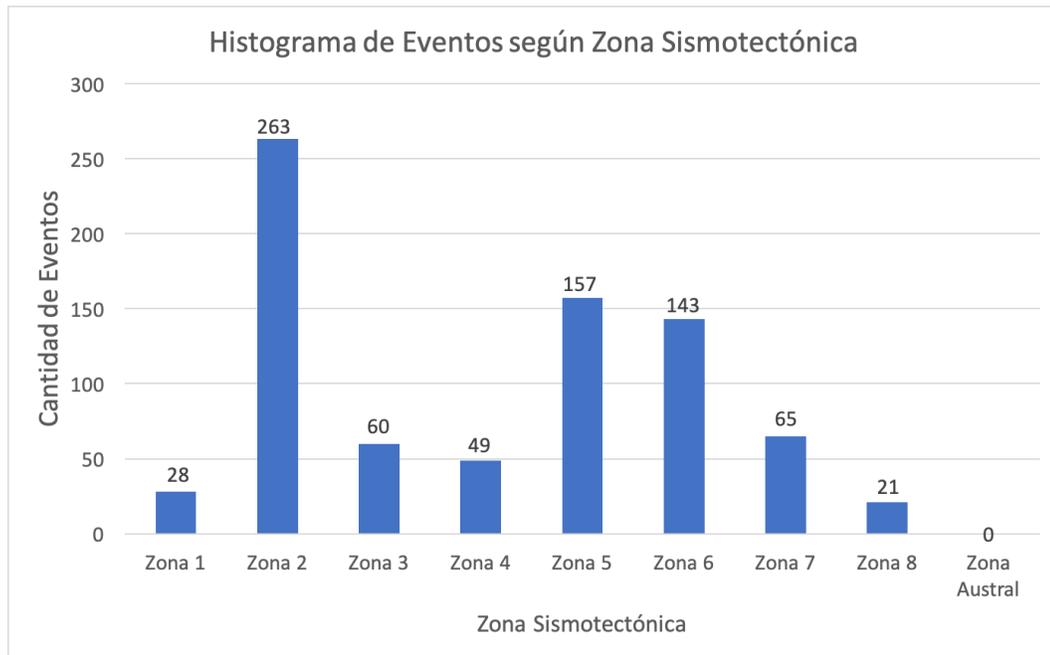


Figura 3.4: Histograma de Eventos según Zona Sismotectónica

3.1.2. Clasificación según Mecanismo

En cuanto al tipo de evento se distinguen dos tipos de mecanismos, sismos interplaca y sismos intraplaca.

Para los eventos provenientes desde la base de datos de PEER la clasificación entre eventos interplaca o eventos intraplaca está dada en función del mecanismo focal de cada sismo. Por otro lado, para la base de datos proveniente desde CSN, la clasificación está dada según la profundidad focal. Los eventos de profundidad focal ≤ 50 km ubicados entre la fosa oceánica y la Cordillera de los Andes son clasificados como sismos interplaca, mientras que los eventos de profundidad focal > 50 km son clasificados como sismos intraplaca.

Dado que la clasificación interplaca o intraplaca para los eventos provenientes desde la base de datos de CSN, se ha realizado en función de la profundidad focal de cada evento, se tiene un número reducido de eventos que se han considerado como sismos interplaca cuando en realidad corresponden a sismos corticales.

Los sismos corticales presentan profundidades focales menores a 15 km y existen modelos de movimiento fuerte que aplican específicamente para este tipo de eventos. Los modelos estudiados en el presente trabajo solo aplican para sismos interplaca e intraplaca, sin embargo, el hecho de haber aplicado estos modelos sobre los sismos corticales presentes en la base de datos, no debiese incidir en la tendencia que presentan los resultados para el análisis residual. Esta consideración puede confirmarse más adelante en la distribución de los valores de Zt según la profundidad focal de los distintos eventos.

En la tabla 3.2 se muestra el resumen de la cantidad de eventos según mecanismo para las distintas zonas definidas por Núñez (2014)^[14] para estudios de peligro sísmico. En la Tabla 3.3, se muestra el total de eventos interplaca, intraplaca y el caso general.

Tabla 3.2: Cantidad de Eventos según Mecanismo para las Zonas Sismotectónicas

Zona	Total de Eventos	Mecanismo	Cantidad de Eventos
1	28	Interplaca	4
		Intraplaca	24
2	263	Interplaca	100
		Intraplaca	163
3	60	Interplaca	11
		Intraplaca	49
4	49	Interplaca	27
		Intraplaca	22
5	157	Interplaca	106
		Intraplaca	51
6	143	Interplaca	101
		Intraplaca	42
7	65	Interplaca	60
		Intraplaca	5
8	21	Interplaca	18
		Intraplaca	3

Tabla 3.3: Total de eventos según Mecanismo

Mecanismo	Cantidad de Eventos
Todos	786
Interplaca	427
Intraplaca	359

En la Figura 3.5 se presenta la distribución espacial de todos los eventos en la base de datos según mecanismo y magnitud a lo largo del territorio chileno. En las Figuras 3.6 y 3.7 se presenta la distribución espacial de los eventos según mecanismo y magnitud para las distintas zonas sismotectónicas.

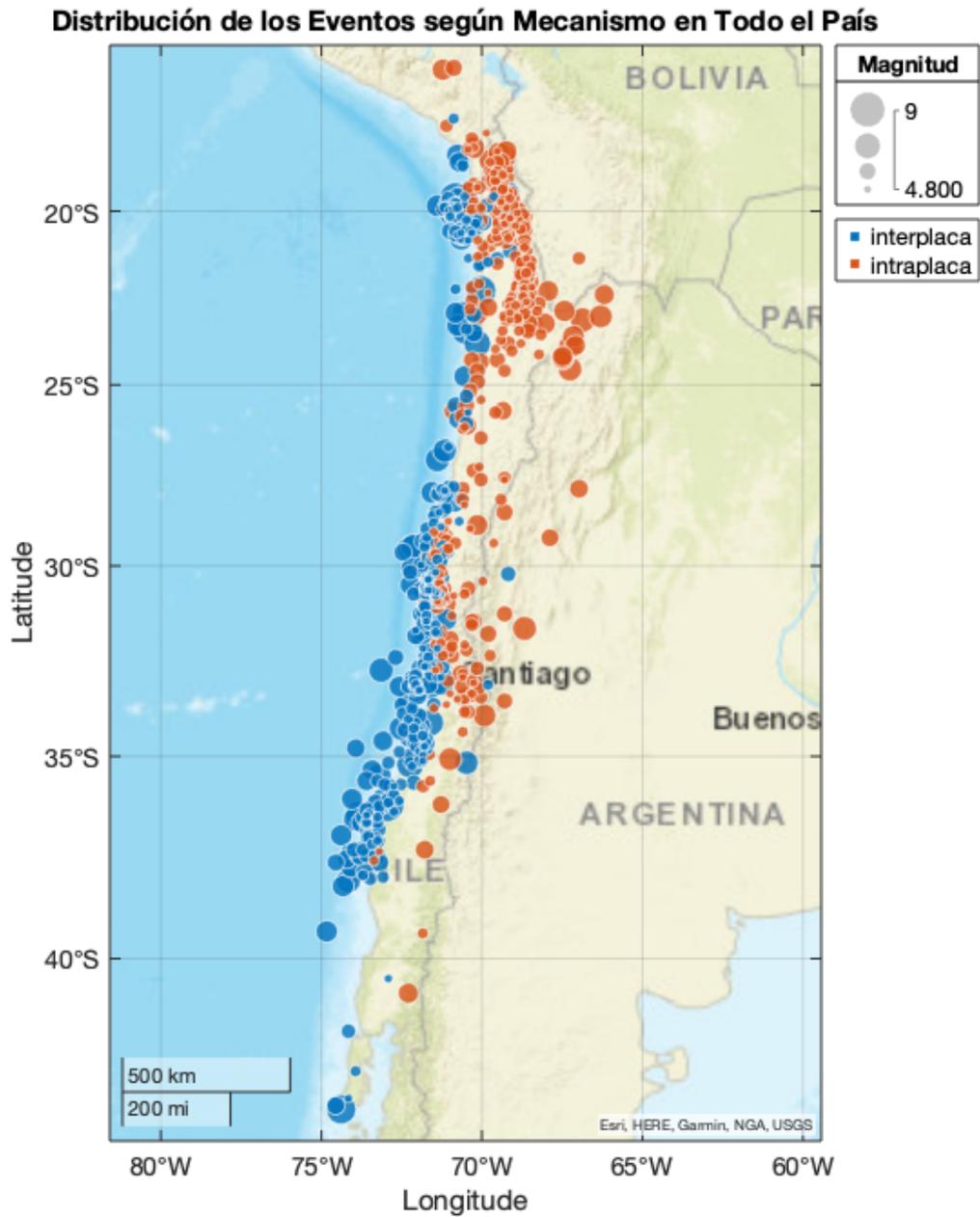
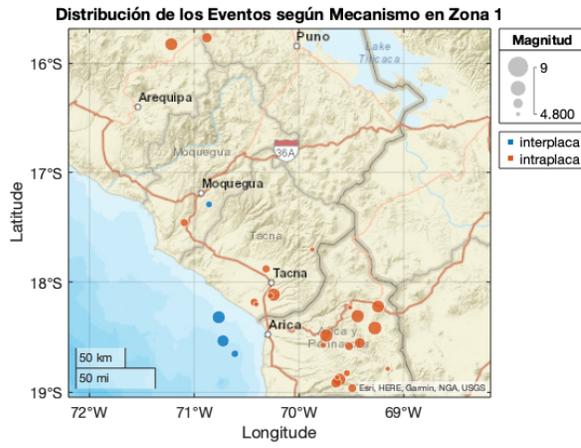
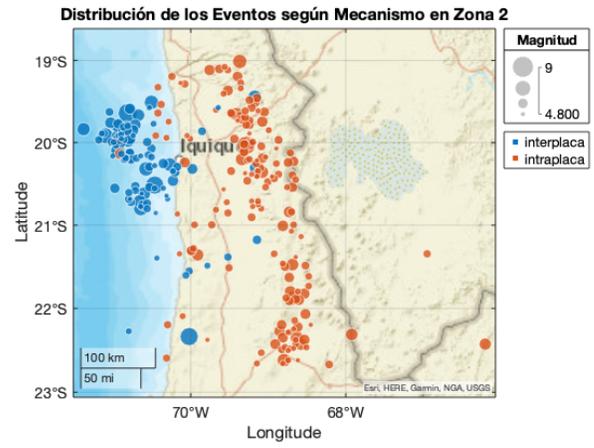


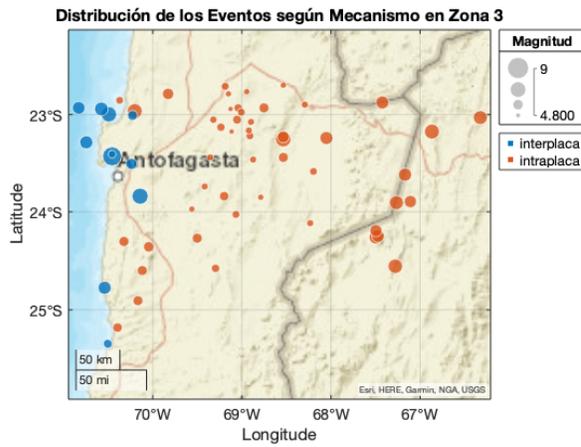
Figura 3.5: Distribución espacial de todos los eventos en la Base de Datos



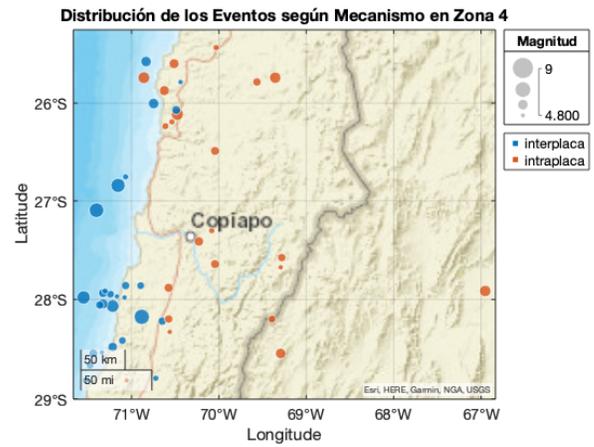
(a) Zona 1



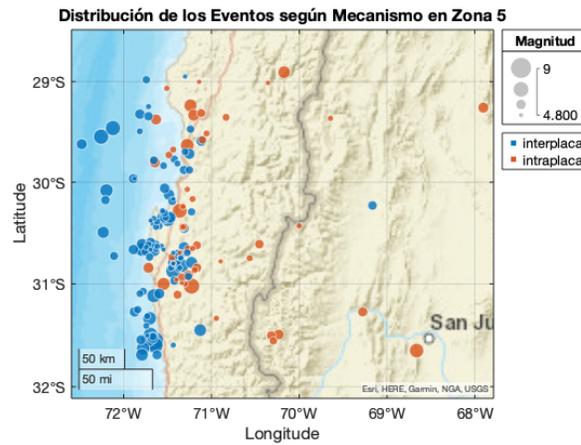
(b) Zona 2



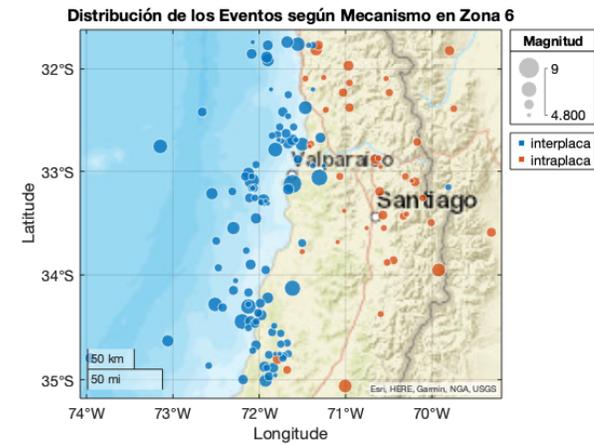
(c) Zona 3



(d) Zona 4



(e) Zona 5



(f) Zona 6

Figura 3.6: Eventos de la Base de Datos desde la Zona 1 a la Zona 6 de Nuñez

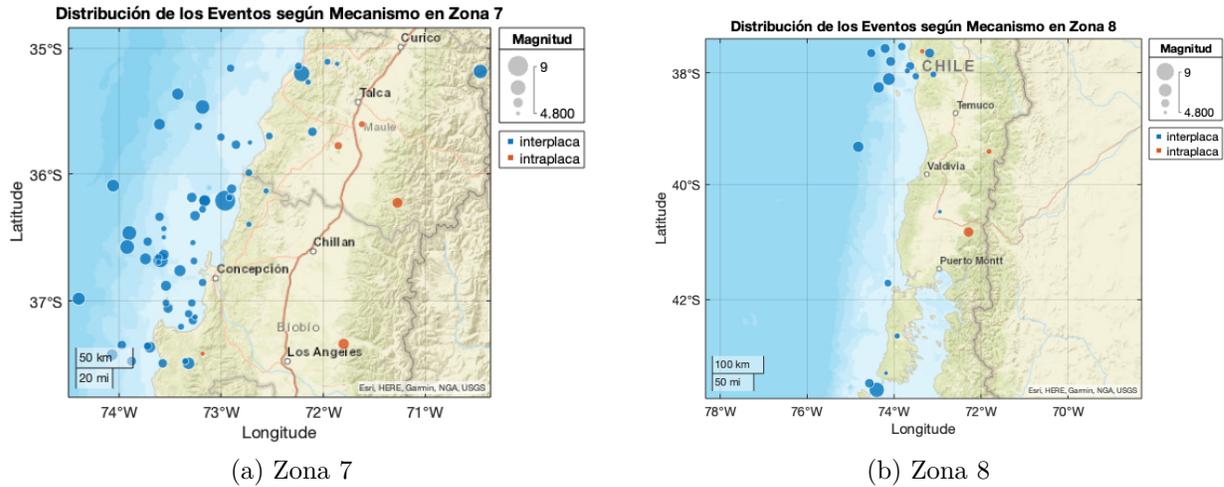


Figura 3.7: Eventos de la Base de Datos desde la Zona 7 a la Zona 8 de Nuñez

3.1.3. Histogramas de Eventos según Fecha

Dentro de la base de datos utilizada destacan el terremoto de Valparaiso 1985 de magnitud Mw 8.0, terremoto de Tocopilla 2007 de magnitud Mw 7.7, el terremoto del Maule 2010 de magnitud Mw 8.8, el terremoto de Iquique 2014 de magnitud Mw 8.1, el terremoto de Illapel 2015 de magnitud Mw 8.3 y el terremoto de Melinka 2015 de magnitud Mw 7.6.

En la Figura 3.8 se muestra la cantidad de eventos por año contra toda la Base de Datos que se ha recopilado para el presente estudio. En las Figuras 3.9 y 3.10, 3.11, 3.12 se muestra la cantidad de eventos por año para cada Zona Sismotectónica.

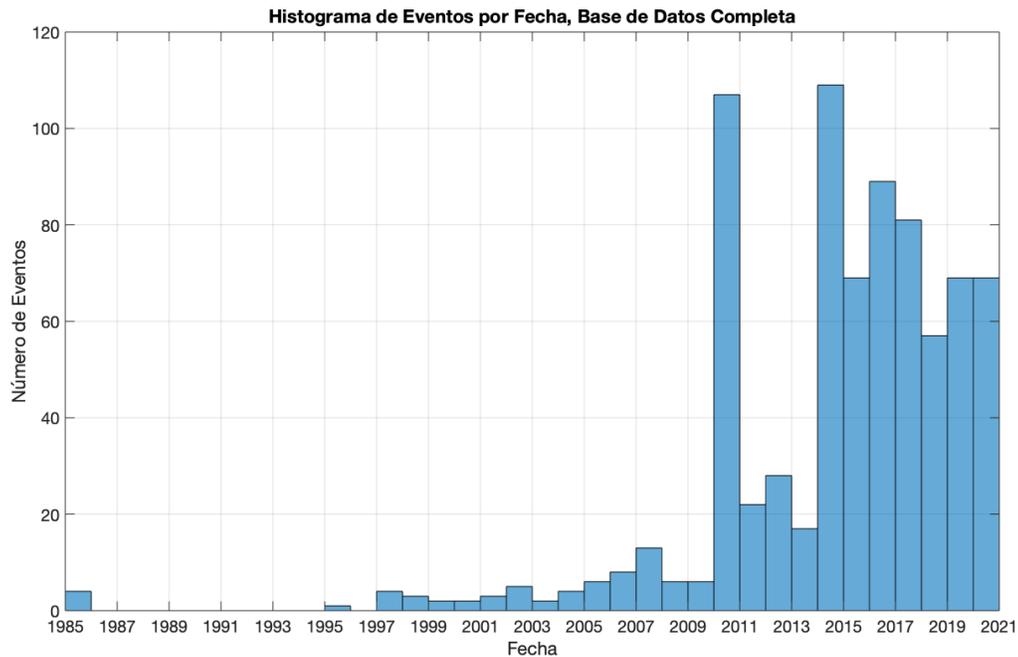
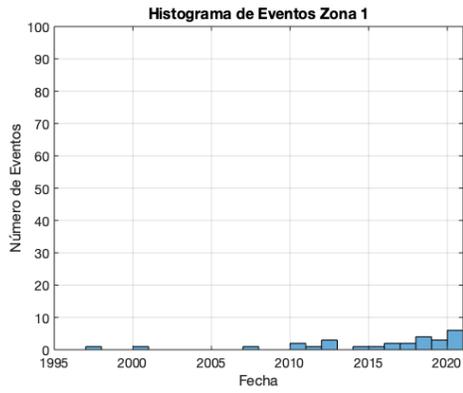
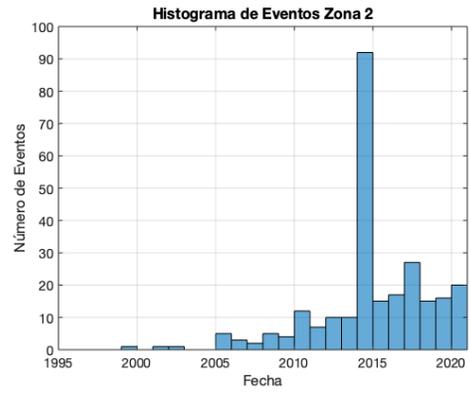


Figura 3.8: Histograma de eventos por fecha contra toda la Base de Datos

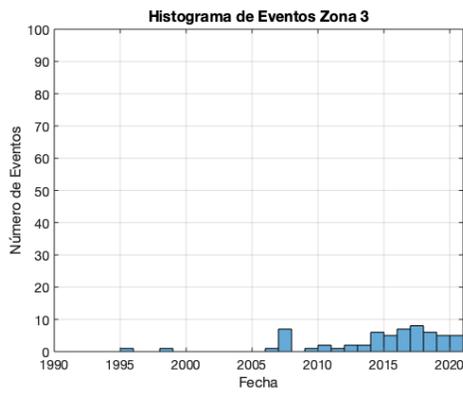


(a) Zona 1

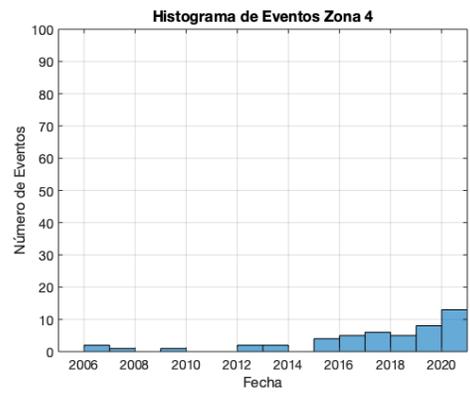


(b) Zona 2

Figura 3.9: Histograma de eventos por fecha Zona 1 a Zona 2 de Nuñez

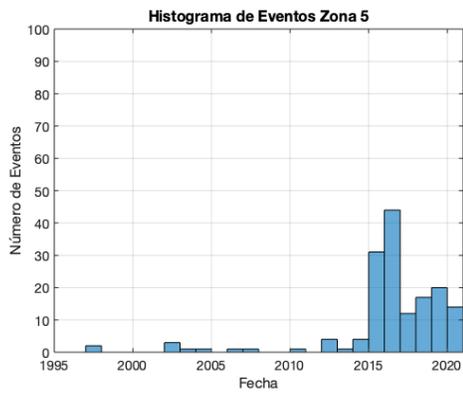


(a) Zona 3

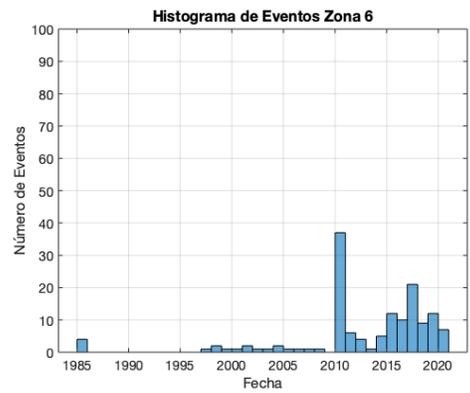


(b) Zona 4

Figura 3.10: Histograma de eventos por fecha Zona 3 y Zona 4 de Nuñez



(a) Zona 5



(b) Zona 6

Figura 3.11: Histograma de eventos por fecha Zona 5 y Zona 6 de Nuñez

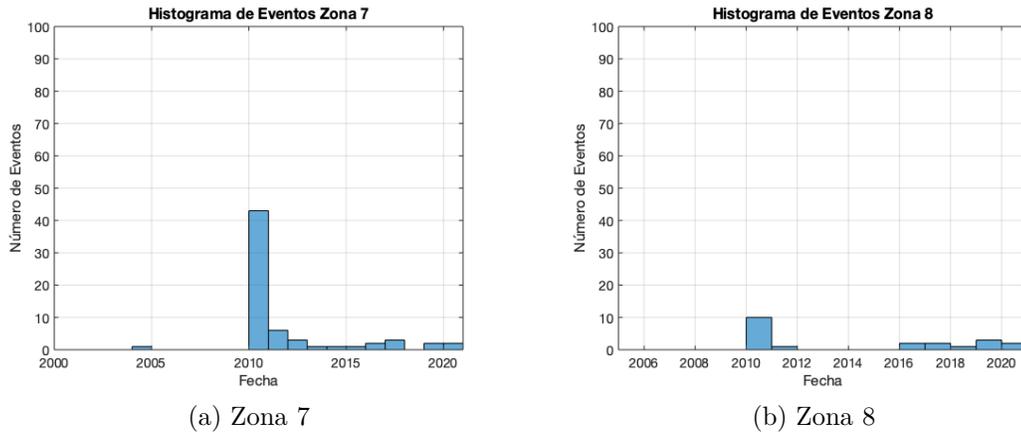


Figura 3.12: Histograma de eventos por fecha Zona 7 y Zona 8 de Nuñez

3.1.4. Histogramas de Eventos según Magnitud

Los eventos considerados para la base de datos son aquellos de magnitudes mayores o iguales a M_w 4.8. El evento de mayor magnitud es el terremoto del Maule 2010 M_w 8.8, de profundidad focal 30.4 km.

En la Figura 3.13 se presenta la cantidad de eventos según magnitud contra toda la Base de Datos recopilada para el presente estudio. En las Figuras 3.14, 3.15, 3.16 y 3.17 se presenta la cantidad de eventos según magnitud M_w para cada Zona de Sismotectónica.

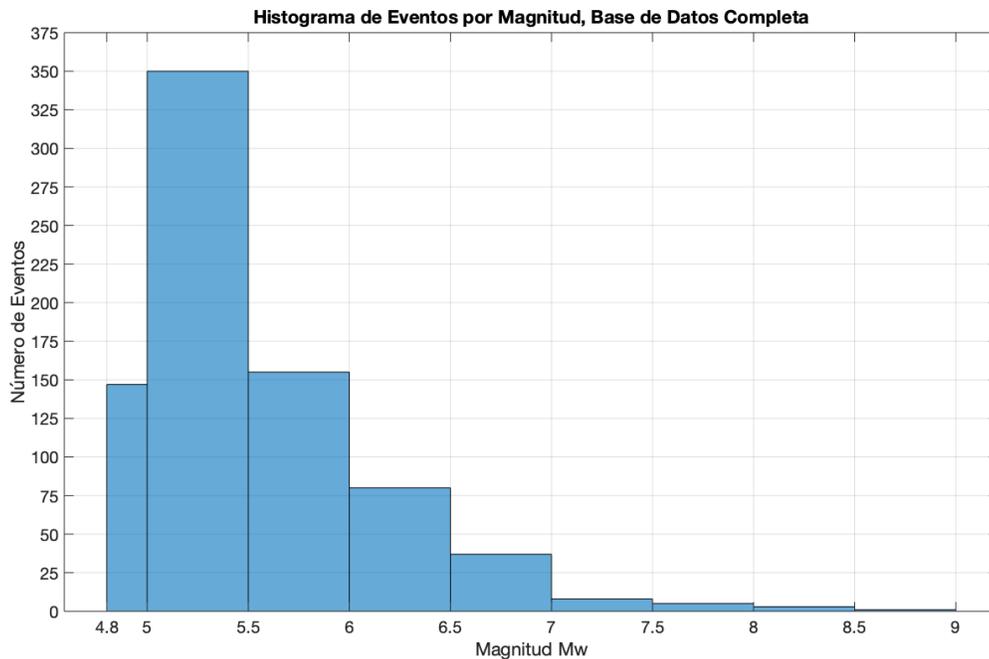
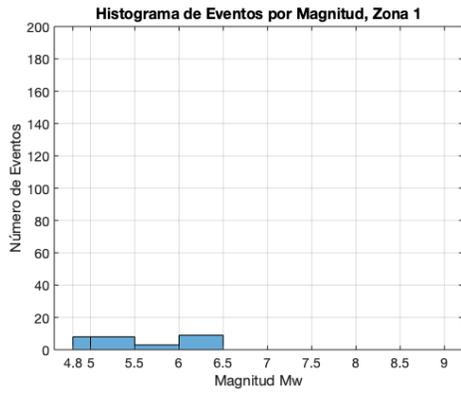
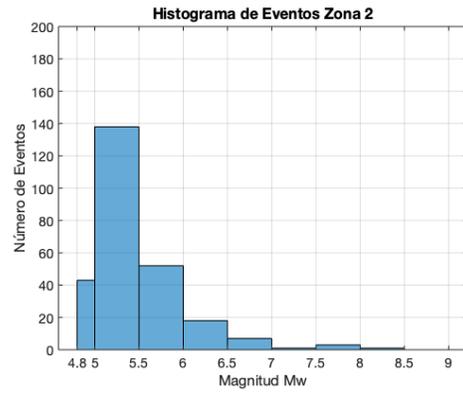


Figura 3.13: Histograma de eventos por magnitud contra Toda la Base de Datos

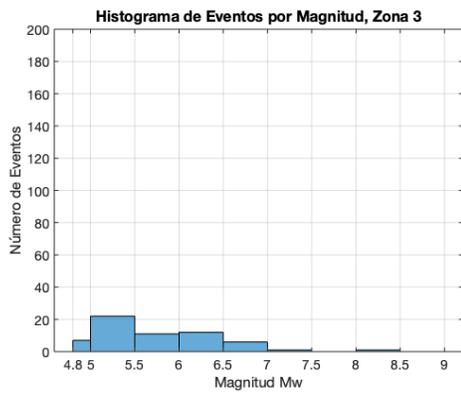


(a) Zona 1

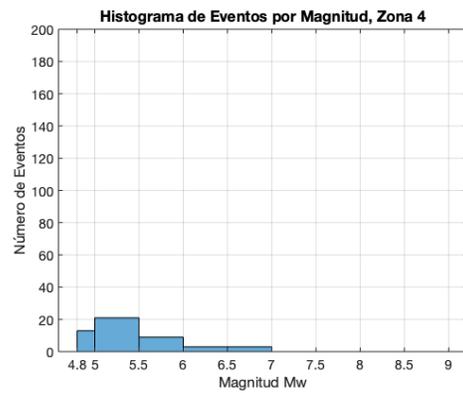


(b) Zona 2

Figura 3.14: Histograma de eventos por magnitud Zona 1 y Zona 2 de Nuñez

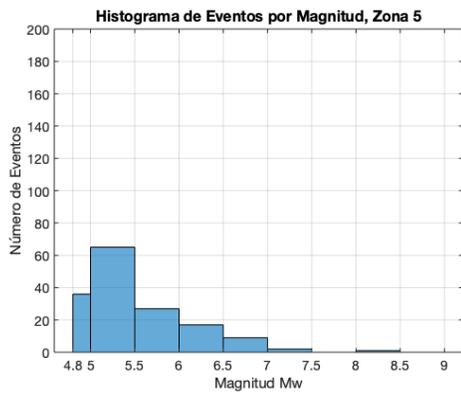


(a) Zona 3

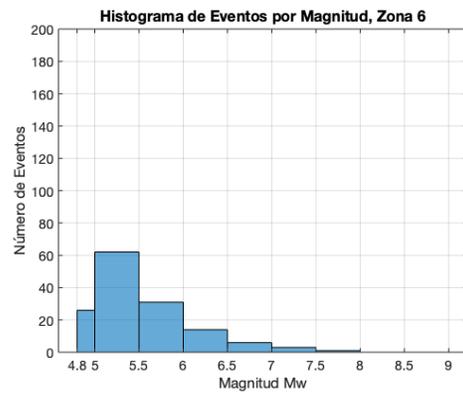


(b) Zona 4

Figura 3.15: Histograma de eventos por magnitud Zona 3 y Zona 4 de Nuñez



(a) Zona 5



(b) Zona 6

Figura 3.16: Histograma de eventos por magnitud Zona 5 y Zona 6 de Nuñez

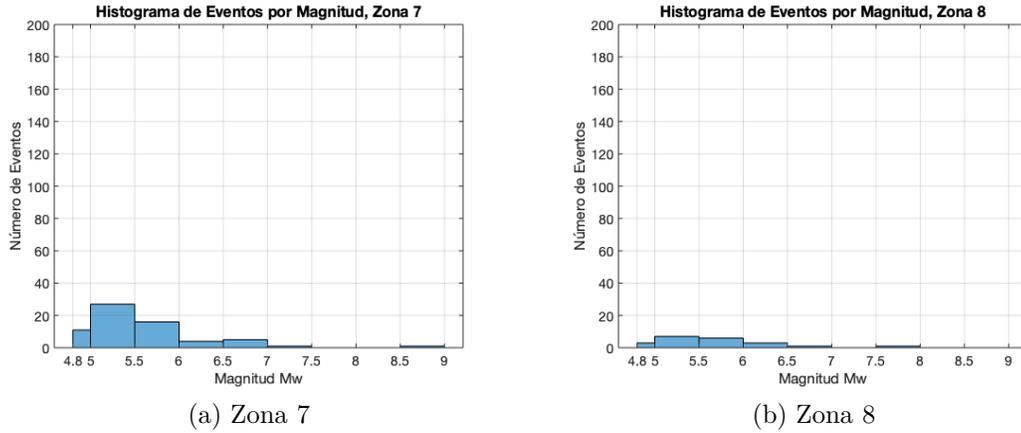


Figura 3.17: Histograma de eventos por magnitud Zona 7 y Zona 8 de Nuñez

3.2. Estaciones

La base de datos utilizada contiene un total de 338 estaciones registradas. Para cada estación se tiene su latitud, longitud y Vs30. El valor del Vs30 se utiliza para clasificar posteriormente las estaciones según tipo de suelo.

3.2.1. Clasificación de sitio según Tipo de Suelo DS61

La Norma Chilena NCH 433 clasifica sísmicamente los suelos o terrenos de fundación en Tipo A, Tipo B, Tipo C, Tipo D, Tipo E y Tipo F. En la Tabla 3.4 se indican los requisitos para clasificar cada tipo de suelo.

Tabla 3.4: Clasificación Sísmica según el terreno de fundación, DS61

Suelo Tipo		Vs30 (m/s)	RQD	qu (MPa)	N1 (golpes/pie)	Su (MPa)
A	Roca, suelo cementado	≥ 900	$\geq 50\%$	≥ 10		
B	Roca blanda o fracturada, suelo muy denso o muy firme	≥ 500		≥ 0.40	≥ 50	
C	Suelo denso o firme	≥ 350		≥ 0.30	≥ 40	
D	Suelo medianamente denso, o firme	≥ 180			≥ 30	≥ 0.05
E	Suelo de compacidad, o consistencia mediana	< 180			≥ 20	< 0.05
F	Suelos Especiales					

Para el presente estudio la clasificación según Tipo de Suelo DS61 se ha realizado únicamente en base a la velocidad de onda de corte en los primeros 30m (Vs30), según se indica en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5: Clasificación Tipo de Suelo en función de Vs30

Tipo Suelo	Vs30 [m/s]
A	≥ 900
B	≥ 500
C	≥ 350
D	≥ 180
E	< 180

En la Tabla 3.6 se muestra la cantidad de estaciones para cada Tipo de Suelo, según la clasificación por Vs30, Tabla 3.5. En la Figura 3.18 se muestra el histograma.

Tabla 3.6: Cantidad de Estaciones según tipo de Suelo

Tipo de Suelo	Cantidad de Estaciones
A	52
B	132
C	101
D	53

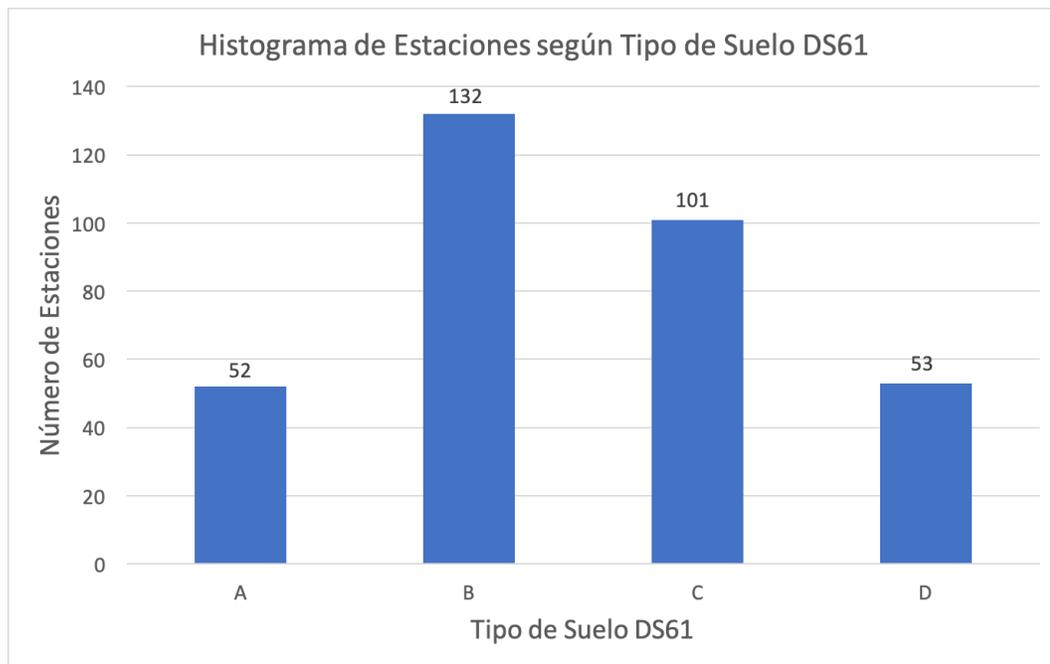


Figura 3.18: Histograma de Estaciones según Tipo de Suelo DS61

3.2.2. Clasificación según Zona Sísmica NCH 433

Según la norma chilena NCH 433 se distinguen tres zonas sísmicas en el territorio nacional, tal como se indica en Figura 3.19. Para el presente estudio también se considera esta división del territorio nacional en el análisis.

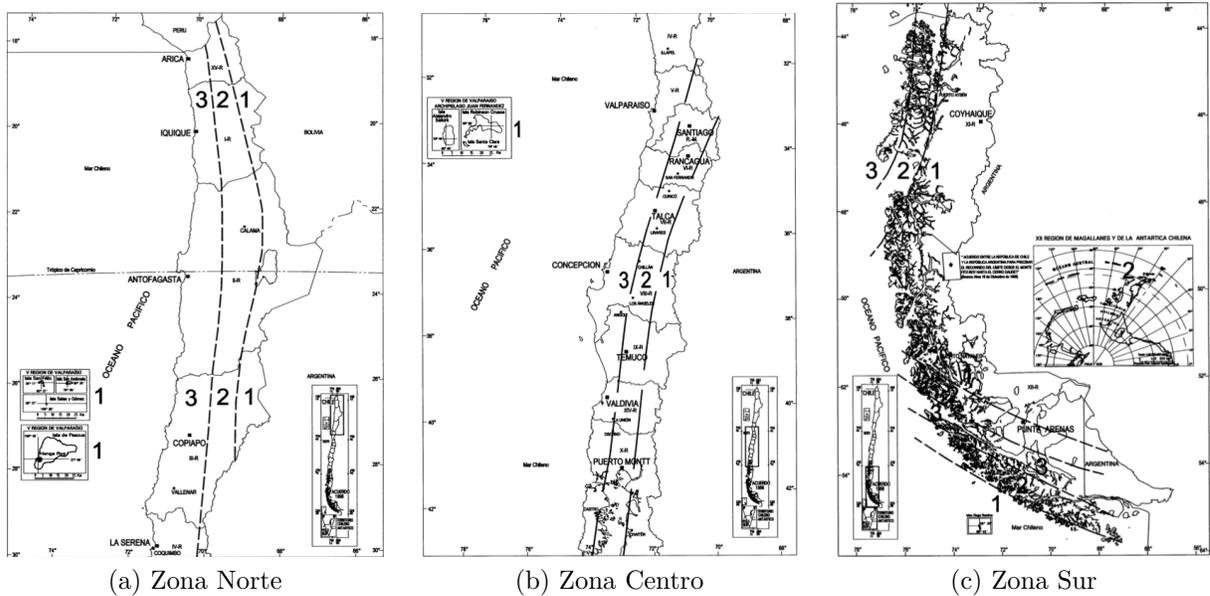


Figura 3.19: Zonificación Sísmica NCH 433

En la Tabla 3.7 se muestra la cantidad de estaciones para cada Zona Sísmica definida por la NCH 433, de acuerdo a la Figura 3.19. En la Figura 3.20 se muestra el histograma de estaciones según la zonificación sísmica de la norma NCH 433.

Tabla 3.7: Cantidad de Estaciones según Zona NCH 433

Zona NCH 433	Cantidad de Estaciones
Zona 1	21
Zona 2	80
Zona 3	237

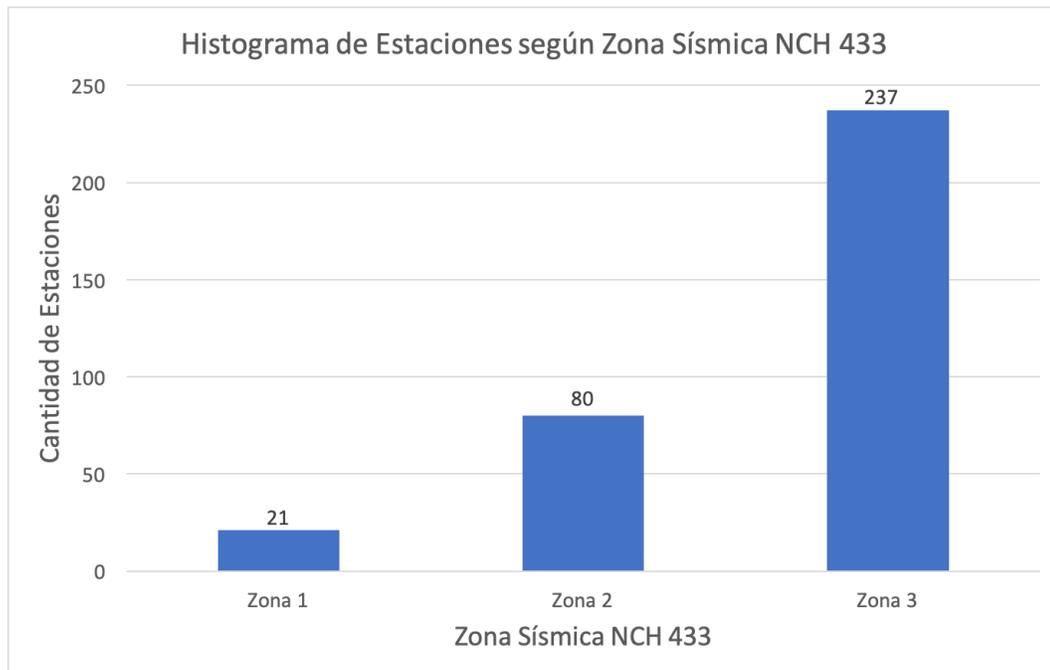


Figura 3.20: Histograma de Estaciones según Zona Sísmica, NCH 433

3.2.3. Origen del Vs30 para las Estaciones de la Base de Datos

La información relativa al Vs30 de las estaciones se extrae en primera instancia desde el Centro Sismológico Nacional (CSN) que en el artículo desarrollado por Felipe Leyton et al. (2018)^[18] sobre caracterización geofísica de estaciones sismológicas en Chile, registra latitud, longitud, Vs30 y $HVSR_{amp}$ para un total de 163 estaciones.

La información relativa al resto de las estaciones es complementada en primera instancia con los datos de Vs30 presentes en los registros recopilados desde el Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) Ground Motion Database^[5]. En segunda instancia, los valores de Vs30 han sido complementados con los datos presentes en los registros históricos de la base de datos SiberRisk^[19]. Cabe destacar que desde SiberRisk^[19] se han considerado únicamente los valores de Vs30 para las estaciones que no contaban con el dato en la base de datos de CSN ni en la base de datos de PEER. Estos valores de Vs30 desde SiberRisk^[19], provienen de estudios de suelo posteriores a los publicados en el Centro Sismológico Nacional y a los valores presentes en los registros de PEER, o bien, han sido inferidos en función de otros parámetros asociados al sitio registrados en SiberRisk^[19]. Cabe destacar que desde SiberRisk^[19] solo se han considerado valores de Vs30, ningún registro de eventos, aceleraciones, o pseudo espectros han sido considerados desde dicha base de datos para el presente trabajo.

En la Tabla 3.8 se muestra la cantidad de estaciones en la base de datos según el origen del Vs30 registrado.

Tabla 3.8: Cantidad de Estaciones según origen de Vs30

Origen Vs30	Cantidad de Estaciones
CSN	136
PEER	173
SiberRisk	29

El Vs30 se determina según la Ecuación 3.1, donde V_{si} corresponde a la velocidad de ondas de corte en el estrato i , en [m/s], h_i el espesor del estrato i en metros y n , el número de estratos en los 30 metros superiores del terreno.

$$V_{s30} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_{si}}} \quad (3.1)$$

3.2.4. Corrección de Vs30

Para las estaciones cuyo valor de Vs30 ha sido complementado con información desde PEER^[5] y SiberRisk^[19]; se han revisado y comparado estos valores con perfiles de velocidad y HVRSR presentes en el Centro Sismológico Nacional para ciertas estaciones. En este contexto, se ha debido corregir el dato de Vs30 para 4 estaciones. Dos de ellas en Concepción, “Colegio Inmaculada Concepción” (CONC) y “Colegio San Pedro de la Paz” (CCSP); una en “Constitución” y por último, la estación “GO04”, en el Observatorio Tololo, Vicuña.

A partir del artículo de Saburoh Midorikawa et al. (2014)^[20] sobre evaluación de efectos de sitio durante el Terremoto del Maule de 2010, se tienen los valores de onda de corte y cotas de la tabla 3.9 para las estaciones a corregir en Concepción. A partir de estos valores se determina el Vs30 según la Ecuación 3.1.

Tabla 3.9: Inverted S-Wave Velocity Models Concepción, Midorikawa et al. (2014)^[20]

CONC		CCSP	
Vs [m/s]	H [m]	Vs30 [m/s]	H [m]
155 (100-250)	3 (1-20)	110 (80-150)	7 (1-10)
220 (200-300)	23 (1-30)	360 (300-450)	38 (10-40)
370 (300-450)	98 (10-200)	510 (450-650)	55 (20-100)
3300	-	1600	-

A partir del informe *Resumen Caracterización Geotecnica Estaciones de Acelerógrafos de la Universidad de Chile* de Rubén Boroschek et al. (2012)^[21] se obtienen los valores de ondas de compresión y de corte estimados a través de ensayos sísmicos downhole para la estación Constitución. Con estos valores, presentes en la Tabla 3.10 y según la Ecuación 3.1 se determina el Vs30 para la Estación en Constitución.

Tabla 3.10: Velocidades de onda de compresión y corte estimados a través de ensayo sísmico downhole para los distintos estratos, estación Constitución, Boroschek et al. (2012)^[20]

Estrato	COTA [m]		Vp [m/s]	Vs [m/s]
	Inicial	Final		
I	0,00	1,50	470	120
II	1,50	3,45	470	180
III	3,45	6,00	1700	180
IV	6,00	10,00	1700	290
V	10,00	22,50	1700	490
VI	22,50	40,80	1700	700
VII	40,80	47,20	2240	700
VIII	47,20	50,40	2240	700

Para la Estación “GO04” en el Observatorio Tololo, Vicuña, de acuerdo al perfil HVRSR de la Figura 3.21, disponible en el Centro Sismológico Nacional se ha determinado que el terreno de la estación corresponde a un suelo Tipo D para lo cual se ha estimado un Vs30 de 340 m/s.

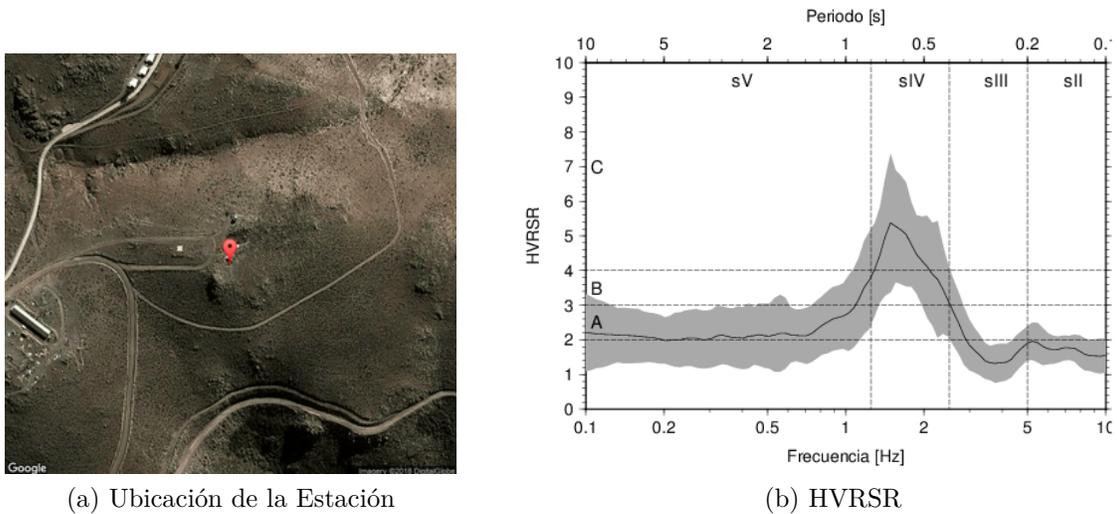


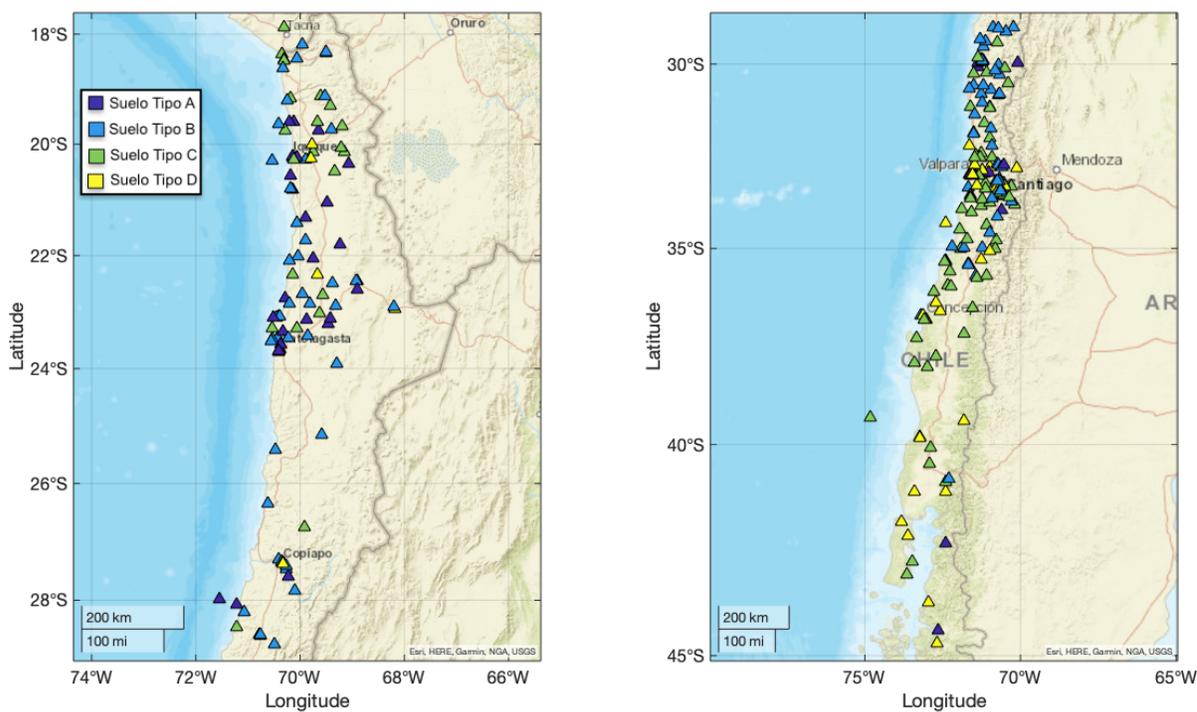
Figura 3.21: Estación GO04 Observatorio Tololo, Vicuña, Centro Sismológico Nacional^[22]

En la Tabla 3.11 se han detallado los valores finales de Vs30 para las estaciones en cuestión, así como también la clasificación correspondiente para tipo de suelo en función del Vs30.

Tabla 3.11: Resumen de las correcciones de Vs30

Estacion	Vs30 [m/s]	Tipo de Suelo
CONC	223	D
CCSP	235	D
Constitución	343	D
GO04	340	D

Finalmente, considerando todas las Estaciones registradas e incluyendo aquellas cuyo Vs30 se ha corregido, se tiene la siguiente distribución espacial de las estaciones a lo largo del territorio nacional según el tipo de suelo.



(a) Zona 1 a Zona 4 de Nuñez

(b) Zona 5 a Zona 8 de Nuñez

Figura 3.22: Mapa de las Estaciones según tipo de suelo

3.3. Registros

Desde PEER se tienen las aceleraciones máximas del suelo (PGA) y los pseudo espectros de aceleración para períodos entre 0.01 segundos y 10 segundos, donde se ha considerado la media geométrica entre las componentes horizontales y un amortiguamiento del 5 %.

Para CSN se tienen los registros de aceleraciones para las componentes horizontales y para la componente vertical. Estos registros han sido procesados con un programa de integración a partir del cuál se han corregido los registros considerando una frecuencia máxima de 0.4

veces la frecuencia de muestreo y se han obtenido velocidades y desplazamientos para cada componente. Una vez corregidos estos registros, se ha determinado PGA, como la máxima aceleración registrada en cada componente horizontal y se han calculado los pseudo espectros de aceleración para la media geométrica de las componentes horizontales con un amortiguamiento del 5%.

Con la finalidad de considerar únicamente registros de intensidad importante se ha restringido la base de datos bajo las siguientes condiciones:

- $PGA \geq 0.01$ [g].
- Distancia hipocentral entre la fuente y estación ≤ 300 [km].
- Magnitud $M_w \geq 4.8$ para el evento fuente.
- En total se tienen 4646 pares evento - estación.

En la Tabla 3.12 se muestra la cantidad total de registros considerados en la base de datos. También se muestra la cantidad de registros asociados a eventos interplaca e intraplaca respectivamente.

Tabla 3.12: Cantidad de Registros según Mecanismo

Mecanismo	Cantidad de Registros
Todos	4646
Interplaca	2279
Intraplaca	2367

3.3.1. Distribución de PGA vs Distancia Hipocentral

Considerando las condiciones descritas recientemente, se tienen los siguientes gráficos de PGA v/s distancia hipocentral para cada registro en la base de datos recopilada. En la Figura 3.23 se muestra la distribución para la Base de Datos Completa, en las Figuras 3.24, 3.25, 3.26 y 3.27 se muestra la distribución segmentada según las Zonas Sismotectónicas.

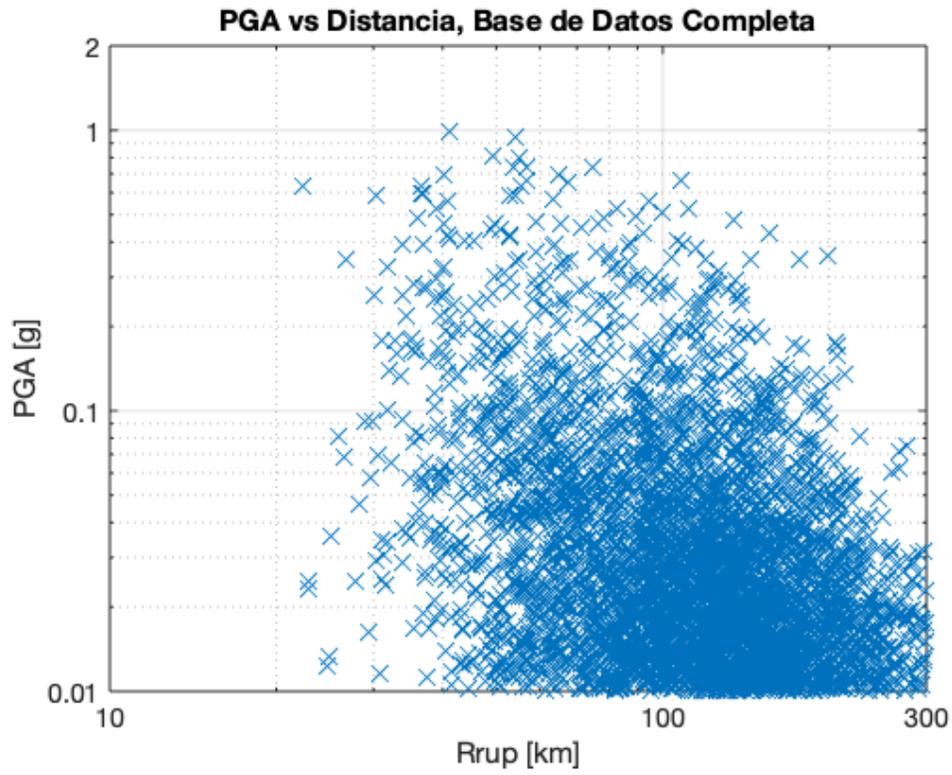


Figura 3.23: PGA vs Distancia Hipocentral, Base de Datos Completa

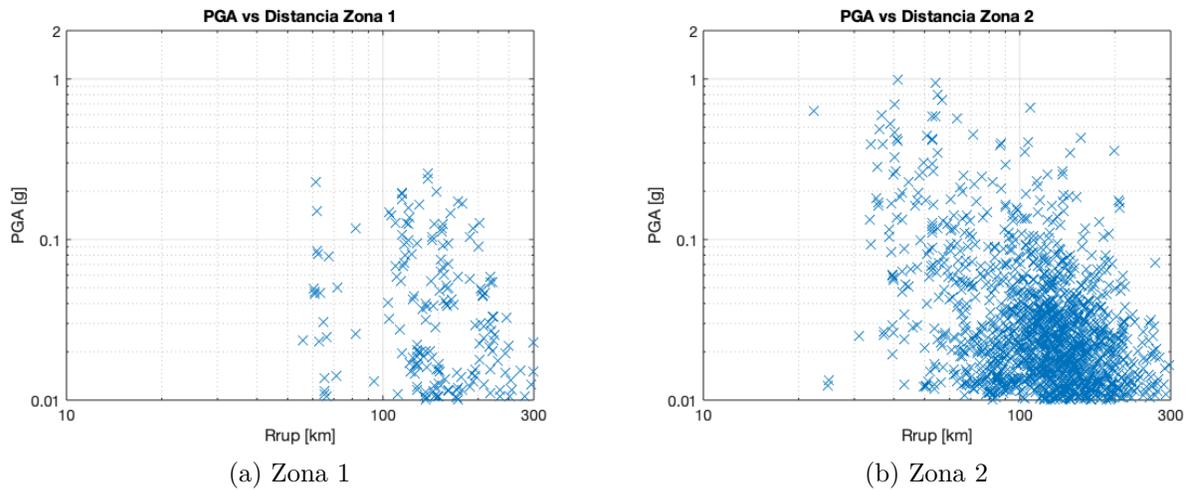
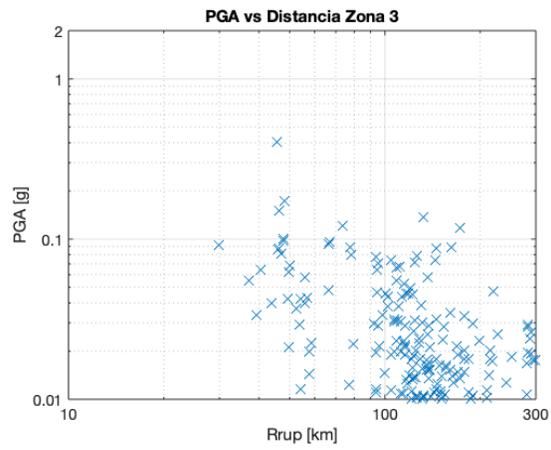
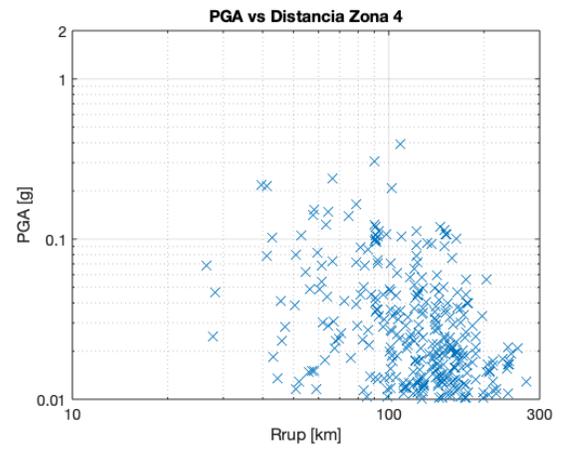


Figura 3.24: PGA vs Distancia Hipocentral según Zona de Nuñez (Zona 1 y Zona 2)

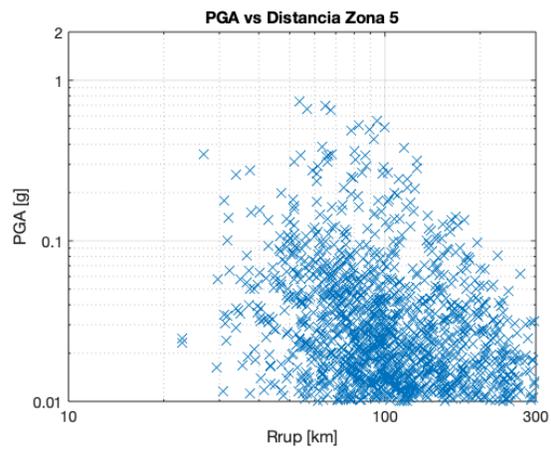


(a) Zona 3

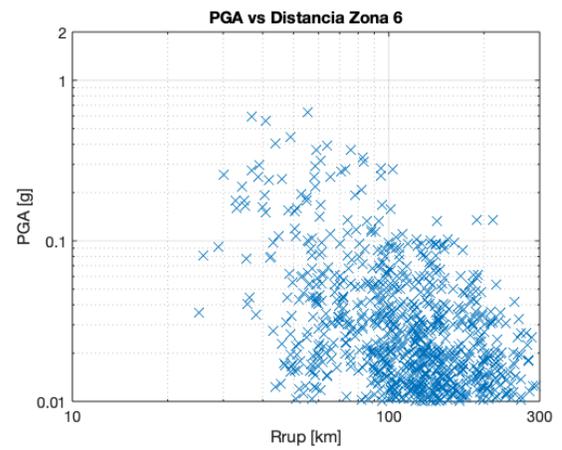


(b) Zona 4

Figura 3.25: PGA vs Distancia Hipocentral según Zona de Nuñez (Zona 3 y Zona 4)

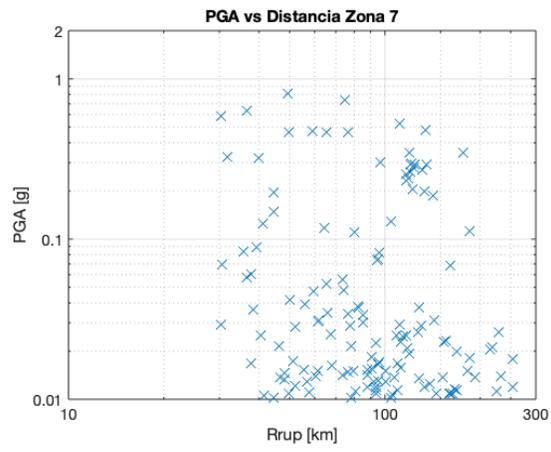


(a) Zona 5

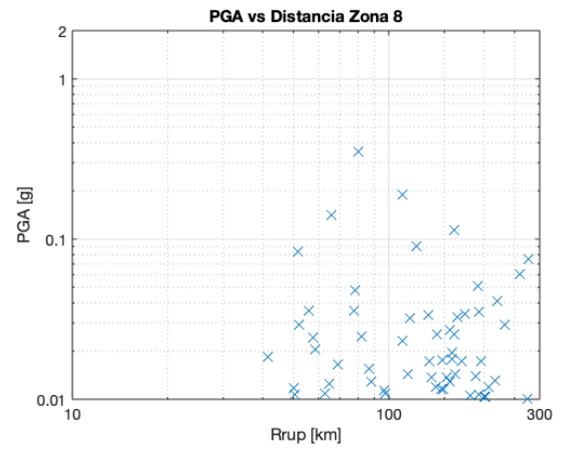


(b) Zona 6

Figura 3.26: PGA vs Distancia Hipocentral según Zona de Nuñez (Zona 5 y Zona 6)



(a) Zona 7



(b) Zona 8

Figura 3.27: PGA vs Distancia Hipocentral según Zona de Nuñez (Zona 7 y Zona 8)

3.3.2. Distribución de Magnitudes vs Distancia Hipocentral

Considerando las condiciones descritas recientemente, se tienen los siguientes gráficos de Magnitud Mw v/s distancia hipocentral para cada registro en la base de datos recopilada. En la Figura 3.28 se muestra la distribución para la Base de Datos Completa, en las Figuras 3.29, 3.30, 3.31 y 3.32 se muestra la distribución segmentada según las Zonas Sismotectónicas.

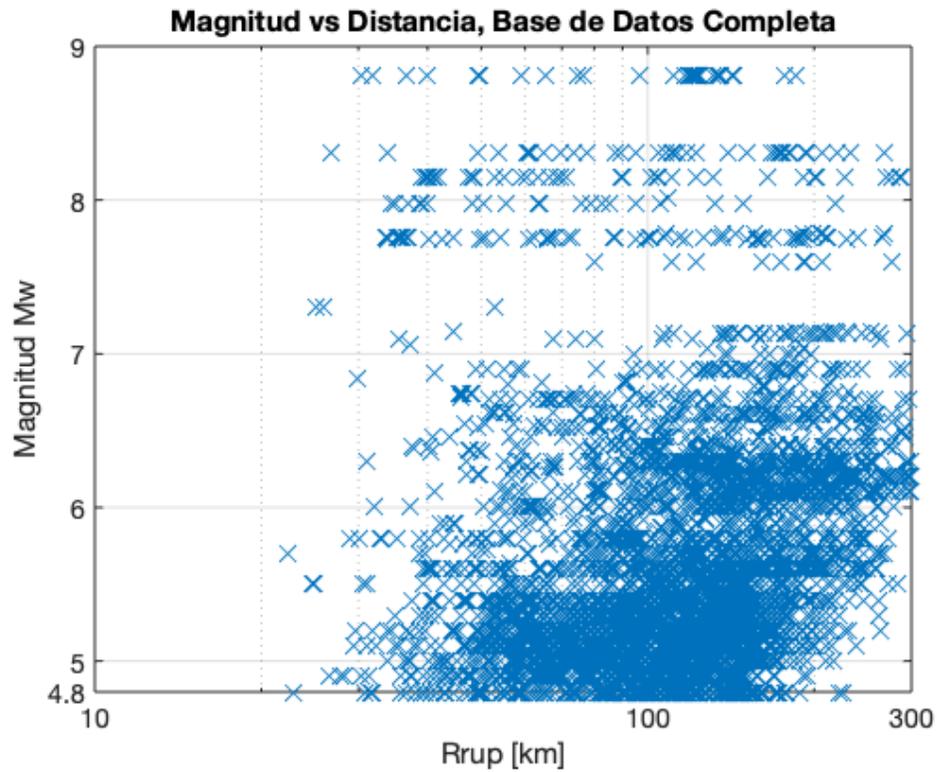


Figura 3.28: Magnitud vs Distancia Hipocentral, Base de Datos Completa

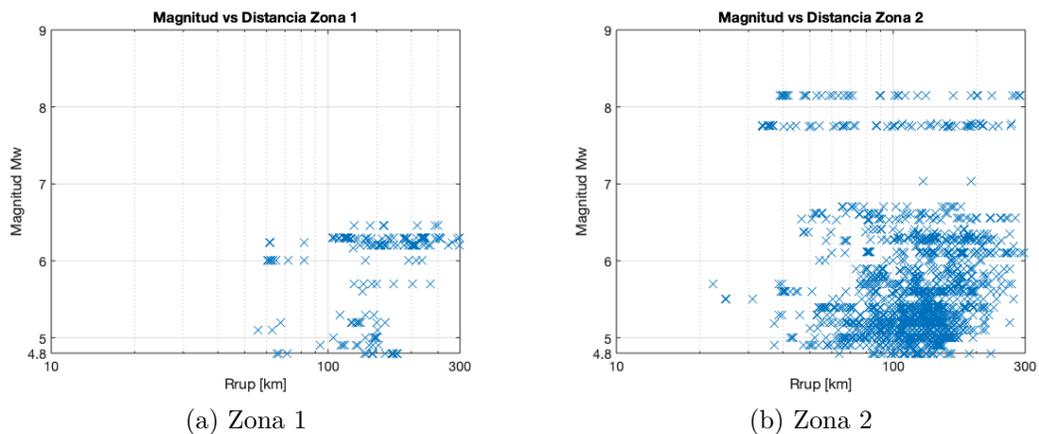
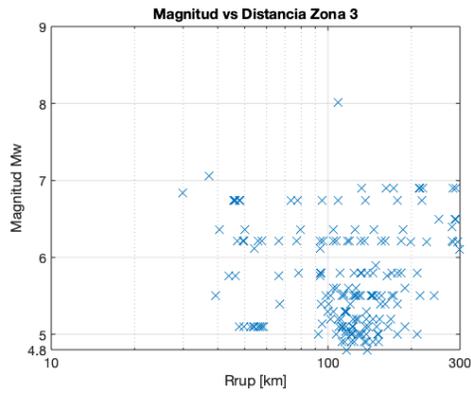
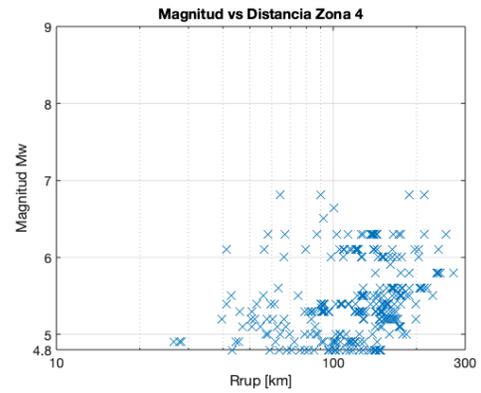


Figura 3.29: Magnitud vs Distancia según Zona de Nuñez (Zona 1 y Zona 2)

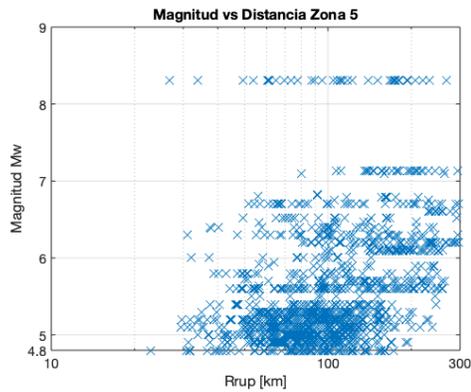


(a) Zona 3

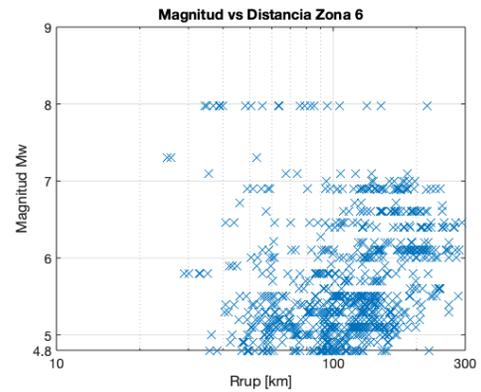


(b) Zona 4

Figura 3.30: Magnitud vs Distancia según Zona de Nuñez (Zona 3 y Zona 4)

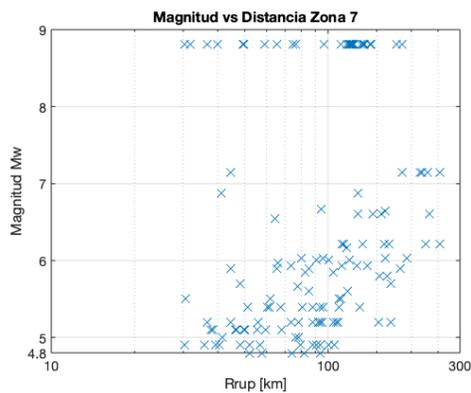


(a) Zona 5

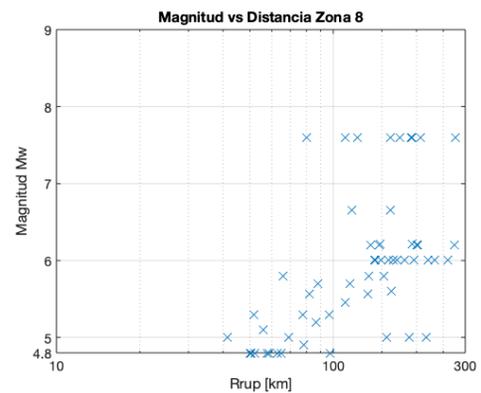


(b) Zona 6

Figura 3.31: Magnitud vs Distancia según Zona de Nuñez (Zona 5 y Zona 6)



(a) Zona 7



(b) Zona 8

Figura 3.32: Magnitud vs Distancia según Zona de Nuñez (Zona 7 y Zona 8)

3.3.3. Registros según Tipo de Mecanismo

En la Figura 3.33 se muestra la cantidad de registros en cada zona sismotectónica según mecanismo.

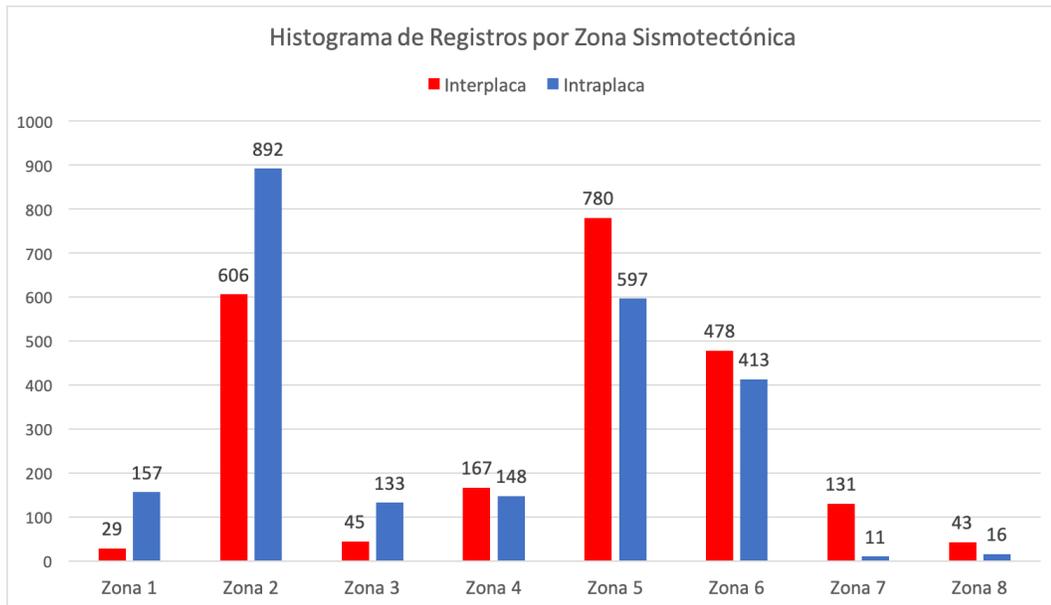


Figura 3.33: Histograma de Registros por Zona Sismotectónica según Mecanismo

A continuación se presentan las distribuciones de PGA vs distancia hipocentral y las distribuciones de magnitud vs distancias hipocentral, distinguiendo entre registros asociados a eventos interplaca y registros asociados a eventos intraplaca.

3.3.3.1. Distribución de PGA vs Distancia Hipocentral según Mecanismo

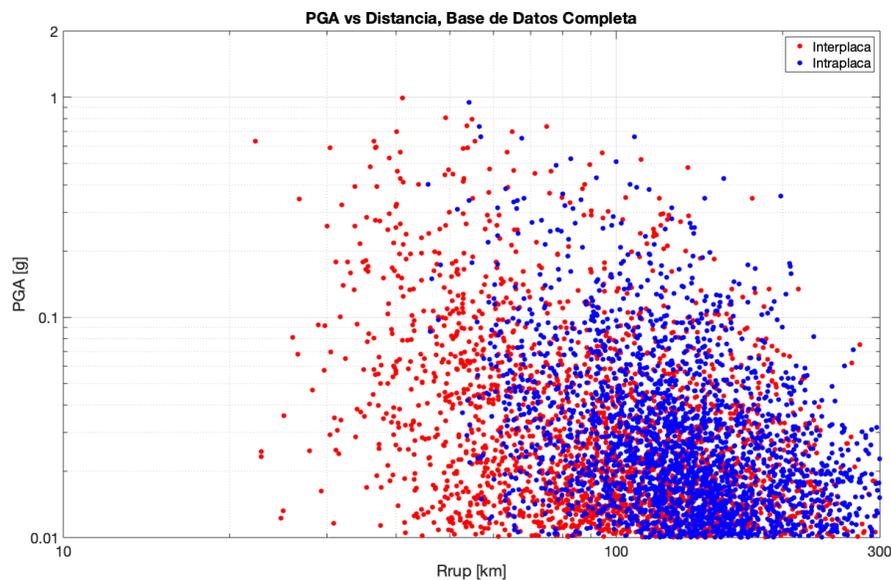
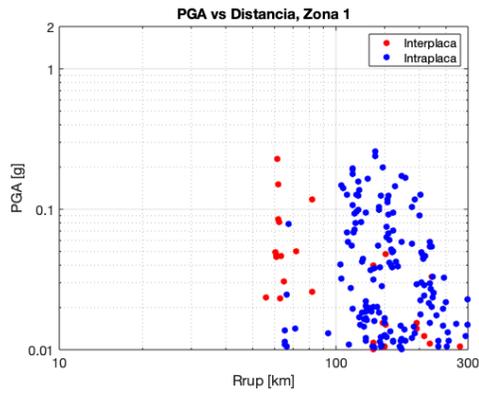
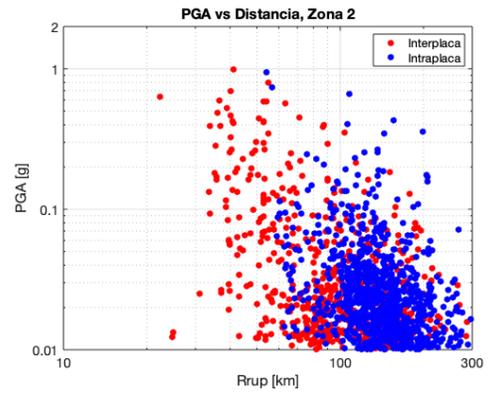


Figura 3.34: PGA vs Distancia Hipocentral según Mecanismo, Base de Datos Completa

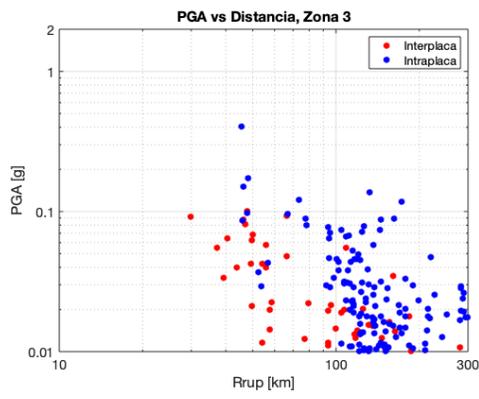


(a) Zona 1

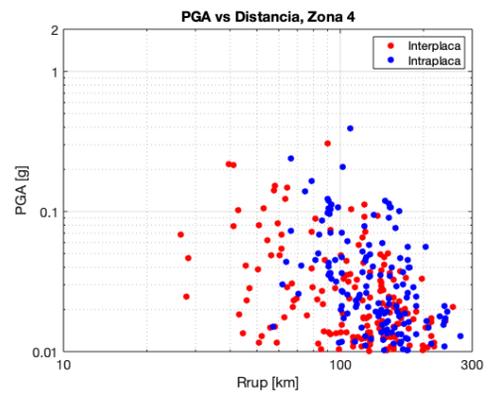


(b) Zona 2

Figura 3.35: PGA vs Distancia según Mecanismo, Zona 1 y Zona 2 de Nuñez

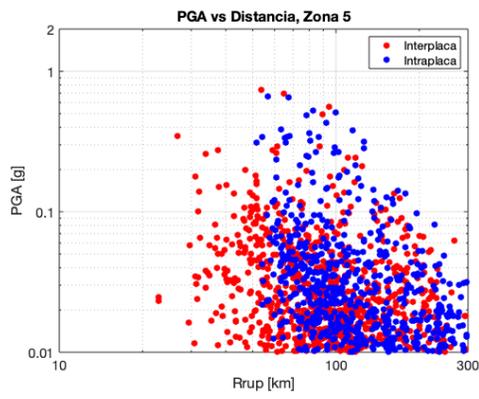


(a) Zona 3

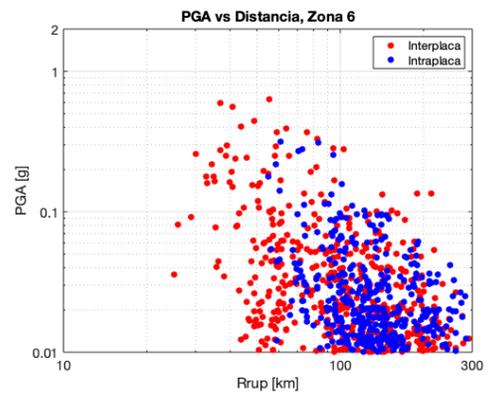


(b) Zona 4

Figura 3.36: PGA vs Distancia según Mecanismo, Zona 3 y Zona 4 de Nuñez



(a) Zona 5



(b) Zona 6

Figura 3.37: PGA vs Distancia según Mecanismo, Zona 5 y Zona 6 de Nuñez

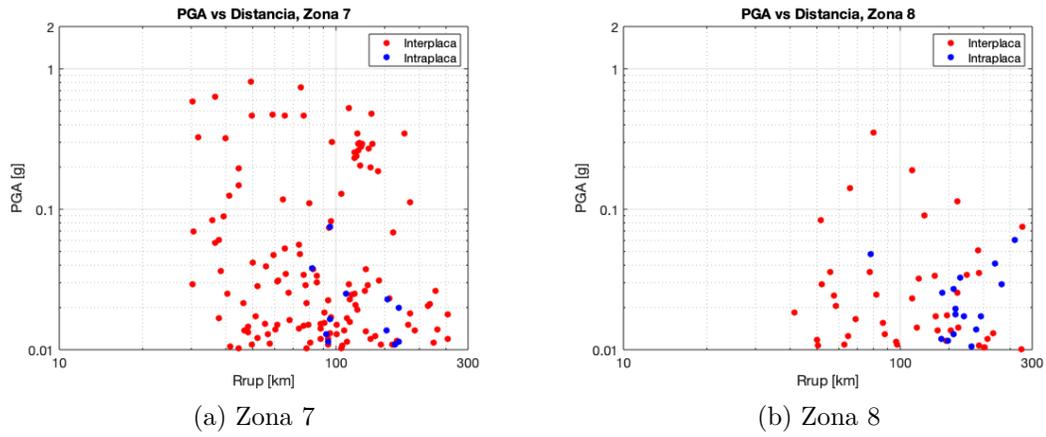


Figura 3.38: PGA vs Distancia según Mecanismo, Zona 7 y Zona 8 de Nuñez

3.3.3.2. Distribución de Magnitudes vs Distancia Hipocentral según Mecanismo

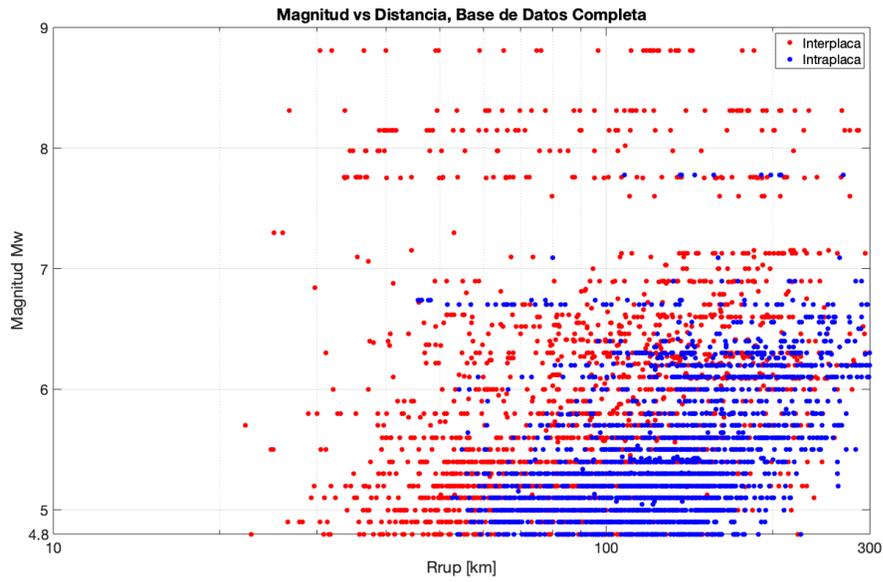
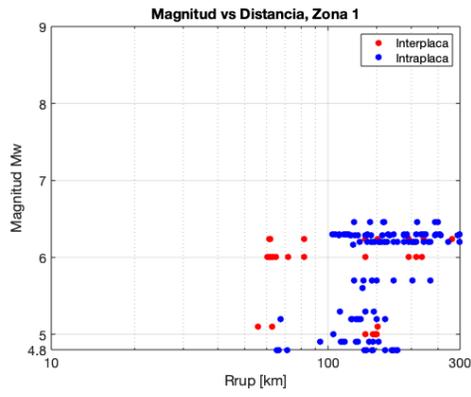
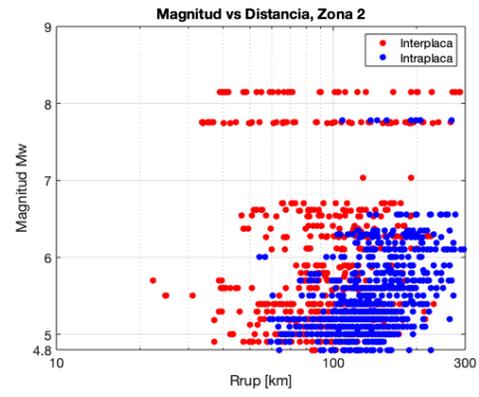


Figura 3.39: Magnitud vs Distancia Hipocentral según Mecanismo, Base de Datos Completa

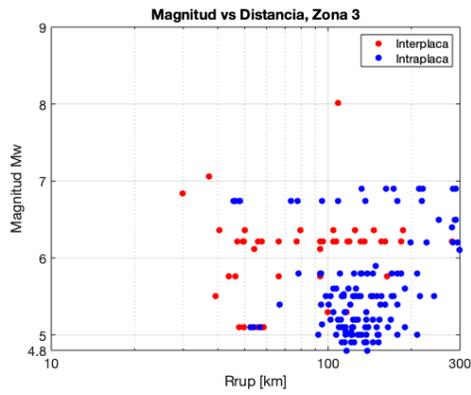


(a) Zona 1

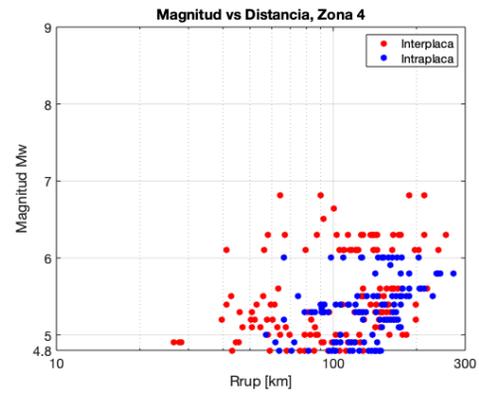


(b) Zona 2

Figura 3.40: Magnitudes vs Distancia según Mecanismo, Zona 1 y Zona 2 de Nuñez

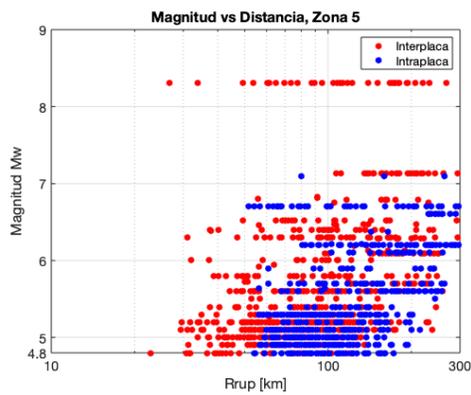


(a) Zona 3

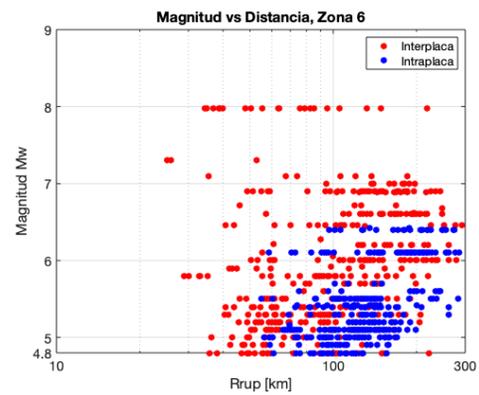


(b) Zona 4

Figura 3.41: Magnitudes vs Distancia según Mecanismo, Zona 3 y Zona 4 de Nuñez



(a) Zona 5



(b) Zona 6

Figura 3.42: Magnitudes vs Distancia según Mecanismo, Zona 5 y Zona 6 de Nuñez

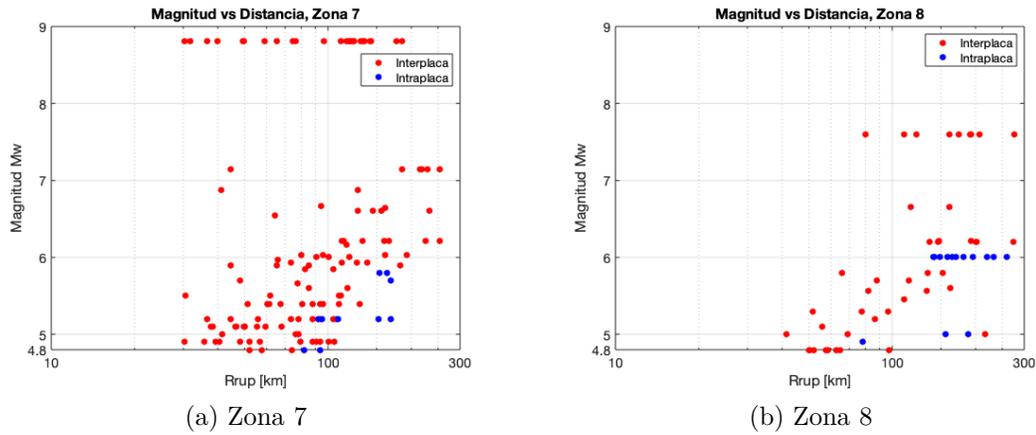


Figura 3.43: Magnitudes vs Distancia según Mecanismo, Zona 7 y Zona 8 de Nuñez

3.3.4. Registros según Tipo de Suelo, DS61

En la Tabla 3.13 se muestra la cantidad de registros de aceleraciones en la base de datos para cada Tipo de Suelo, DS61.

Tabla 3.13: Cantidad de Registros según Tipo de Suelo

Tipo Suelo	Cantidad de Registros
A	810
B	1868
C	1253
D	715

En la Figura 3.44 se muestra un histograma con la cantidad de registros para cada Tipo de Suelo DS61.

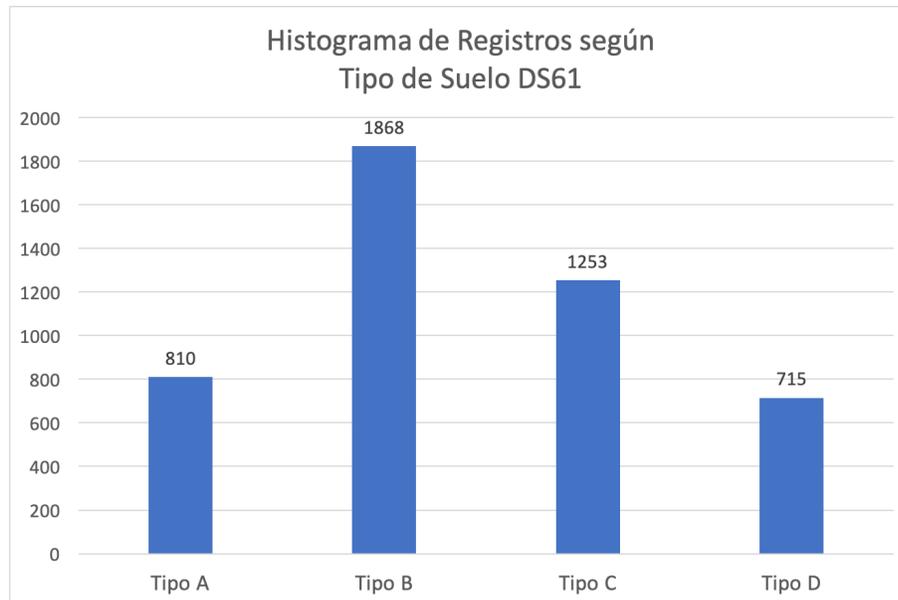


Figura 3.44: Histograma de registros según Tipo de Suelo DS61

En la Figura 3.45 se muestra un histograma con la cantidad de registros para cada Zona Sismotectónica según Tipo de Suelo DS61.

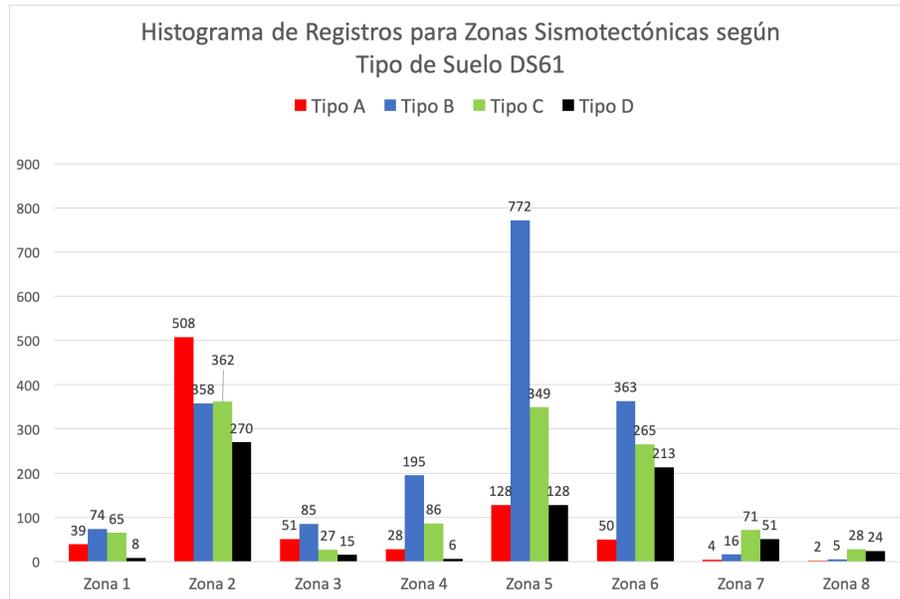
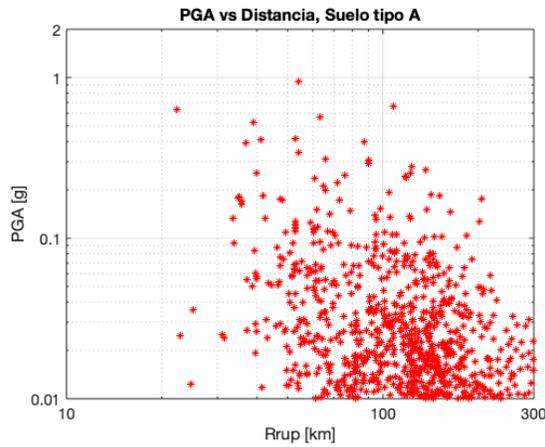
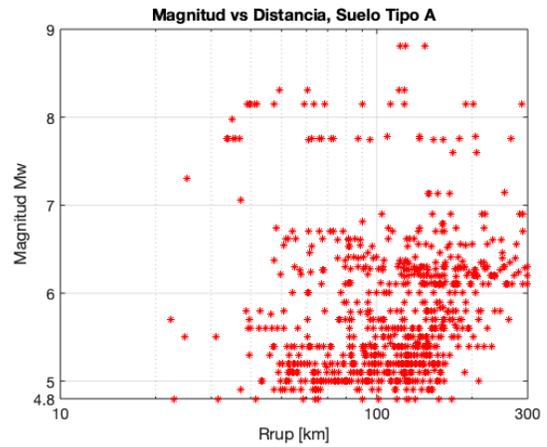


Figura 3.45: Histograma de registros para las Zonas Sismotectónicas según Tipo de Suelo DS61

En las Figuras 3.46, 3.47, 3.48 y 3.49 se muestra la distribución de PGA, Magnitudes y Distancias Hipocentrales para cada tipo de suelo en la base de datos.

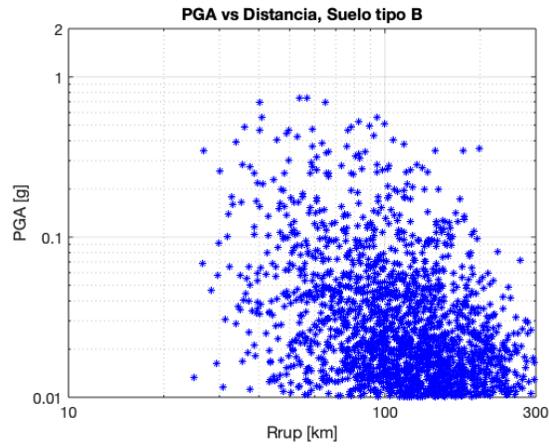


(a) Distribución PGA vs Distancia

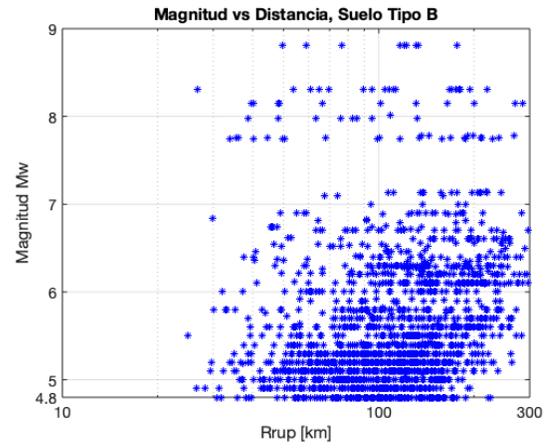


(b) Distribución Magnitud vs Distancia

Figura 3.46: Distribución por PGA, magnitud y distancia hipocentral de los registros de aceleraciones de la base de datos en suelo Tipo A

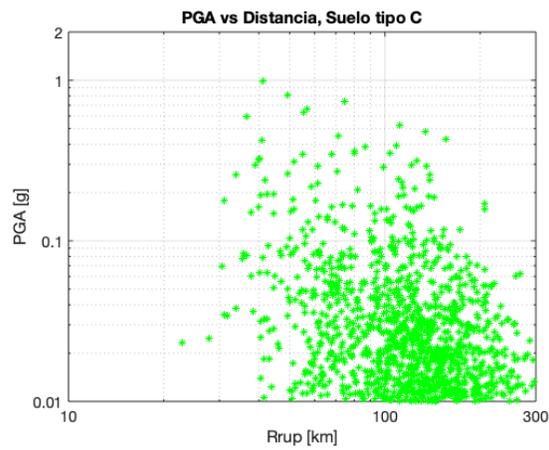


(a) Distribución PGA vs Distancia

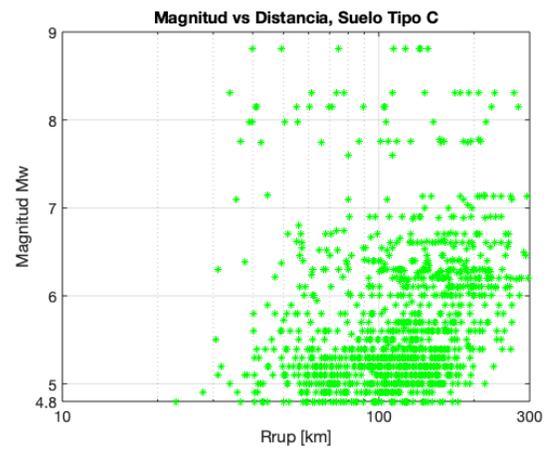


(b) Distribución Magnitud vs Distancia

Figura 3.47: Distribución por PGA, magnitud y distancia hipocentral de los registros de aceleraciones de la base de datos en suelo Tipo B

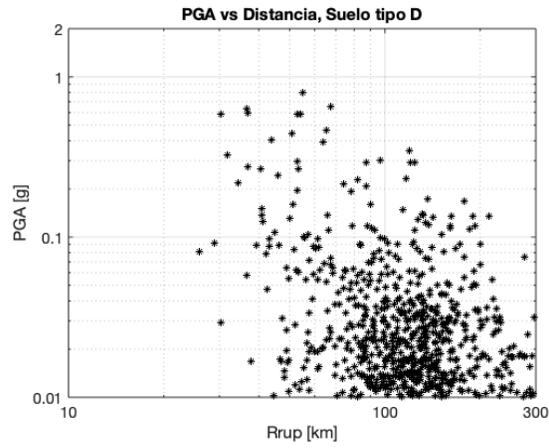


(a) Distribución PGA vs Distancia

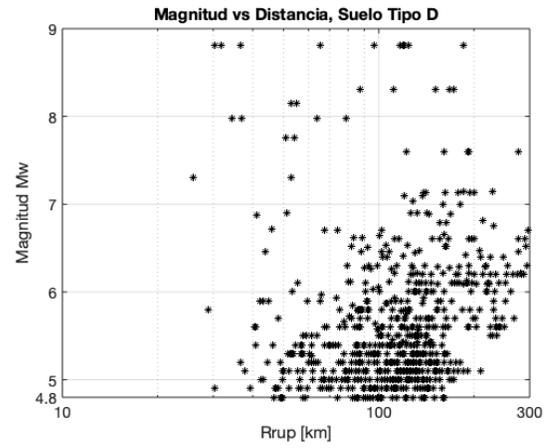


(b) Distribución Magnitud vs Distancia

Figura 3.48: Distribución por PGA, magnitud y distancia hipocentral de los registros de aceleraciones de la base de datos en suelo Tipo C



(a) Distribución PGA vs Distancia



(b) Distribución Magnitud vs Distancia

Figura 3.49: Distribución por PGA, magnitud y distancia hipocentral de los registros de aceleraciones de la base de datos en suelo Tipo D

3.3.5. Registros según Zona Sísmica, NCH 433

En la Tabla 3.14 se muestra la cantidad de registros de aceleraciones en la base de datos para cada Zona Sísmica, NCH 433.

Tabla 3.14: Cantidad de Registros según Zona NCH 433

Zona NCH 433	Cantidad de Registros
1	45
2	1008
3	3593

En la Figura 3.50 se muestra un histograma con la cantidad de registros para cada Zona Sísmica NCH 433.

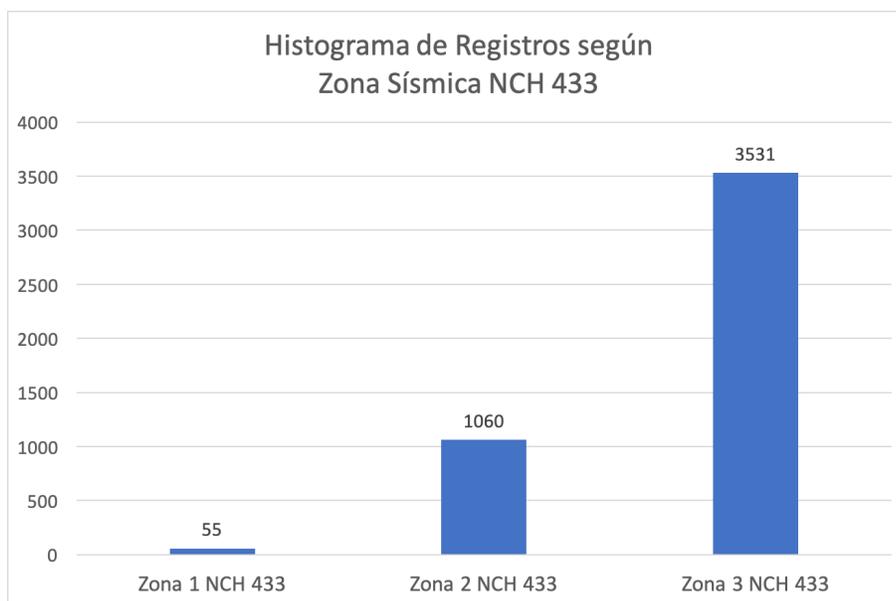


Figura 3.50: Histograma de registros según Zona Sísmica NCH 433

En la Figura 3.51 se muestra un histograma con la cantidad de registros para cada Zona Sismotectónica según Zona Sísmica NCH 433.

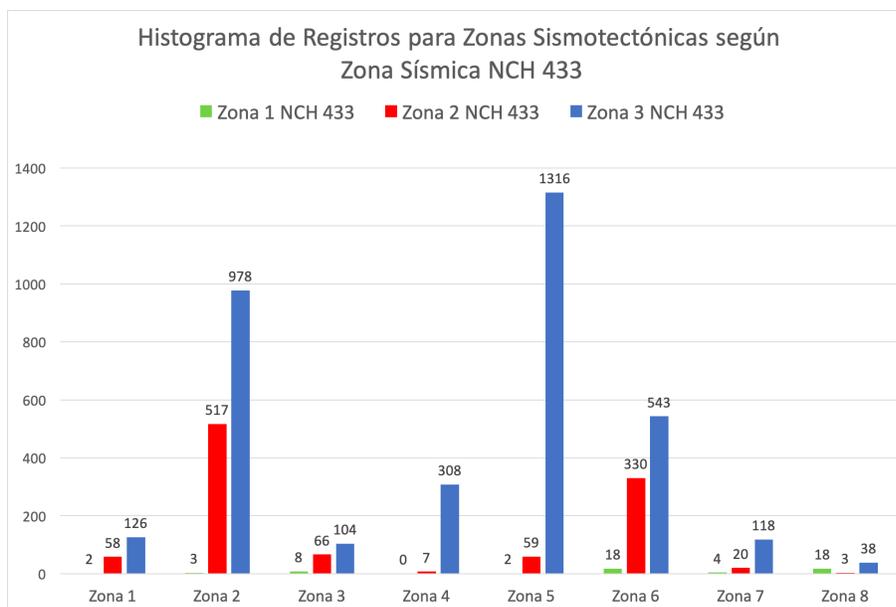
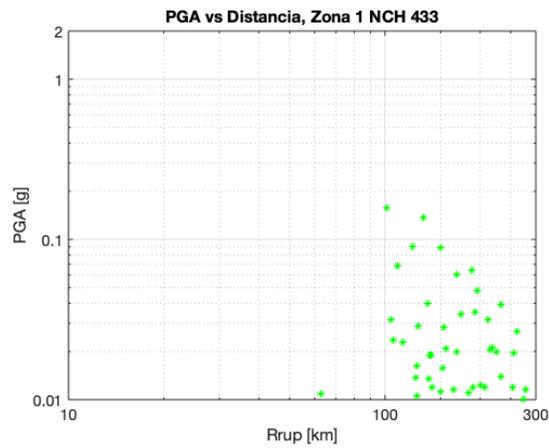
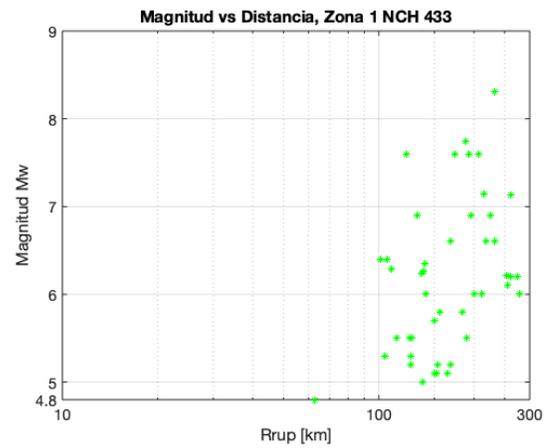


Figura 3.51: Histograma de registros para las Zonas Sismotectónicas según Zona Sísmica NCH 433

En las Figuras 3.52, 3.53 y 3.54 se muestra la distribución de PGA, Magnitudes y Distancias Hipocentrales para cada Zona Sísmica NCH 433 en la base de datos.

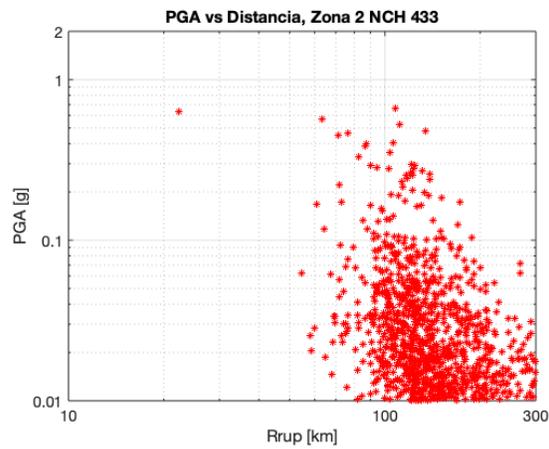


(a) Distribución PGA vs Distancia

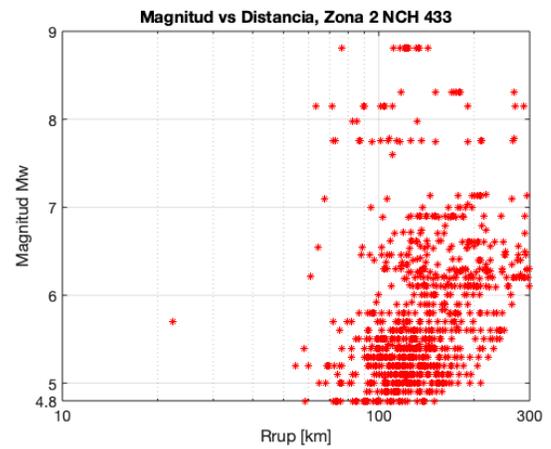


(b) Distribución Magnitud vs Distancia

Figura 3.52: Distribución por PGA, magnitud y distancia de los registros de aceleraciones de la base de datos en Zona Sísmica 1 NCH 433

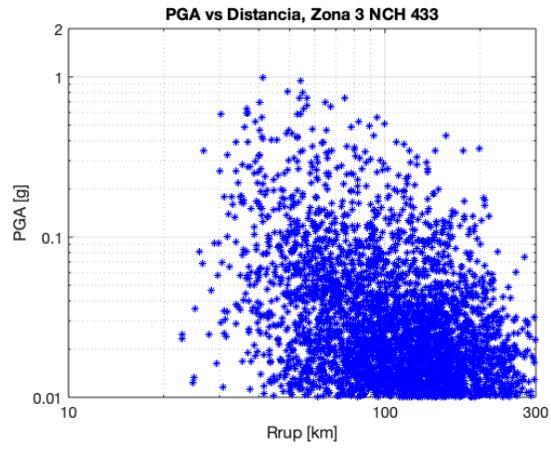


(a) Distribución PGA vs Distancia

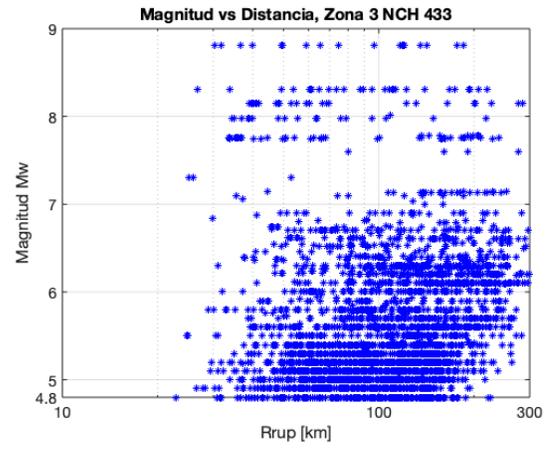


(b) Distribución Magnitud vs Distancia

Figura 3.53: Distribución por PGA, magnitud y distancia de los registros de aceleraciones de la base de datos en Zona Sísmica 2 NCH 433



(a) Distribución PGA vs Distancia



(b) Distribución Magnitud vs Distancia

Figura 3.54: Distribución por PGA, magnitud y distancia de los registros de aceleraciones de la base de datos en Zona Sísmica 3 NCH 433

Capítulo 4

Análisis Residual

4.1. Análisis Residual

La comparación entre las observaciones y las predicciones de los modelos se ha realizado mediante un análisis residual. Los modelos de movimiento fuerte GMM pueden ser representados por una función de densidad normal estandarizada, con media igual a cero y desviación estándar igual a 1. Luego es posible calcular un residuo normalizado. El residuo total normalizado Z_t está dado por la Ecuación 4.1.

$$Z_t^{ij}(T) = \frac{\log [GM_{\text{Obs}}^{ij}(T)] - \log [GM_{\text{Pred}}^{ij}(T)]}{\sigma(T)} \quad (4.1)$$

En la Ecuación 4.1 del residuo total normalizado, GM_{Obs}^{ij} corresponde a los parámetros observados en la base de datos utilizada y GM_{Pred}^{ij} corresponde a los parámetros que predicen los modelos para un evento i y estación j , en un período T .

Los modelos Montalva et al. (2017)^[1], Abrahamson et al. (2016)^[3] y Zhao et al. (2016)^[4] han sido programados de tal forma que entregan la desviación estándar del logaritmo natural de las pseudo aceleraciones espectrales, por lo tanto, en la Ecuación 4.1 se ha considerado el logaritmo natural para comparar las observaciones con las predicciones de estos modelos. El modelo Contreras Boroschek (2012)^[2], en cambio, se ha programado de tal forma que entrega la desviación estándar del logaritmo en base 10 de las pseudo aceleraciones espectrales, por lo tanto, en la Ecuación 4.1 se ha considerado el logaritmo en base 10 para comparar las observaciones con las predicciones de este modelo.

Los resultados para el residuo total normalizado se resumen en histogramas para cada región y modelo. Los histogramas indican la cantidad de registros para cada rango de valores de Z_t , tal que esta cantidad es normalizada según la función de distribución de probabilidad y se ajusta mediante una distribución Gaussiana, tal que su media μ y desviación estándar σ se compara con la función de densidad de probabilidad de los modelos, con media $\mu = 0$ y desviación estándar $\sigma = 1$.

El valor de la media μ en el ajuste para el residuo total normalizado Z_t puede indicar si las predicciones de los modelos presentan una tendencia conservadora o no conservadora con

respecto a lo observado en la base de datos recopilada.

- Una media $\mu < 0$ indica que el modelo es conservador.
- Una media $\mu > 0$ indica que el modelo es no conservador.

4.2. Likelihood (LH) y log-likelihood (LLH)

Para cuantificar la capacidad predictiva de los modelos, el residual total es evaluado utilizando el concepto de likelihood, LH de Scherbaum et al.(2004)^[7] y log-likelihood, LLH de Scherbaum et al.(2009)^[8].

El concepto de LH se calcula para el residual de cada par evento-estación en una escala entre 0 y 1. A partir de los valores de LH para cada residual se calcula la media de LH. Con esto se definen cuatro clases para evaluar la capacidad predictiva de los modelos para PGA y los pseudo espectros de aceleración en distintos períodos estructurales.

Cabe destacar que el rango predictivo para el pseudo espectro de aceleración en los modelos de Montalva et al. (2017)^[1] y Abrahamson et al. (2016)^[3] es para períodos entre 0 y 10 segundos, para el modelo de Zhao et al. (2016)^[4], el rango es para períodos entre 0 y 5 segundos, y para el modelo Contreras Boroschek (2012)^[2] el rango es para períodos entre 0 y 3 segundos. Por lo tanto, para poder establecer una comparación entre los modelos se han calculado los valores de LH para distintos períodos estructurales hasta un período de 3 segundos, con la finalidad de que todos los modelos se encuentren dentro de su rango predictivo.

Las cuatro clases predictivas en función del valor de LH, son las siguientes:

- Clase A, para mayor capacidad predictiva. Media LH ≥ 0.4 .
- Clase B para capacidad intermedia. $0.3 \leq \text{Media LH} < 0.4$.
- Clase C para la capacidad aceptable más baja. $0.2 \leq \text{Media LH} < 0.3$.
- Clase D Capacidad predictiva inaceptable. Media LH < 0.2 .

El valor de LH para cada residual normalizado está dado por la Ecuación 4.2, donde μ y σ corresponden a la media y desviación estándar de los modelos para cada período. Estos valores se obtienen del ajuste a la distribución Gaussiana en los histogramas para el residuo total normalizado en cada caso a estudiar y para cada período. Finalmente, se calcula la media de LH entre los resultados de para cada residual total normalizado.

$$LH(\mu) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \right) \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} (Zt_i - \mu)^2 \right\} \quad (4.2)$$

Otro parámetro para cuantificar la distancia entre las observaciones y predicciones de los modelos corresponde al concepto de log-likelihood (LLH) que se calcula como el logaritmo de la función de densidad de probabilidad de la distribución normal estándar evaluada en

cada residual normalizado. La expresión matemática para el LLH asociado a cada residual normalizado está dada por la Ecuación 4.3, donde μ y σ corresponden a la media y desviación estándar de los modelos para cada caso y cada período, los cuáles se obtienen a partir del ajuste a la distribución Gaussiana de los histogramas de Z_t .

$$LLH(\mu) = -\ln(\sqrt{2\pi}\sigma) - \frac{1}{2\sigma^2} (Zt_i - \mu)^2 \quad (4.3)$$

EL valor final de LLH se calcula como el promedio negativo de las distancias para cada residual normalizado. Esto implica que mientras menor sea el valor final de LLH, mayor es la capacidad predictiva del modelo evaluado.

Capítulo 5

Resultados

5.1. Marco de Referencia

El presente estudio sigue la línea del artículo *Ground-Motion Evaluation of Moderate and Large Interface Earthquakes along the Chilean Subduction Zone*^[16]. En dicho artículo se propone un estudio de la validez de modelos de movimiento fuerte para el territorio chileno.

5.1.1. Estudio de Herrera et al. (2020) sobre Validez de GMM para el territorio chileno

En este artículo y a partir de un análisis residual, que compara los parámetros que entregan los modelos, versus una base de datos de sismos registrados en Chile se evalúan los modelos de Abrahamson et al. (2016)^[3] para el caso interplaca y el modelo de Montalva et al. (2017)^[1] para el caso interplaca. Los parámetros a comparar son PGA y pseudo aceleraciones espectrales de las componentes horizontales con un amortiguamiento crítico del 5%.

En el artículo se propone una división del territorio chileno en 3 regiones, Norte, Centro y Sur. La zona Norte comprende desde la latitud $18^{\circ} S$ hasta la latitud $27^{\circ} S$, a la altura de Caldera, incluyendo los terremotos de Tocopilla 2007 Mw 7.7 e Iquique 2014 Mw 8.1. La zona Centro comprende desde la latitud $27^{\circ} S$ hasta la latitud $39^{\circ} S$, entre Temuco y Villarrica, incluyendo los terremotos del Maule 2010 Mw 8.8 e Illapel. La zona Sur comprende desde la latitud 39° hasta $45^{\circ} S$ incluyendo el terremoto de Chiloé 2016 Mw 7.6.

En la Figura 5.1 se muestra la base de datos utilizada en dicho artículo. Las columnas a), b) y c) corresponden a las zonas Norte, Centro y Sur respectivamente. Los mapas de la primera fila muestran la proyección de los mecanismos focales de eventos interplaca y las estaciones presentes en cada región. Se presentan además los largos de ruptura asociados a los megaterremotos de magnitud $M_w \geq 7.5$. En la segunda fila se muestra la distribución de las observaciones en función de la magnitud de los eventos vs las distancias más cercanas a la ruptura desde las estaciones. Se observa que para las zonas Norte y Centro se consideran eventos de magnitud $M_w \geq 4.8$, para la zona Sur se consideran eventos de magnitud $M_w \geq 4.0$. Para las tres regiones se considera una distancia a la ruptura máxima de 300 km. Por último, en la tercera fila se muestra la ocurrencia de los eventos en función del tiempo, se destacan además los eventos más importantes para cada región en la base de datos.

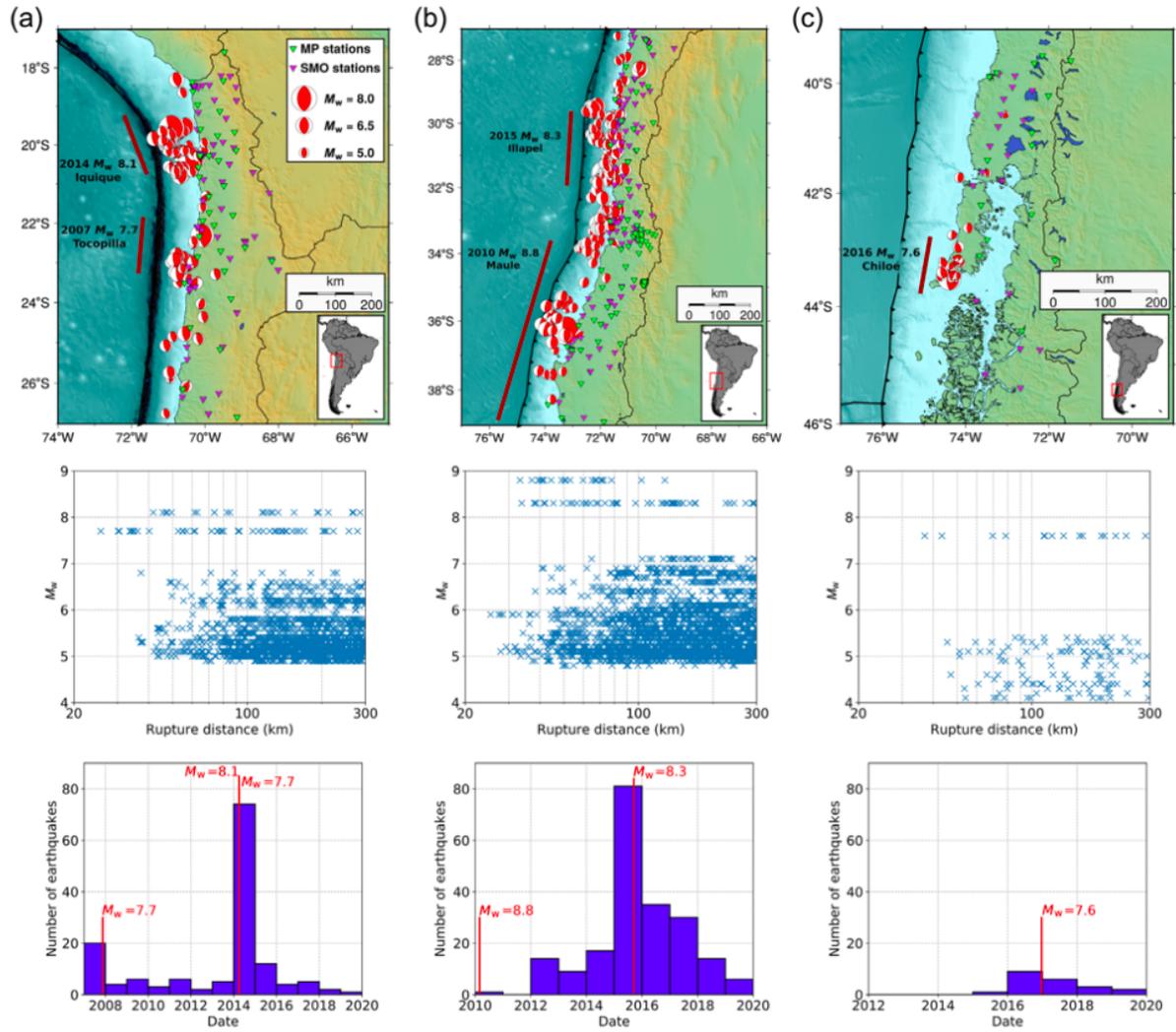


Figura 5.1: Base de Datos Estudio Herrera et al. (2020)^[16]

En la Figura 5.2 se muestra el resumen del análisis residual normalizado para las tres regiones. Los histogramas muestran la distribución del residuo total normalizado. Las letras a), b) y c) corresponden a las Zonas Norte, Centro y Sur respectivamente. La curva de color azul representa el ajuste de los histogramas a una distribución Gaussiana, la cual se compara con la curva segmentada de color rojo, la cuál representa a los modelos con una media $\mu = 0$ y $\sigma = 1$. La columna de la izquierda corresponde al modelo de Abrahamson et al. (2016), mientras que la columna de la derecha corresponde al modelo de Montalva et al. (2017).

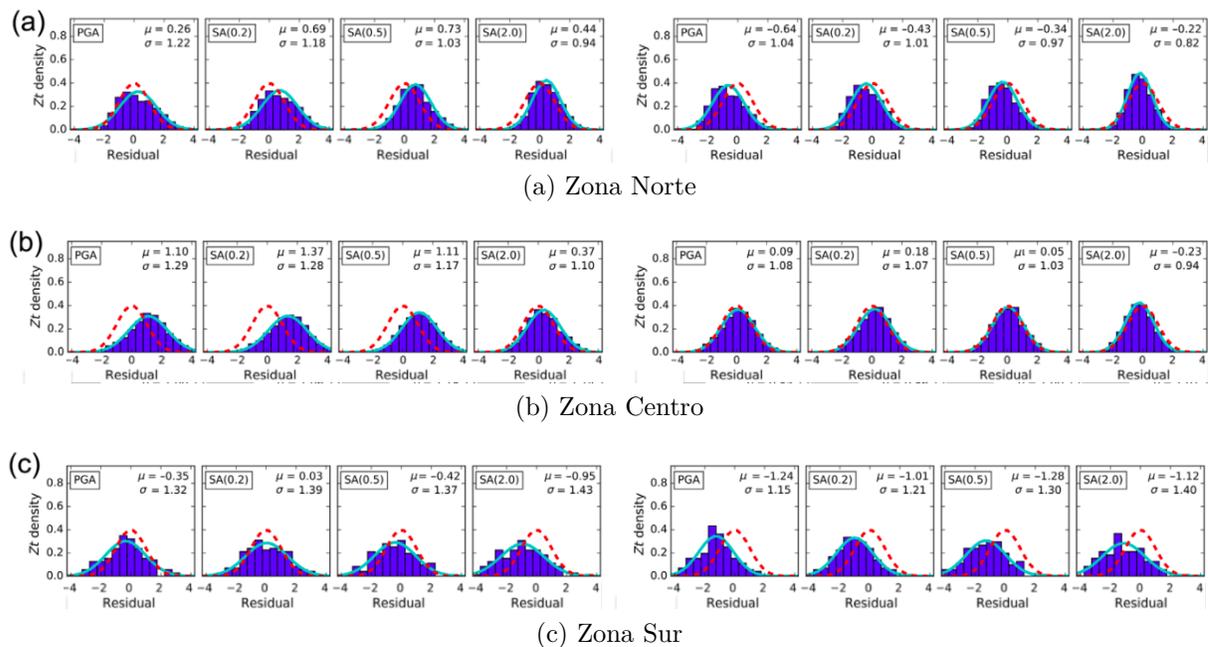


Figura 5.2: Análisis Residual Herrera et al. (2020)

Para cuantificar la calidad predictiva de los modelos, se han calculado los parámetros likelihood (LH) y log-likelihood (LLH) a partir de los residuos totales para PGA y distintos períodos estructurales. Los resultados se presentan en la Figura 5.3, donde las columnas a), b) y c) corresponden a las regiones Norte, Centro y Sur respectivamente. La primera fila corresponde al LH medio y la segunda fila corresponde a LLH.

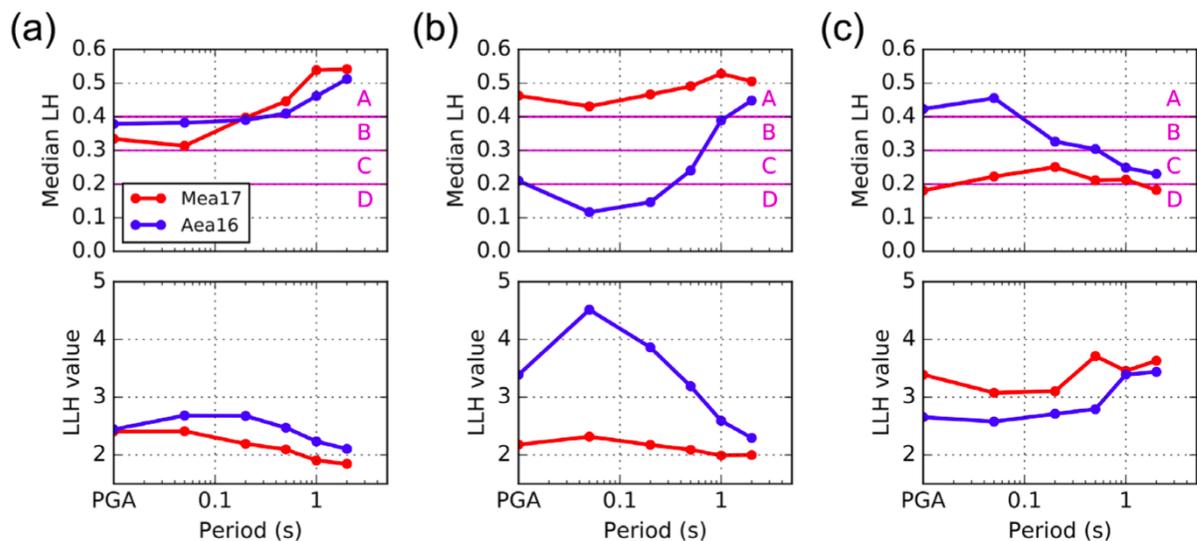


Figura 5.3: LH y LLH Herrera et al. (2020)

El estudio concluye que para eventos interplaca, el modelo de Montalva et al. (2017)^[1] presenta una mayor capacidad predictiva en las zonas Norte y Centro, donde gran parte de la base de datos se ha registrado. El mejor ajuste del modelo de Montalva et al. (2017)^[1], se explica porque gran parte de los eventos considerados en la base de datos, ocurren en la misma región y tienen un rango de magnitudes similar a la base de datos utilizada para desarrollar el modelo ($M_w \geq 5.0$). En cambio, el modelo de Abrahamson et al. (2016)^[3] se

ha desarrollado con un catálogo global de eventos interplaca en zonas de subducción, con un rango de magnitudes ($M_w \geq 6.0$) reducido respecto al de Montalva et al. (2017)^[1].

En la Zona Sur de Chile, ambos modelos presentan una pobre capacidad predictiva, siendo la del Modelo de Montalva et al. (2017)^[1] la peor. Probablemente debido a que ningún evento en esta región se ha utilizado para desarrollar los modelos de movimiento fuerte considerados en el estudio. Además de esto, el catálogo de eventos considerados para la zona Sur, considera un rango de magnitudes más amplio que el utilizado en el desarrollo de los modelos. La base de datos del estudio considera eventos de magnitudes $M_w \geq 4.0$ para aumentar la cantidad de eventos en catálogo. Esto podría afectar negativamente al ajuste de los modelos a las observaciones.

Con respecto a los valores de las medias μ en la Zona Norte, se observan valores negativos en los ajustes de los histogramas para PGA y el resto de los períodos en el modelo de Montalva et al. (2017)^[1], lo cual indica que el modelo en estos casos es conservador. En cambio, para el modelo de Abrahamson et al. (2016)^[3] se observan medias μ positivas, lo que indica que el modelo es no conservador en estos casos. Los valores de LH muestran que el modelo de Abrahamson et al. (2016)^[3] presenta un mejor ajuste y capacidad predictiva para períodos cortos, mientras que el modelo de Montalva et al. (2017)^[1] presenta un mejor ajuste para períodos largos en la Zona Norte.

Para la Zona Centro, el modelo de Montalva et al. (2017)^[1] presenta un gran ajuste con medias cercanas a cero tanto para PGA como para los pseudo espectros de aceleración. Si bien las medias son positivas para períodos cortos y negativa para el período de 2 segundos, las medias son bastante cercanas a cero y presentan altos valores de LH tanto en períodos cortos como largos, lo cual muestra que el modelo tiene una gran capacidad predictiva en Zona Centro. Para el caso del modelo de Abrahamson et al. (2016)^[3], se tienen medias positivas que se alejan bastante de cero, mostrando por lo tanto un comportamiento no conservador tanto para PGA, como para los pseudo espectros de aceleración en todos los períodos estudiados. Los valores de LH muestran que el modelo de Montalva et al. (2017)^[1] muestra una mejor capacidad predictiva tanto para períodos cortos como para períodos largos en la Zona Centro.

En Zona Sur, el modelo de Montalva et al. (2017)^[1] se muestra mucho más conservador al mostrar medias negativas y menores a las del modelo de Abrahamson et al. (2016)^[3]. Este último modelo también presenta un comportamiento conservador, pero con medias mayores. Para el caso del pseudo espectro de aceleración en el período 0.2 segundos se tiene una media positiva, lo cual indica comportamiento no conservador para este caso. Los valores de LH muestran que el modelo de Montalva et al. (2017)^[1] muestra una mejor capacidad predictiva tanto para períodos cortos como para períodos largos en la Zona Sur.

5.2. Análisis Residual según Mecanismo

A continuación, se presenta el resumen del análisis residual para los modelos de Montalva et al. (2017)^[1], Abrahamson et al. (2016)^[3], Contreras Boroschek (2012)^[2] y Zhao et. al (2016)^[4] en función de la base de datos propia y la zonificación sismotectónica propuesta por Núñez (2014)^[14].

Los residuos normalizados se presentan en histogramas junto con su mejor ajuste a la distribución Gaussiana (curva de color azul) y se comparan con los modelos mencionados anteriormente, los cuáles son representados por una distribución Gaussiana de media igual a cero y desviación estándar igual a uno (curva segmentada de color rojo). Se presentan los histogramas para PGA y para los pseudoespectros de aceleración de distintos períodos hasta los 3 segundos.

En primera instancia se presentan los resultados al comparar las predicciones de los modelos contra toda la base de datos sin segmentar. Luego se presentan los resultados al segmentar la base de datos según las zonas sismotectónicas definidas por Nuñez (2014)^[14] para estudios de peligro sísmico. Finalmente se presentan tablas resumen con los valores de media μ y desviación estándar σ para cada modelo en las distintas zonas según mecanismo interplaca, intraplaca o toda la base de datos.

En la primera fila de las siguientes figuras se consideran todos los registros de la base de datos utilizada, en la segunda fila sólo consideran los registros asociados a eventos interplaca y en la tercera fila sólo se consideran registros asociados a eventos intraplaca.

Al final del análisis para cada Zona Sismotectónica, se presentan además los resultados para los parámetros LH y LLH, los cuáles permiten cuantificar la capacidad predictiva de cada modelo al distinguir según zona.

5.2.1. Análisis residual según mecanismo contra toda la Base de Datos

5.2.1.1. Montalva et al. (2017)

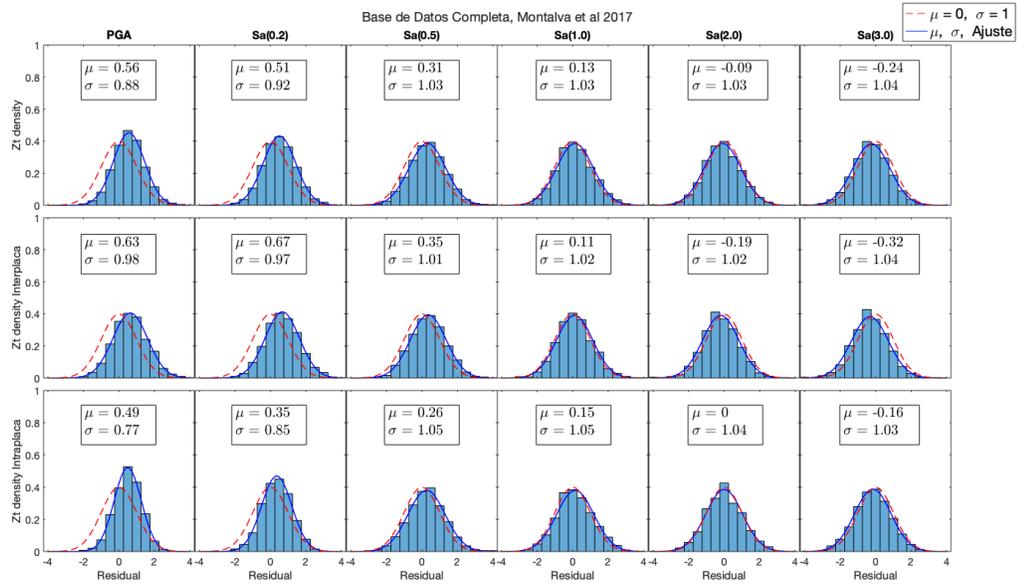


Figura 5.4: Análisis Residual según Mecanismo para toda la Base de Datos, modelo Montalva et al. (2017)

5.2.1.2. Abrahamson et al. (2016)

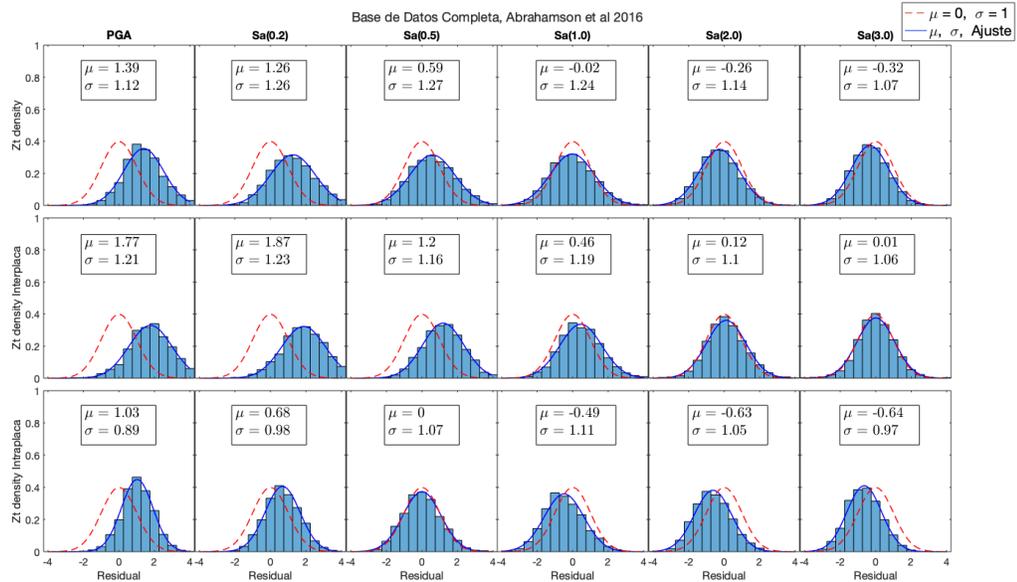


Figura 5.5: Análisis Residual según Mecanismo para toda la Base de Datos, modelo Abrahamson et al. (2016)

5.2.1.3. Contreras Boroschek 2012

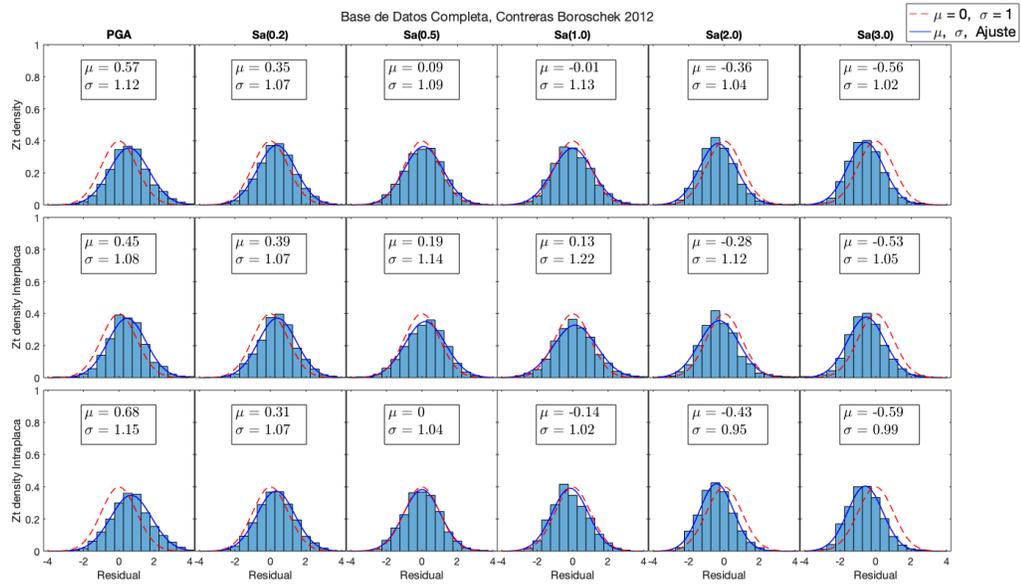


Figura 5.6: Análisis Residual según Mecanismo para toda la Base de Datos, modelo Contreras Boroschek (2012)

5.2.1.4. Zhao et al. (2016)

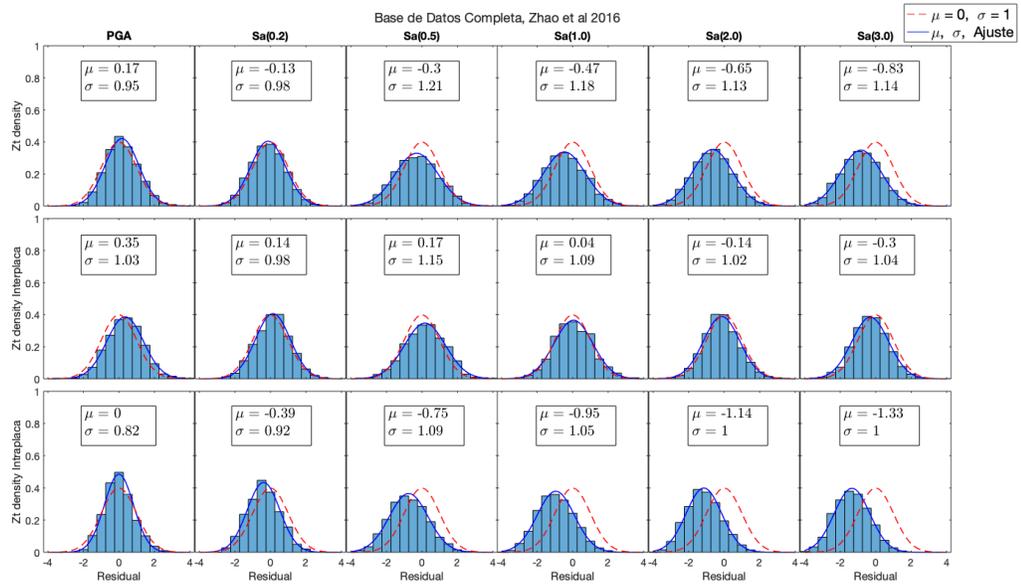


Figura 5.7: Análisis Residual según Mecanismo para toda la Base de Datos, modelo Zhao et al. (2016)

5.2.1.5. Resumen Análisis Residual contra Toda la Base de Datos

Tabla 5.1: Resumen Análisis Residual contra Toda la Base de Datos, μ

Todo el País μ							
Modelo	Mecanismo	PGA	Sa (0.2)	Sa (0.5)	Sa (1.0)	Sa (2.0)	Sa (3.0)
Montalva et al. 2017	Todos	0.56	0.51	0.31	0.13	-0.09	-0.24
	Interplaca	0.63	0.67	0.35	0.11	-0.19	-0.32
	Intraplaca	0.49	0.35	0.26	0.15	0.00	-0.16
Abrahamson et al. 2016	Todos	1.39	1.26	0.59	-0.02	-0.26	-0.32
	Interplaca	1.77	1.87	1.20	0.46	0.12	0.01
	Intraplaca	1.03	0.68	0.00	-0.49	-0.63	-0.64
Contreras Boroschek 2012	Todos	0.57	0.35	0.09	-0.01	-0.36	-0.56
	Interplaca	0.45	0.39	0.19	0.13	-0.28	-0.53
	Intraplaca	0.68	0.31	0	-0.14	-0.43	-0.59
Zhao et al. 2016	Todos	0.17	-0.13	-0.30	-0.47	-0.65	-0.83
	Interplaca	0.35	0.14	0.17	0.04	-0.14	-0.30
	Intraplaca	0.00	-0.39	-0.75	-0.95	-1.14	-1.33

Tabla 5.2: Resumen Análisis Residual contra Toda la Base de Datos, σ

Todo el País σ							
Modelo	Mecanismo	PGA	Sa (0.2)	Sa (0.5)	Sa (1.0)	Sa (2.0)	Sa (3.0)
Montalva et al. 2017	Todos	0.88	0.92	1.03	1.03	1.03	1.04
	Interplaca	0.98	0.97	1.01	1.02	1.02	1.04
	Intraplaca	0.77	0.85	1.05	1.05	1.04	1.03
Abrahamson et al. 2016	Todos	1.12	1.26	1.27	1.24	1.14	1.07
	Interplaca	1.21	1.23	1.16	1.19	1.10	1.06
	Intraplaca	0.89	0.98	1.07	1.11	1.05	0.97
Contreras Boroschek 2012	Todos	1.12	1.07	1.09	1.13	1.04	1.02
	Interplaca	1.08	1.07	1.14	1.22	1.12	1.05
	Intraplaca	1.15	1.07	1.04	1.02	0.95	0.99
Zhao et al. 2016	Todos	0.96	0.98	1.21	1.18	1.13	1.14
	Interplaca	1.03	0.98	1.15	1.09	1.02	1.04
	Intraplaca	0.82	0.92	1.09	1.05	1.00	1.00

La base de datos completa a lo largo del territorio chileno considera la siguiente cantidad de registros:

- 4646 registros en total.
- 2279 registros asociados a eventos interplaca.
- 2367 registros a eventos intraplaca.

Para el modelo de Montalva et al. (2017)^[1] se observa en el ajuste para el residuo total normalizado Z_t una media μ positiva tanto para PGA como para los pseudo espectros de aceleración hasta el período de 1 segundo. Es decir, en este rango el modelo presenta una tendencia no conservadora donde sus predicciones subestiman lo observado en la base de datos recopilada. Esta situación se observa para los registros asociados a eventos interplaca y para los registros asociados a eventos intraplaca, al distinguir entre mecanismo no se observa una diferencia notable en las medias, sin embargo, para el caso intraplaca se puede señalar que las medias en el ajuste son en general mas cercanas a cero, dicha media igual a cero es la que representa al modelo en los histogramas. A partir del período 2 segundos, se observan medias negativas en el ajuste para el pseudo espectro de aceleración, es decir en este rango el modelo es conservador tanto para el caso interplaca como intraplaca, pues las predicciones del modelo sobrestiman lo observado en la base de datos.

Para el modelo de Abrahamson et al. (2016)^[3] se observa un mayor corrimiento del ajuste hacia la derecha en comparación al modelo de Montalva et al. (2017)^[1]. Esto indica una mayor tendencia no conservadora para PGA y los pseudo espectros de aceleración hasta el período de 0.5 segundos. Probablemente se deba a que el modelo de Abrahamson et al. (2016)^[3] ha sido desarrollado a partir de una base de datos global y presenta un rango de validez para magnitudes más acotado ($6 \leq Mw \leq 9$ para interplaca, $5.0 \leq Mw \leq 8.0$ para intraplaca) en comparación al de Montalva et al. (2017) cuyo rango de validez para las magnitudes es mayor ($5.0 \leq Mw \leq 9.0$) y además ha sido desarrollado a partir de una base de datos local similar a la recopilada para el presente estudio. A partir del período de 1 segundo se observan medias negativas para el pseudo espectro de aceleración en el ajuste para el caso intraplaca, lo que indica una tendencia conservadora en este rango. Para el caso interplaca, en cambio, se observan medias positivas para PGA y para todos los períodos estudiados para el pseudo espectro de aceleración. Es decir, el modelo es no conservador en todos los parámetros para el caso interplaca. La dispersión de los resultados presenta una desviación estándar cercana a la desviación estándar unitaria que representa al modelo, sin embargo, esta dispersión es mayor a la observada en el ajuste para el modelo de Montalva et al.(2017)^[1].

Para el modelo de Contreras Boroschek (2012)^[2] se observan medias μ para el ajuste del residuo total normalizado Z_t cercanas a las observadas para el modelo de Montalva et al. (2017)^[1], cabe recordar que ambos modelos se han desarrollado a partir de una base de datos local, aunque el de Contreras Boroschek (2012)^[2] con una base de datos más acotada. En definitiva, el modelo de Contreras Boroschek (2012)^[2] también presenta una tendencia no conservadora para PGA y los pseudo espectros de aceleración hasta el período de 1 segundo, luego a partir del período de 2 segundos se observan medias negativas, lo que indica un comportamiento conservador en este rango, donde las predicciones del modelo tienden a sobrestimar lo observado en la base de datos. Al distinguir entre registros interplaca e intraplaca se observa que el ajuste para el primer caso presenta medias más cercanas a cero, que

corresponde a la media que representa al modelo. Esto probablemente se deba a que la base de datos a partir de la que se ha desarrollado este modelo, está constituida principalmente por registros asociados al Terremoto del maule del 2010 Mw 8.8 que corresponde a un evento del tipo interplaca. En cuanto a la dispersión, se observan valores de desviación estándar mayores, probablemente por su base de datos, la cuál es más acotada en comparación a los demás modelos.

Para el modelo de Zhao et al. (2016)^[4], se observa la mayor tendencia conservadora en comparación al resto de los modelos. Salvo para la estimación de PGA, el caso general presenta medias negativas en el ajuste de Z_t para los pseudo espectros de aceleración en todos los períodos, esto indica que las predicciones del modelo tienden a sobrestimar lo observado en la base de datos. Al distinguir entre registros asociados a eventos interplaca de registros asociados a eventos intraplaca, se observa una notable diferencia, donde el caso intraplaca presenta medias menores y negativas en todos los períodos. Este comportamiento conservador se observa solo a partir del período de 2 segundos en el pseudo espectro de aceleración para el caso interplaca. El modelo de Zhao et al. (2016)^[4] también se ha desarrollado a partir de una base de datos global, esto puede explicar la notable diferencia al distinguir según mecanismo y su tendencia mucho más conservadora en comparación al resto de los modelos.

A continuación se presentan los resultados para los parámetros LH y LLH para el análisis de toda la base de datos a lo largo del territorio chileno.

5.2.2. Likelihood (LH) y log-Likelihood (LLH) para Toda la Base de Datos

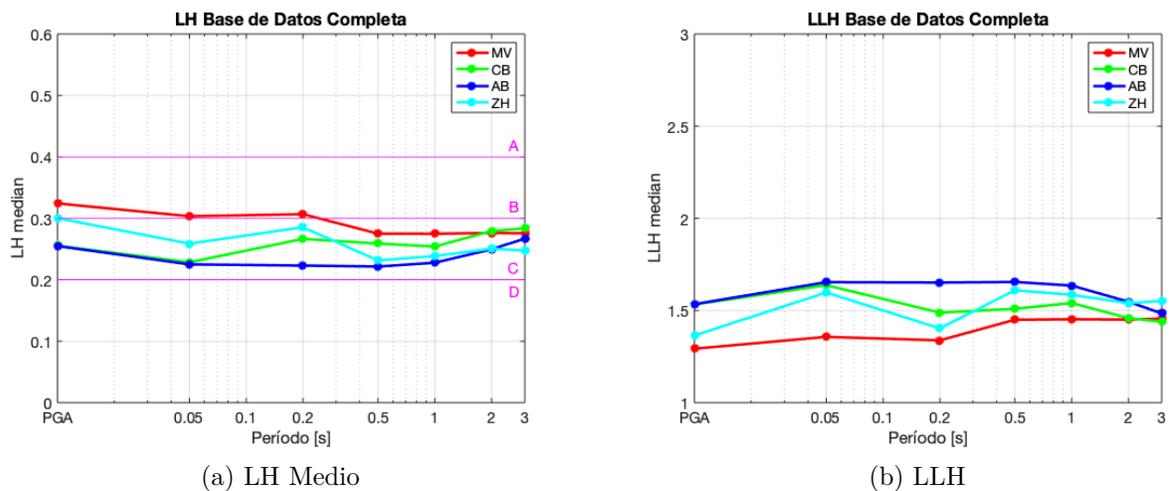


Figura 5.8: LH medio y LLH para toda la Base de Datos

En función de los parámetros LH y LLH para la base de datos completa, se observa que el modelo de Montalva et al. (2017)^[1], a pesar de mostrar una tendencia no conservadora, es el que presenta la mejor capacidad predictiva para la base de datos recopilada. Para PGA y los pseudo espectros de aceleración hasta el período 0.2 segundos es el único que modelo que alcanza la categoría B para LH, lo cual indica una capacidad predictiva intermedia. Para PGA el modelo de Zhao et al. (2016)^[4] también presenta una buena capacidad predictiva,

sin embargo, para los pseudo espectros de aceleración, en función del valor de LH presenta una categoría C, que indica una baja capacidad predictiva. En general, se observa que los 4 modelos estudiados presentan una menor capacidad predictiva a partir del período de 0.5 segundos, esto coincide con el rango en que se observan medias μ negativas en el ajuste del residuo total normalizado Z_t . Esto indica que al presentar una tendencia conservadora en este rango, la capacidad predictiva de los modelos se puede ver reducida. Para el último período estructural de 3 segundos, el modelo que presenta el mayor valor de LH es el de Contreras Boroschek (2012)^[2], esto indica que los modelos que son desarrollados a partir de data local, al igual que el modelo de Montalva et al. (2017)^[1] pueden presentar en definitiva una mejor capacidad predictiva.

5.2.3. Análisis residual según mecanismo de la Zona 1

5.2.3.1. Montalva et al. (2017)

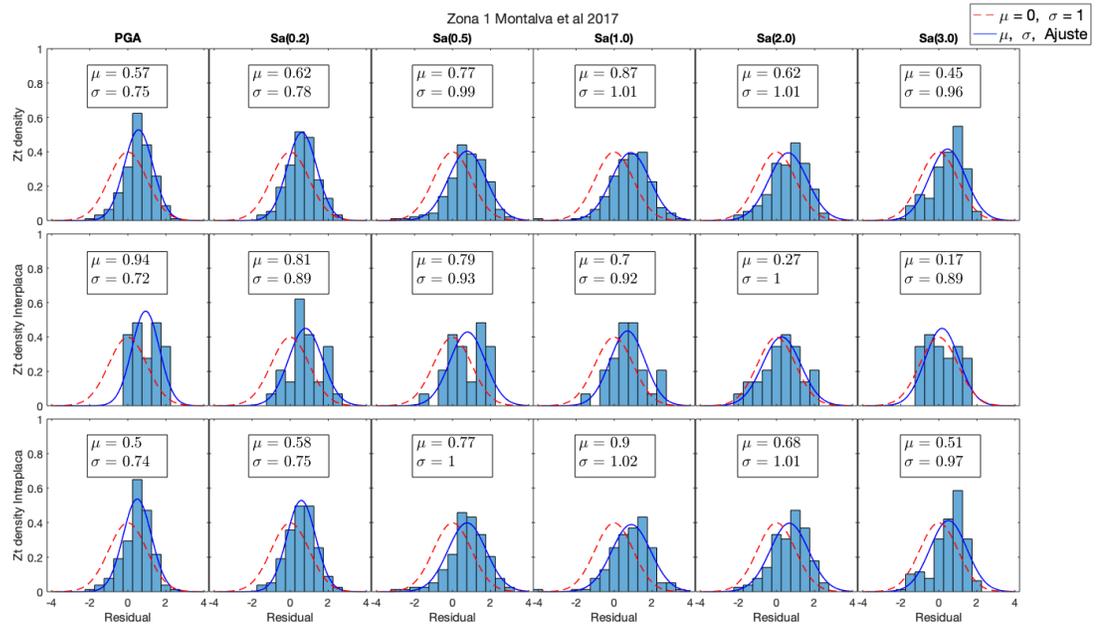


Figura 5.9: Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 1, modelo Montalva et al 2017

5.2.3.2. Abrahamson et al. (2016)

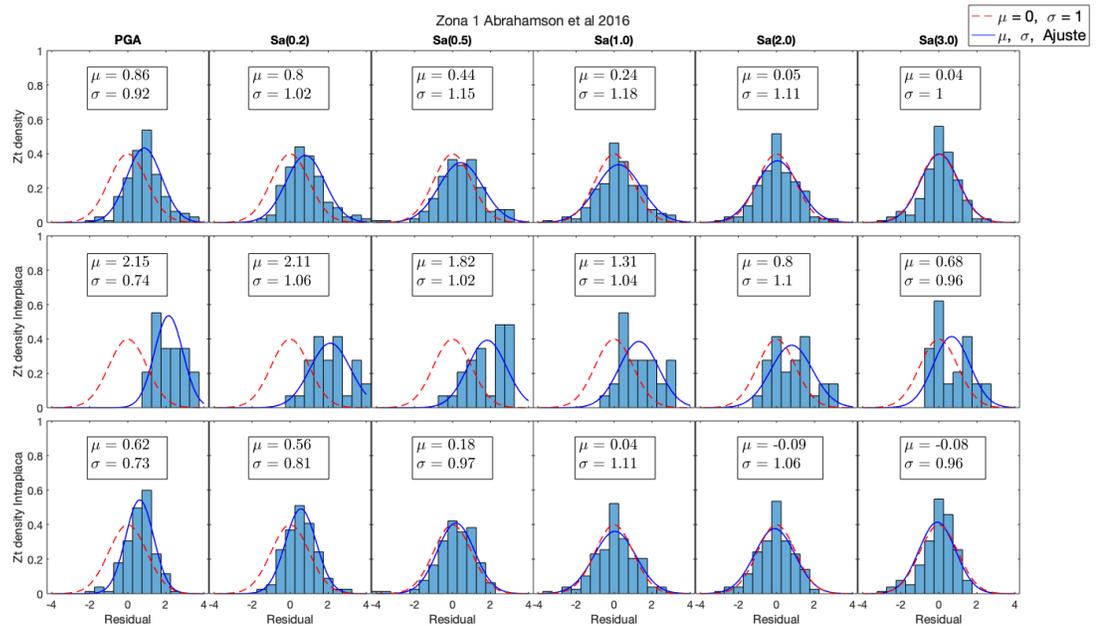


Figura 5.10: Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 1, modelo Abrahamson et al 2016

5.2.3.3. Contreras Boroschek 2012

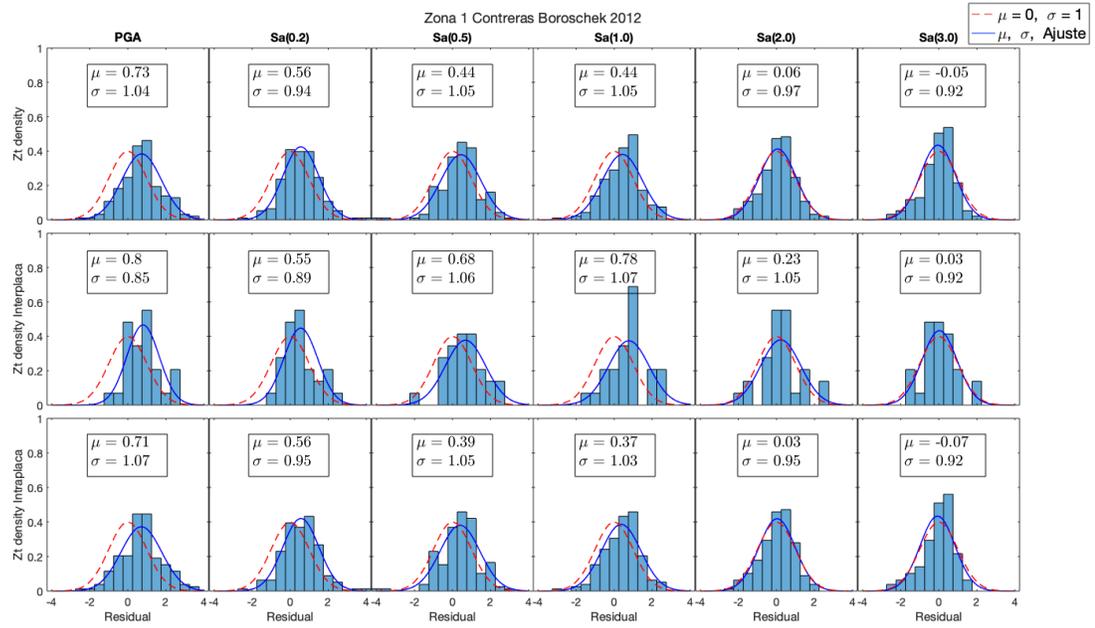


Figura 5.11: Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 1, modelo Contreras Boroschek 2012

5.2.3.4. Zhao et al. (2016)

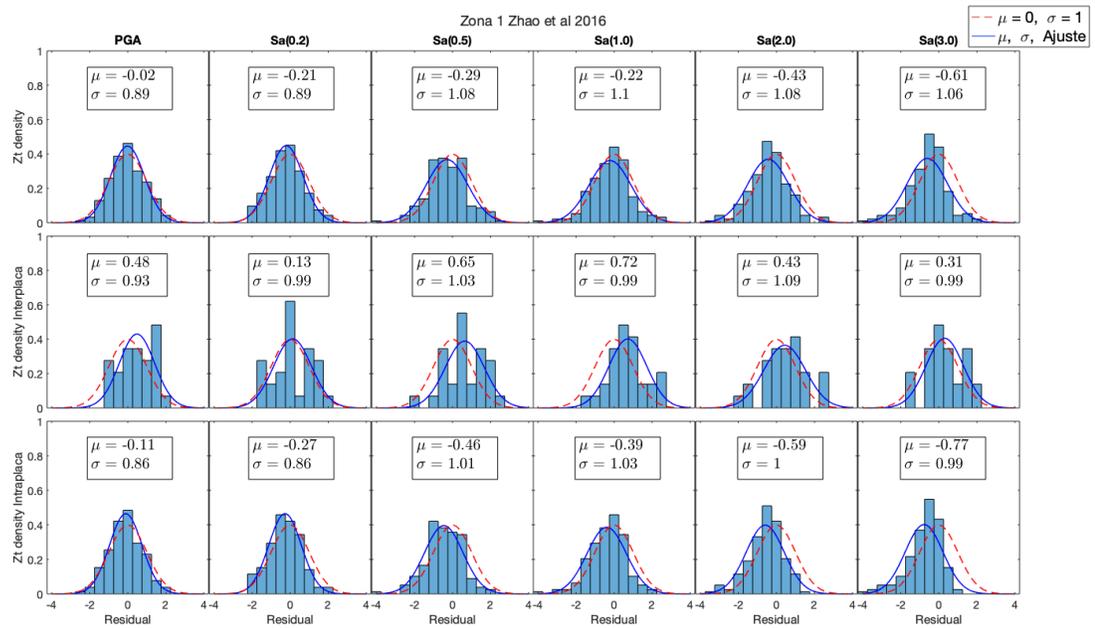


Figura 5.12: Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 1, modelo Zhao et al 2016

5.2.3.5. Resumen Análisis Residual Zona 1

Tabla 5.3: Resumen Análisis Residual Zona 1, μ

Zona 1 μ							
Modelo	Mecanismo	PGA	Sa (0.2)	Sa (0.5)	Sa (1.0)	Sa (2.0)	Sa (3.0)
Montalva et al. 2017	Todos	0.57	0.62	0.77	0.87	0.62	0.45
	Interplaca	0.94	0.81	0.79	0.70	0.27	0.17
	Intraplaca	0.50	0.58	0.77	0.90	0.68	0.51
Abrahamson et al. 2016	Todos	0.86	0.80	0.44	0.24	0.05	0.04
	Interplaca	2.15	2.11	1.82	1.31	0.80	0.68
	Intraplaca	0.62	0.56	0.18	0.04	-0.09	-0.08
Contreras Boroschek 2012	Todos	0.73	0.56	0.44	0.44	0.06	-0.05
	Interplaca	0.80	0.55	0.68	0.78	0.23	0.03
	Intraplaca	1.07	0.56	0.39	0.37	0.03	-0.07
Zhao et al. 2016	Todos	-0.02	-0.21	-0.29	-0.22	-0.43	-0.61
	Interplaca	0.48	0.13	0.65	0.72	0.43	0.31
	Intraplaca	-0.11	-0.27	-0.46	-0.39	-0.59	-0.77

Tabla 5.4: Resumen Análisis Residual Zona 1, σ

Zona 1 σ							
Modelo	Mecanismo	PGA	Sa (0.2)	Sa (0.5)	Sa (1.0)	Sa (2.0)	Sa (3.0)
Montalva et al. 2017	Todos	0.75	0.78	0.99	1.01	1.01	0.96
	Interplaca	0.72	0.89	0.93	0.92	1.00	0.89
	Intraplaca	0.74	0.75	1.00	1.02	1.01	0.97
Abrahamson et al. 2016	Todos	0.92	1.02	1.15	1.18	1.11	1.00
	Interplaca	0.74	1.06	1.02	1.04	1.10	0.96
	Intraplaca	0.73	0.81	0.97	1.11	1.06	0.96
Contreras Boroschek 2012	Todos	1.04	0.94	1.05	1.05	0.97	0.92
	Interplaca	0.85	0.89	1.06	1.07	1.05	0.92
	Intraplaca	1.07	0.95	1.05	1.03	0.95	0.02
Zhao et al. 2016	Todos	0.89	0.89	1.08	1.10	1.08	1.06
	Interplaca	0.93	0.99	1.03	0.99	1.09	0.99
	Intraplaca	0.86	0.86	1.01	1.03	1.00	0.99

Para la Zona 1, la base de datos considera la siguiente cantidad de registros:

- 186 registros en total.
- 29 registros asociados a eventos interplaca.
- 157 registros asociados a eventos intraplaca

Para el modelo de Montalva et al. (2017)^[1] se observa un corrimiento hacia la derecha del ajuste con respecto a la media del modelo. Esto indica, de acuerdo a la Ecuación 4.1 del Residual Normalizado, que el modelo subestima las observaciones recopiladas en la base de datos. No se observa una diferencia notoria en la media al comparar mecanismo interplaca con mecanismo intraplaca. Donde si se observa una diferencia notoria es en la desviación estándar, ésto se puede explicar en el contexto de que se tienen pocos registros asociados a eventos interplaca en comparación a eventos intraplaca y por ende el ajuste puede ser menos representativo.

Para el modelo de Abrahamson et al. (2016)^[3] se observa una notoria diferencia para la media al distinguir entre eventos interplaca e intraplaca. El modelo se ajusta de mejor forma a los eventos intraplaca, e incluso puede sobreestimar las predicciones en relación a la base de datos utilizada para los períodos de 2 y 3 segundos en registros intraplaca. Para el caso intralaca, al haber pocos registros en la Zona 1 los resultados pueden ser poco representativos, sin embargo, en este contexto se observa un fuerte corrimiento a la derecha, lo que indica que el modelo subestima lo observado en la base de datos. Para la desviación estándar del ajuste, se observan valores cercanos a la desviación unitaria del modelo.

Para el modelo de Contreras Boroschek (2012)^[2], al igual que para el modelo de Montalva et al. (2017)^[1], no se observan notorias diferencias al distinguir entre registros interplaca o intraplaca. La característica que comparten ambos modelos y que puede explicar esta situación, es que ambos se han desarrollado a partir de data local, a diferencia de los modelos de Abrahamson et al. (2016)^[3] y Zhao et al. (2016)^[4] que se han desarrollado a partir de data global. El modelo de Contreras Boroschek (2012)^[2] también presenta un ajuste con media positiva para PGA y los períodos hasta los 2 segundos. Lo cual indica que para este rango el modelo subestima las observaciones de la base de datos. Para los registros interplaca se observa una menor desviación estándar, esto debido a que la base de datos utilizada tiene una cantidad reducida de estos registros en Zona 1

El modelo de Zhao et al. (2016)^[4], que ha sido desarrollado a partir de data global también presenta una notoria diferencia al distinguir entre eventos interplaca e intraplaca. Los registros intraplaca presentan un ajuste con media negativa, lo que indica que el modelo es conservador para PGA y todos los períodos estudiados. Para el caso interplaca se observa un ajuste con media positiva, es decir, las predicciones subestiman las observaciones de la base de datos. El ajuste además, presenta una baja desviación estándar para PGA y período de 0.2 segundos.

A continuación se presentan los resultados para los parámetros LH y LLH para todos los registros en Zona 1 de Núñez.

5.2.4. Likelihood (LH) y log-Likelihood (LLH) para Zona 1 de Núñez

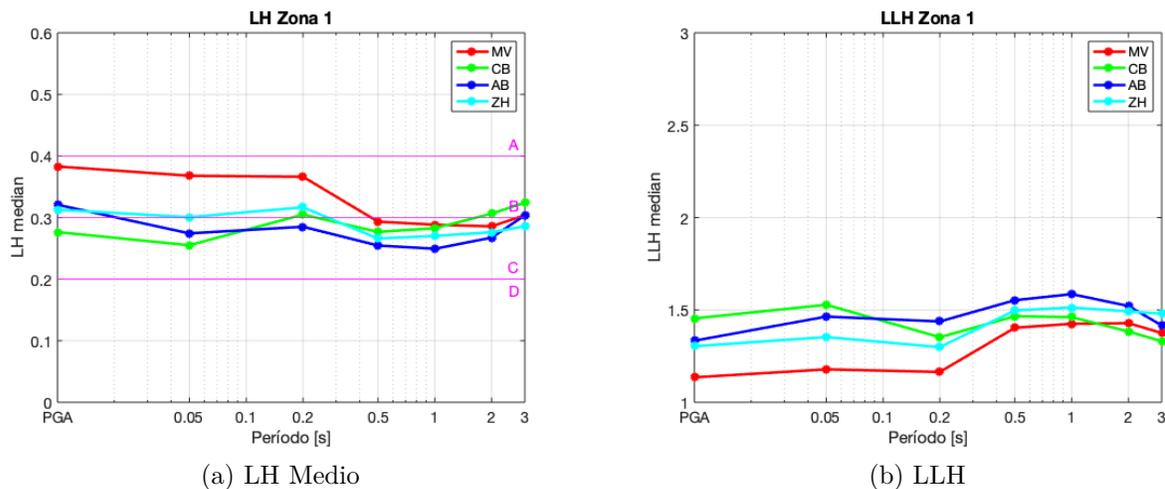


Figura 5.13: LH medio y LLH para Zona 1

En función de los parámetros LH y LLH, el modelo de Montalva et al. (2017)^[1] presenta la mejor calidad predictiva. El segundo modelo es el de Zhao et al. (2016)^[4], el cuál según el resumen del análisis residual mostraba ser conservador para el caso intraplaca en Zona 1. El modelo de Contreras Boroschek (2012)^[2], a pesar de haber sido desarrollado a partir de data local, presenta una menor calidad predictiva para PGA y los primeros períodos, ésto probablemente debido a que ha sido desarrollado con una base de datos reducida en comparación a la recopilada en el presente estudio para Zona 1. Por último, se observa que la calidad predictiva de los modelos es mejor para PGA y períodos entre 0.05 y 0.5, a partir de este último período se ve una disminución de la calidad predictiva de los modelos, excepto para el modelo de Contreras Boroschek (2012)^[2], que presenta una mejor calidad predictiva en los períodos 2 y 3 segundos.

5.2.5. Análisis residual según mecanismo de la Zona 2

5.2.5.1. Montalva et al. (2017)

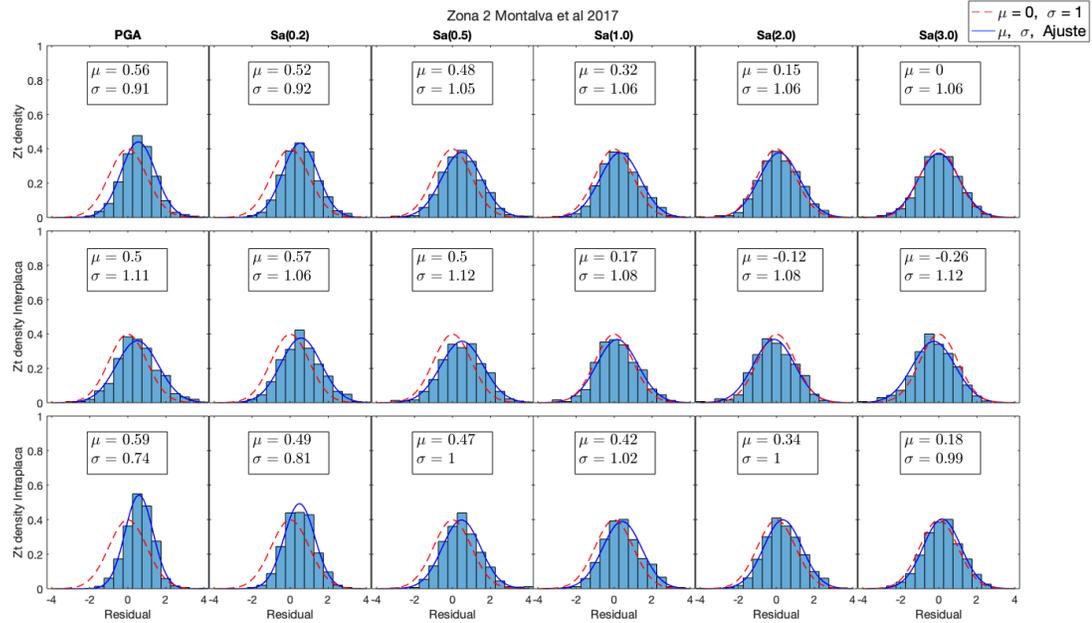


Figura 5.14: Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 2, modelo Montalva et al 2017

5.2.5.2. Abrahamson et al. (2016)

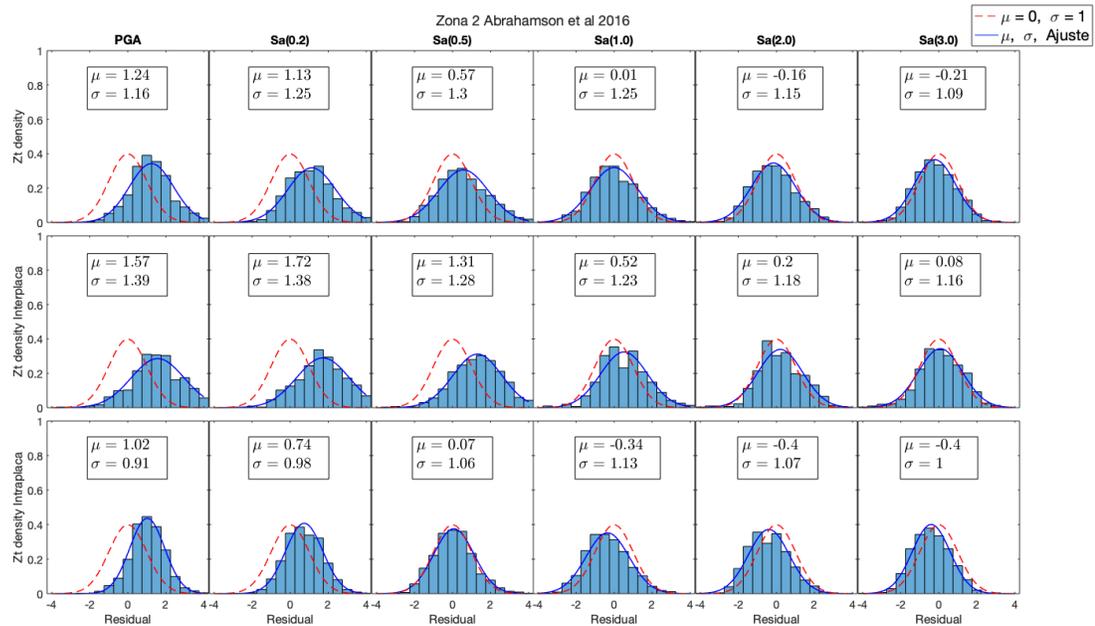


Figura 5.15: Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 2, modelo Abrahamson et al 2016

5.2.5.3. Contreras Boroschek 2012

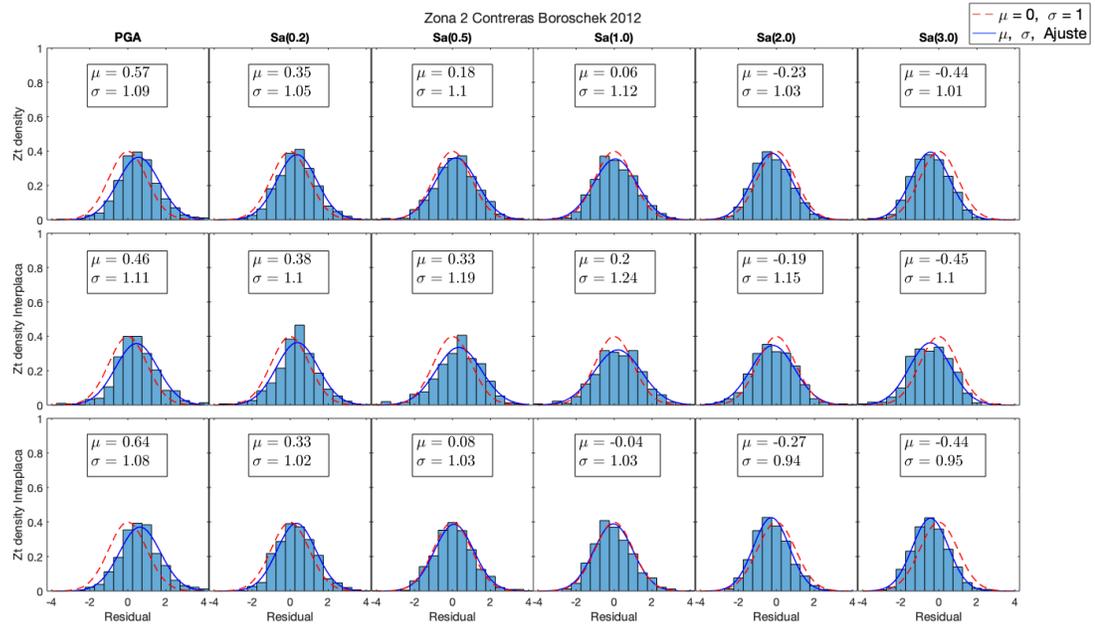


Figura 5.16: Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 2, modelo Contreras Boroschek 2012

5.2.5.4. Zhao et al. (2016)

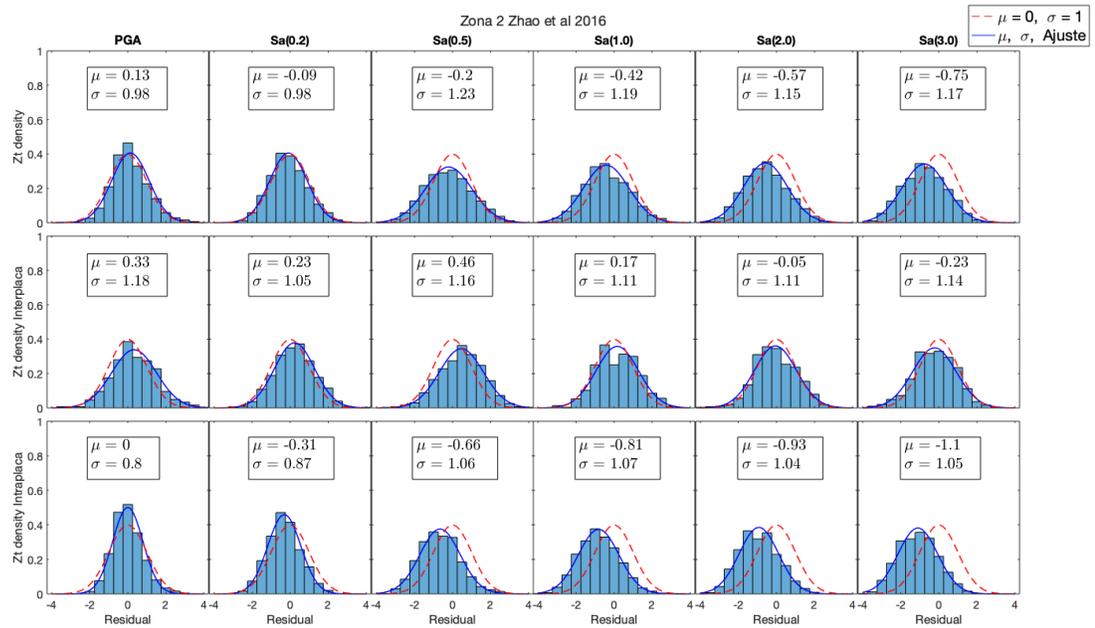


Figura 5.17: Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 2, modelo Zhao et al 2016

5.2.5.5. Resumen Análisis Residual Zona 2

Tabla 5.5: Resumen Análisis Residual Zona 2, μ

Zona 2 μ							
Modelo	Mecanismo	PGA	Sa (0.2)	Sa (0.5)	Sa (1.0)	Sa (2.0)	Sa (3.0)
Montalva et al. 2017	Todos	0.56	0.52	0.48	0.32	0.15	0.00
	Interplaca	0.50	0.57	0.50	0.17	-0.12	-0.26
	Intraplaca	0.59	0.49	0.47	0.42	0.34	0.18
Abrahamson et al. 2016	Todos	1.24	1.13	0.57	0.01	-0.16	-0.21
	Interplaca	1.57	1.72	1.31	0.52	0.20	0.08
	Intraplaca	1.02	0.74	0.07	-0.34	-0.40	-0.40
Contreras Boroschek 2012	Todos	0.57	0.35	0.18	0.06	-0.23	-0.44
	Interplaca	0.46	0.38	0.33	0.20	-0.19	-0.45
	Intraplaca	0.64	0.33	0.08	-0.04	-0.27	-0.44
Zhao et al. 2016	Todos	0.13	-0.09	-0.20	-0.42	-0.57	-0.75
	Interplaca	0.33	0.23	0.46	0.17	-0.05	-0.23
	Intraplaca	0.00	-0.31	-0.66	-0.81	-0.93	-1.10

Tabla 5.6: Resumen Análisis Residual Zona 2, σ

Zona 2 σ							
Modelo	Mecanismo	PGA	Sa (0.2)	Sa (0.5)	Sa (1.0)	Sa (2.0)	Sa (3.0)
Montalva et al. 2017	Todos	0.91	0.92	1.05	1.06	1.06	1.06
	Interplaca	1.11	1.06	1.12	1.08	1.08	1.12
	Intraplaca	0.74	0.81	1.00	1.02	1.00	0.99
Abrahamson et al. 2016	Todos	1.16	1.25	1.30	1.25	1.15	1.09
	Interplaca	1.39	1.38	1.28	1.23	1.18	1.16
	Intraplaca	0.91	0.98	1.06	1.13	1.07	1.00
Contreras Boroschek 2012	Todos	1.09	1.05	1.10	1.12	1.03	1.01
	Interplaca	1.11	1.10	1.19	1.24	1.15	1.10
	Intraplaca	1.08	1.02	1.03	1.03	0.94	0.95
Zhao et al. 2016	Todos	0.98	0.98	1.23	1.19	1.15	1.17
	Interplaca	1.18	1.05	1.16	1.11	1.11	1.14
	Intraplaca	0.80	0.87	1.06	1.07	1.04	1.05

Para la Zona 2, se tiene un alto número de registros, pues se consideran los registros asociado al terremoto de Tocopilla 2017 Mw 7.7 e Iquique 2014 Mw 8.4. La base de datos considera la siguiente cantidad de registros:

- 1498 registros en total.
- 606 registros asociados a eventos interplaca.
- 892 registros asociados a eventos intraplaca

Para el modelo de Montalva et al. (2017)^[1] no se observan diferencias notorias al distinguir entre eventos interplaca e intraplaca. Solo para los períodos de 2 y 3 segundos se observa una tendencia distinta, donde para registros interplaca se observa una media negativa, es decir, para dicho caso el modelo es conservador; en cambio para el caso intraplaca se observa un ajuste con media positiva, es decir, el modelo subestima las observaciones de la base de datos. En cuanto a la dispersión, el ajuste presenta una desviación estándar cercana a la desviación unitaria del modelo, excepto para PGA y período 0.2 segundos del caso intraplaca. En general, el ajuste presenta medias y desviaciones cercanas a las del modelo, esto se puede deber a que se tiene un mayor número de registros que en Zona 1 y además la base de datos local utilizada para desarrollar el modelo es similar a la base de datos recopilada para el presente estudio.

Para el modelo de Abrahamson et al. (2016)^[3] se observa una diferencia al distinguir entre eventos interplaca e intraplaca. Para registros interplaca se tiene una media del ajuste con un corrimiento mayor hacia la derecha, es decir, hay tendencia a subestimar las observaciones de la base de datos. Para el caso intraplaca se observa que el modelo incluso puede ser conservador en los períodos 1, 2 y 3 segundos, donde se tiene una media negativa del ajuste. En el caso general, el ajuste presenta una media cercana a cero como la del modelo, excepto para PGA y período 0.2 segundos. Cabe recordar que el modelo ha sido desarrollado con una base de datos global, a diferencia de la base de datos recopilada para el presente estudio que considera únicamente eventos locales. Por último se tiene una dispersión homogénea para PGA y los distintos períodos, este se debe probablemente a que se considera una mayor cantidad de registros para Zona 2, en comparación a la cantidad de registros considerados para Zona 1.

Para el modelo Contreras Boroschek (2012)^[2], que ha sido desarrollado con data local, al igual que el de Montalva et al. (2017)^[1], tampoco se observa una notoria diferencia al distinguir entre mecanismo interplaca e intraplaca. La tendencia que presenta al ajuste, es que el modelo subestima las observaciones de la base de datos para PGA y los pseudo espectros de aceleración en los períodos 0.2, 0.5 y 1 segundos. Para los períodos de 2 y 3, el modelo puede ser conservador, al presentar una media negativa para Z_t en los pseudo espectros de aceleración. Para la dispersión de los datos, el ajuste presenta una desviación estándar cercana a la desviación unitaria del modelo, al igual que para los demás modelos, esto se debe a que la base de datos utilizada para el presente estudio, considera una mayor cantidad de registros en Zona 2, en comparación a la cantidad considerada para Zona 1.

Para el modelo de Zhao et al. (2016)^[4], al igual que para el modelo de Abrahamson et al. (2016)^[3], sí se observa una diferencia al distinguir entre evento interplaca de intraplaca. Cabe recordar que ambos modelos se han desarrollado con data global, distinta a la recopilada para el presente estudio. Para registros interplaca se tiene que el ajuste presenta una tendencia con media positiva para PGA y los pseudo espectros hasta el período 1 s. Para los pseudo

espectros de períodos 2 y 3 segundos se observa una tendencia conservadora del modelo, al presentar media negativa del ajuste. Para el caso intraplaca se observa una notoria tendencia conservadora con media nula para PGA y medias negativas para todos los períodos de los pseudo espectros de aceleración estudiados. La dispersión nuevamente presenta valores de desviación estándar para el ajuste cercanos a 1 como la del modelo, esto debido a que se cuenta con un buen número de registro en la base de datos para Zona 2.

A continuación se presentan los resultados para los parámetros LH y LLH para todos los registros en Zona 2 de Núñez.

5.2.6. Likelihood (LH) y log-Likelihood (LLH) para Zona 2 de Núñez

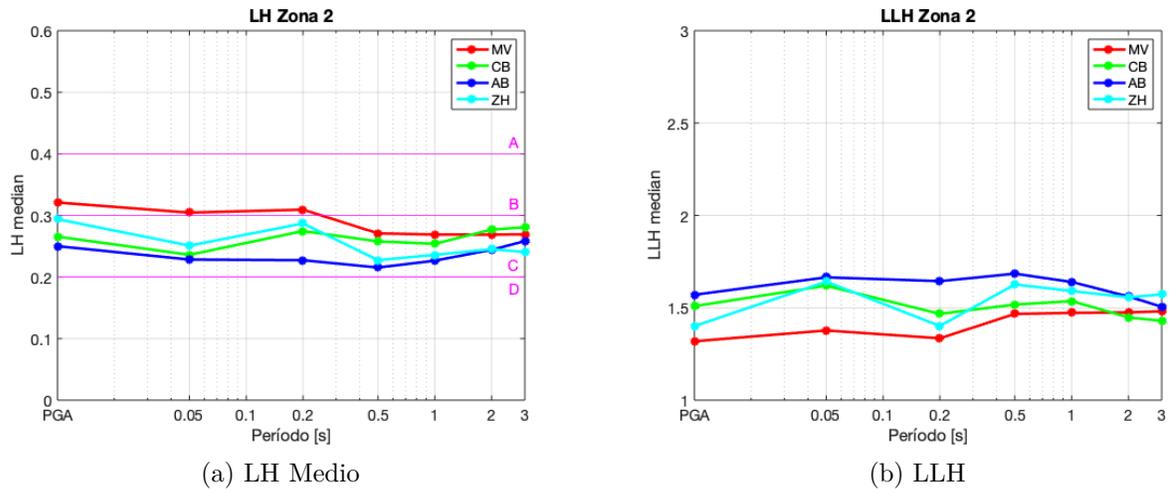


Figura 5.18: LH medio y LLH para Zona 2

A partir de los parámetros LH y LLH se observa que el modelo de Montalva et al. (2017)^[1] presenta la mejor calidad predictiva para la Zona 2. Para PGA y los pseudo espectros de aceleración en los períodos 0.05, 0.1 y 0.2 segundos, la calidad predictiva de éste modelo se muestra notoriamente superior al resto de los modelos. A partir del período 0.5 los valores de LH y LLH son similares entre los modelos, esto coincide con la tendencia que muestran los modelos en el análisis residual, donde los ajustes presentan medias negativas, es decir, en el rango que los modelos presentan una capacidad predictiva que tiende a ser conservadora, donde las predicciones presentan valores superiores a los observados en la base de datos recopilada para el presente estudio. Para la Zona 2, a diferencia de la Zona 1, donde predominaban ampliamente los registros intraplaca, se tiene un número de registros intraplaca similar al de los registros interplaca. Las principales diferencias al distinguir según tipo de evento en el análisis residual se observaban para el modelo de Abrahamson et al. (2016)^[3], justamente este modelo desarrollado a partir de data global presenta la peor calidad predictiva para los pseudo espectros de aceleración a partir del período 0.5 segundos.

5.2.7. Análisis residual según mecanismo de la Zona 3

5.2.7.1. Montalva et al. (2017)

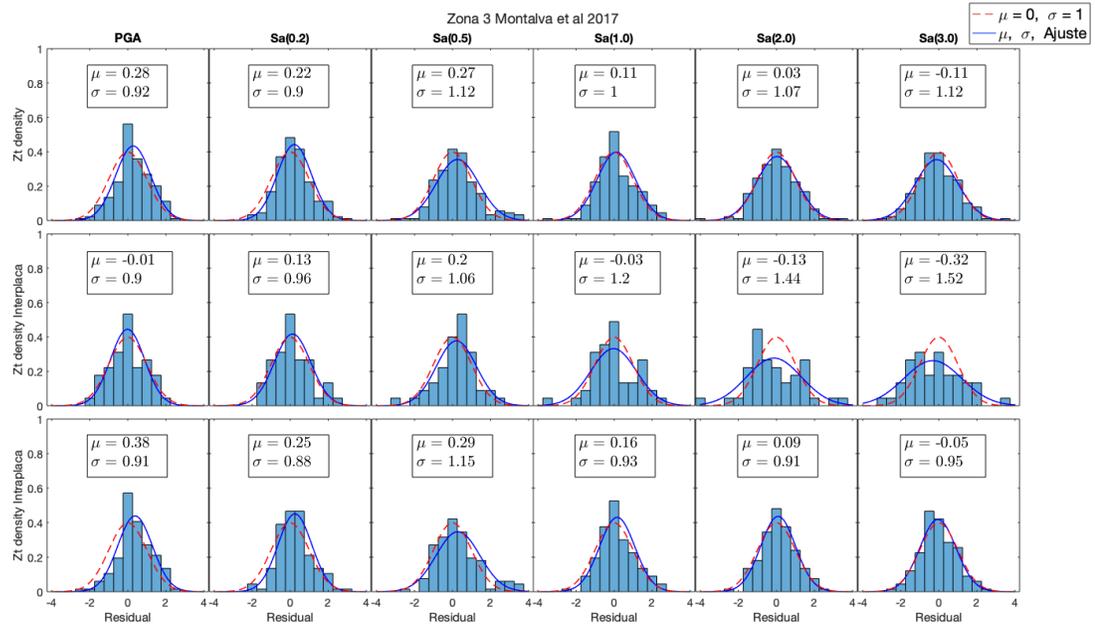


Figura 5.19: Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 3, modelo Montalva et al 2017

5.2.7.2. Abrahamson et al. (2016)

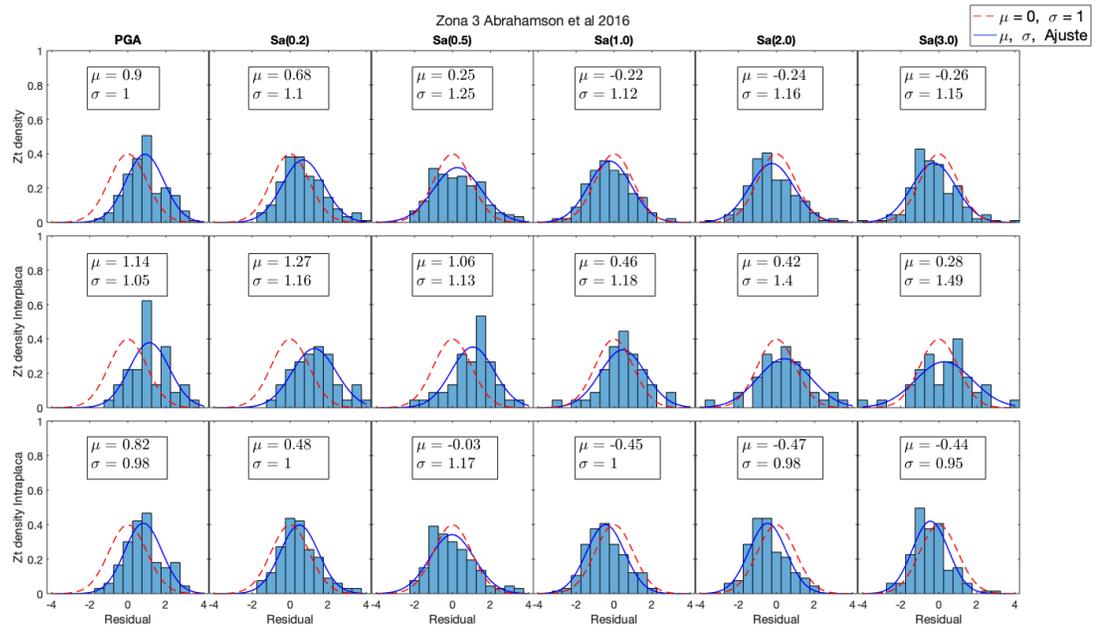


Figura 5.20: Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 3, modelo Abrahamson et al 2016

5.2.7.3. Contreras Boroschek 2012

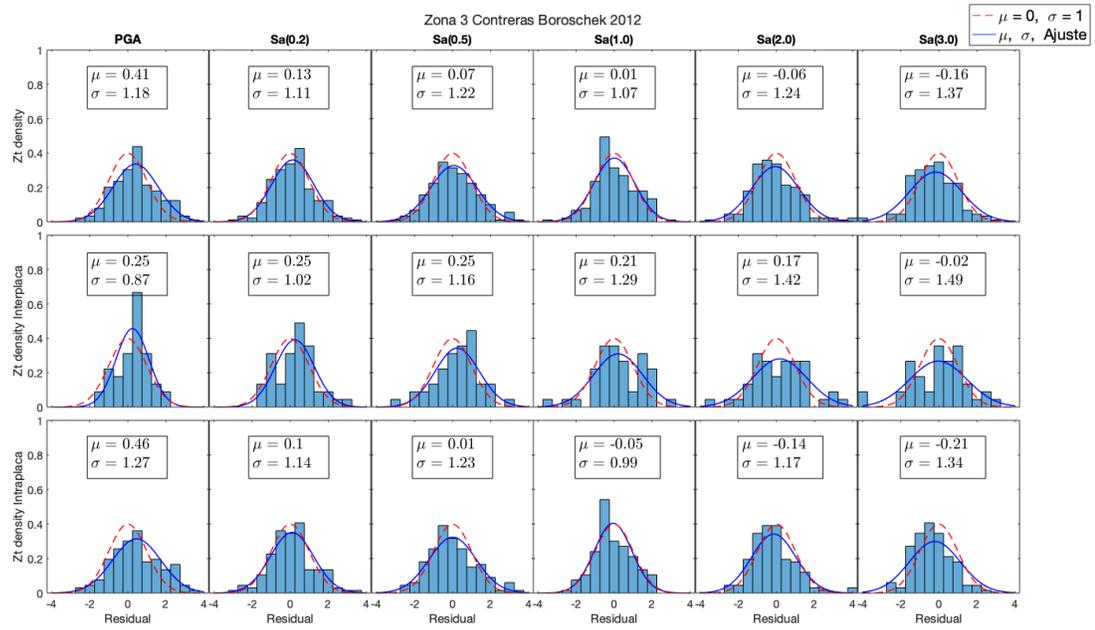


Figura 5.21: Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 3, modelo Contreras Boroschek 2012

5.2.7.4. Zhao et al. (2016)

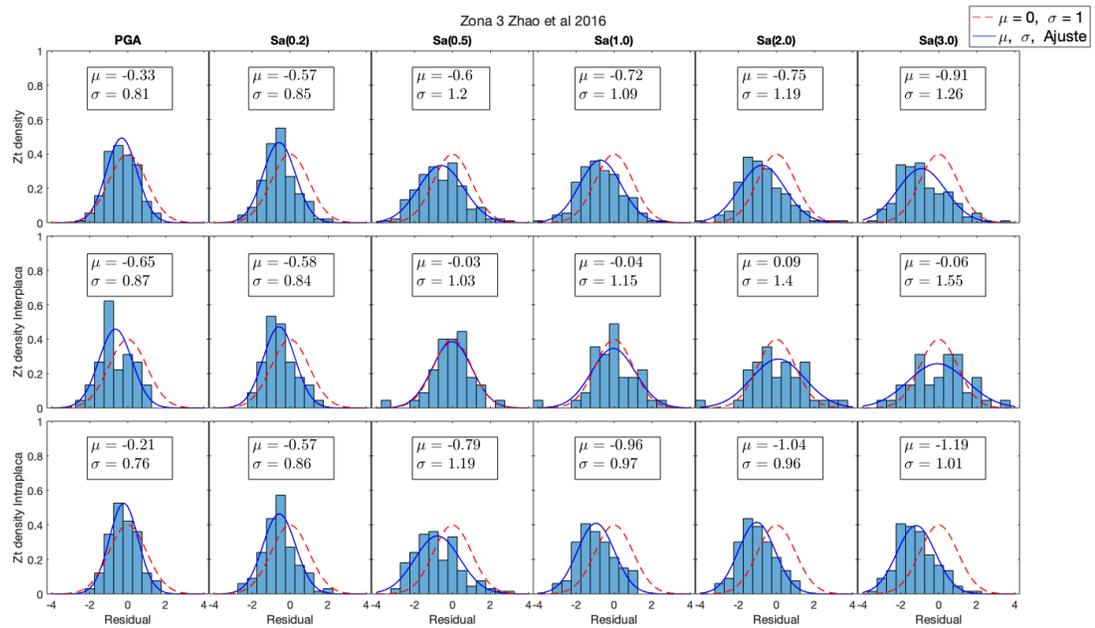


Figura 5.22: Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 3, modelo Zhao et al 2016

5.2.7.5. Resumen Análisis Residual Zona 3

Tabla 5.7: Resumen Análisis Residual Zona 3, μ

Zona 3 μ							
Modelo	Mecanismo	PGA	Sa (0.2)	Sa (0.5)	Sa (1.0)	Sa (2.0)	Sa (3.0)
Montalva et al. 2017	Todos	0.28	0.22	0.27	0.11	0.03	-0.11
	Interplaca	-0.01	0.13	0.20	-0.03	-0.13	-0.32
	Intraplaca	0.38	0.25	0.29	0.16	0.09	-0.05
Abrahamson et al. 2016	Todos	0.90	0.68	0.25	-0.22	-0.24	-0.26
	Interplaca	1.14	1.27	1.06	0.46	0.42	0.28
	Intraplaca	0.82	0.48	-0.03	-0.45	-0.47	-0.44
Contreras Boroschek 2012	Todos	0.41	0.13	0.07	0.01	-0.06	-0.16
	Interplaca	0.25	0.25	0.25	0.21	0.17	-0.02
	Intraplaca	0.46	0.10	0.01	-0.05	-0.14	-0.21
Zhao et al. 2016	Todos	-0.33	-0.57	-0.60	-0.72	-0.75	-0.91
	Interplaca	-0.65	-0.58	-0.03	-0.04	0.09	-0.06
	Intraplaca	-0.21	-0.57	-0.79	-0.96	-1.04	-1.09

Tabla 5.8: Resumen Análisis Residual Zona 3, σ

Zona 3 σ							
Modelo	Mecanismo	PGA	Sa (0.2)	Sa (0.5)	Sa (1.0)	Sa (2.0)	Sa (3.0)
Montalva et al. 2017	Todos	0.92	0.90	1.12	1.00	1.07	1.12
	Interplaca	0.90	0.96	1.06	1.20	1.44	1.52
	Intraplaca	0.91	0.88	1.15	0.93	0.91	0.95
Abrahamson et al. 2016	Todos	1.00	1.10	1.25	1.12	1.16	1.15
	Interplaca	1.05	1.16	1.13	1.18	1.40	1.49
	Intraplaca	0.98	1.00	1.17	1.00	0.98	0.95
Contreras Boroschek 2012	Todos	1.18	1.11	1.22	1.07	1.24	1.37
	Interplaca	0.87	1.02	1.16	1.29	1.42	1.49
	Intraplaca	1.27	1.14	1.23	0.99	1.17	1.34
Zhao et al. 2016	Todos	0.81	0.85	1.20	1.09	1.19	1.26
	Interplaca	0.87	0.84	1.03	1.15	1.40	1.55
	Intraplaca	0.76	0.86	1.19	0.97	0.96	1.01

Para la Zona 3, la base de datos considera la siguiente cantidad de registros:

- 178 registros en total.
- 45 registros asociados a eventos interplaca.
- 133 registros asociados a eventos intraplaca

Para el modelo Montalva et al. (2017)^[1] se observa que al distinguir entre eventos interplaca e intraplaca, los registros asociados a eventos interplaca presentan una tendencia conservadora para PGA y los pseudo espectros de aceleración en los períodos 1, 2 y 3 segundos. Para el caso intraplaca, esta tendencia se presenta solo para el ajuste del pseudo espectro en el período 3 segundos. En cuanto a la dispersión de los datos, se tiene que para el caso interplaca se observa una desviación estándar del ajuste mayor a la desviación estándar unitaria del modelo, la causa de esto puede ser el número reducido de registros interplaca en la base de datos recopilada para Zona 3.

Para el modelo Abrahamson et al. (2016)^[3], a diferencia del modelo de Montalva et al. (2017)^[1], la tendencia conservadora en el ajuste se observa para el caso de registros intraplaca, específicamente para los pseudo espectros de aceleración en los períodos 0.5, 1, 2 y 3 segundos. Para el caso interplaca, en cambio, se observa una media positiva en el ajuste, es decir, las predicciones del modelo subestiman las observaciones de la base de datos recopilada. La media del ajuste es especialmente alta para PGA y los pseudo espectros de aceleración en los períodos 0.2 y 0.5 segundos. Estas diferencias entre la media del ajuste y la media nula del modelo se pueden explicar a partir de la poca cantidad de registros que se tienen para el caso interplaca en Zona 3, donde se presenta además una alta desviación estándar en el ajuste. Por último, el hecho de que este modelo se haya desarrollado con una base de datos global, distinta a la data recopilada para este estudio también puede incidir en las diferencias que se observan al comparar la media del ajuste con la media del modelo.

Para el modelo Contreras Boroschek (2012)^[2], las medias del ajuste presentan valores bastante cercanos a cero, probablemente debido a que ha sido desarrollado a partir de data local. Al igual que para el modelo de Abrahamson et al. (2016)^[3] se observa una tendencia conservadora en el caso intraplaca para los pseudo espectros de aceleración en los períodos 1, 2 y 3 segundos. Debido a la poca cantidad de registros en la Zona 3, el ajuste presenta una dispersión bastante alejada de la desviación estándar unitaria del modelo, esto se observa más claramente para PGA y el pseudo espectro de aceleración en el período 3 segundos.

Para el modelo de Zhao et al. (2016)^[4], la tendencia es más conservadora en relación a los demás modelos estudiados. Tanto para los registros interplaca y sobre todo para los intraplaca se observan medias negativas en el ajuste. Esto indica que las predicciones del modelo presentan valores mayores a los observados en la base de datos recopilada. Este modelo, desarrollado a partir de una base de datos global, distinta de la data local recopilada para el presente estudio, muestra además una dispersión bastante alejada de la desviación estándar unitaria del modelo. Este se debe a la poca cantidad de registros que contiene la base de datos en Zona 3.

A continuación se presentan los resultados para los parámetros LH y LLH para todos los registros en Zona 3 de Núñez.

5.2.8. Likelihood (LH) y log-Likelihood para Zona 3 de Núñez

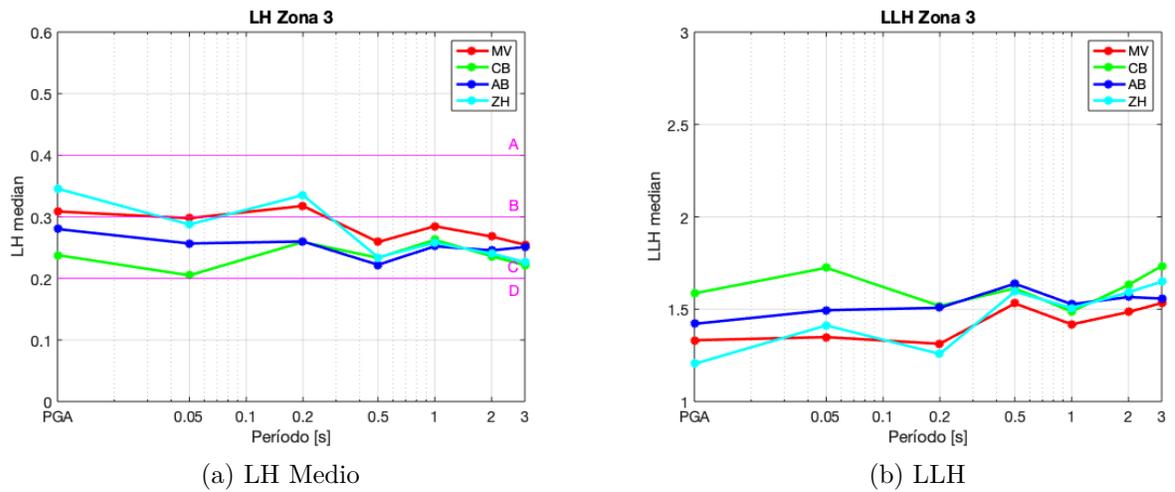


Figura 5.23: LH medio y LLH para Zona 3

Para la Zona 3, la mejor calidad predictiva para PGA, en función de los parámetros LH y LLH, la presenta el modelo de Zhao et al. (2016)^[4]. Este modelo es el que presenta la tendencia más conservadora de los modelos estudiados, con una media negativa en el ajuste del análisis residual. A partir del período 0.5 segundos, la mejor calidad predictiva para el pseudo espectro de aceleración la presenta el modelo de Montalva et al. (2017)^[1]. Esta situación coincide con el hecho de que este modelo presenta la tendencia menos conservadora en relación a los demás modelos estudiados, con una media que a pesar de ser negativa para el ajuste del análisis residual, es la más cercana a la media igual a cero en los modelos. La razón por la cuál nuevamente destaca la calidad predictiva del modelo de Montalva et al. (2017)^[1] probablemente sea la similitud entre la base de datos utilizada para desarrollar el modelo y la base de datos recopilada para el presente estudio.

5.2.9. Análisis residual según mecanismo de la Zona 4

5.2.9.1. Montalva et al. (2017)

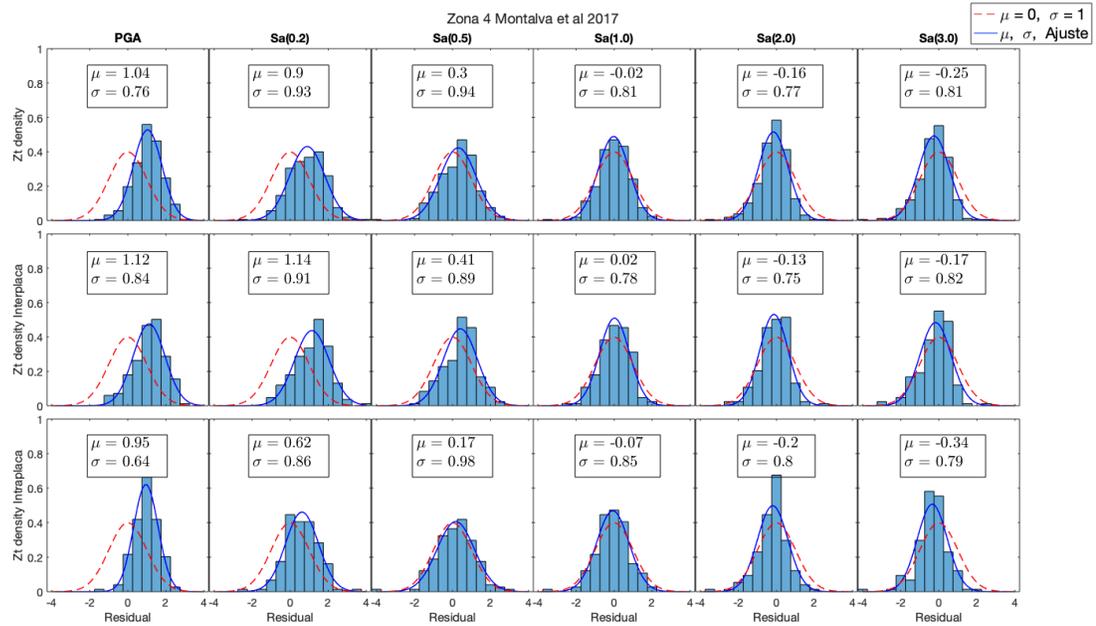


Figura 5.24: Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 4, modelo Montalva et al 2017

5.2.9.2. Abrahamson et al. (2016)

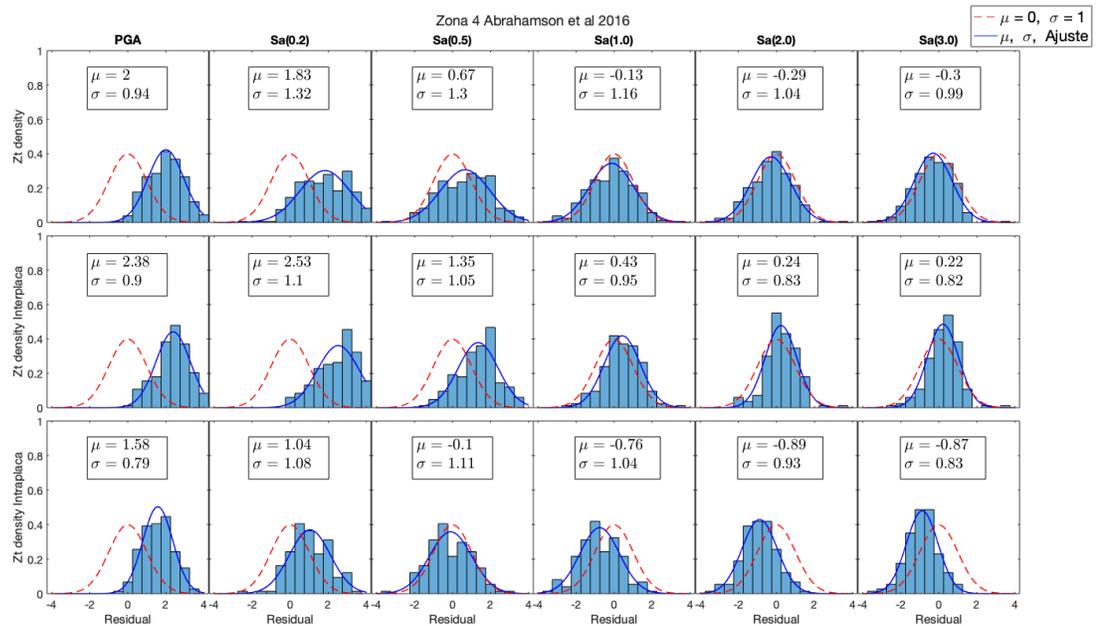


Figura 5.25: Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 4, modelo Abrahamson et al 2016

5.2.9.3. Contreras Boroschek 2012

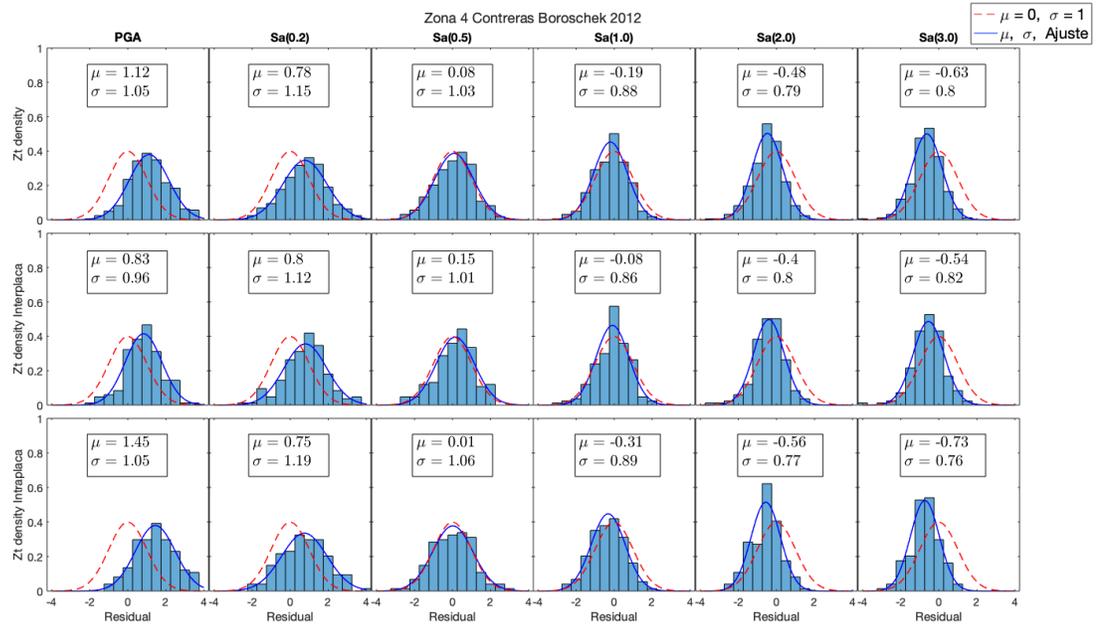


Figura 5.26: Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 4, modelo Contreras Boroschek 2012

5.2.9.4. Zhao et al. (2016)

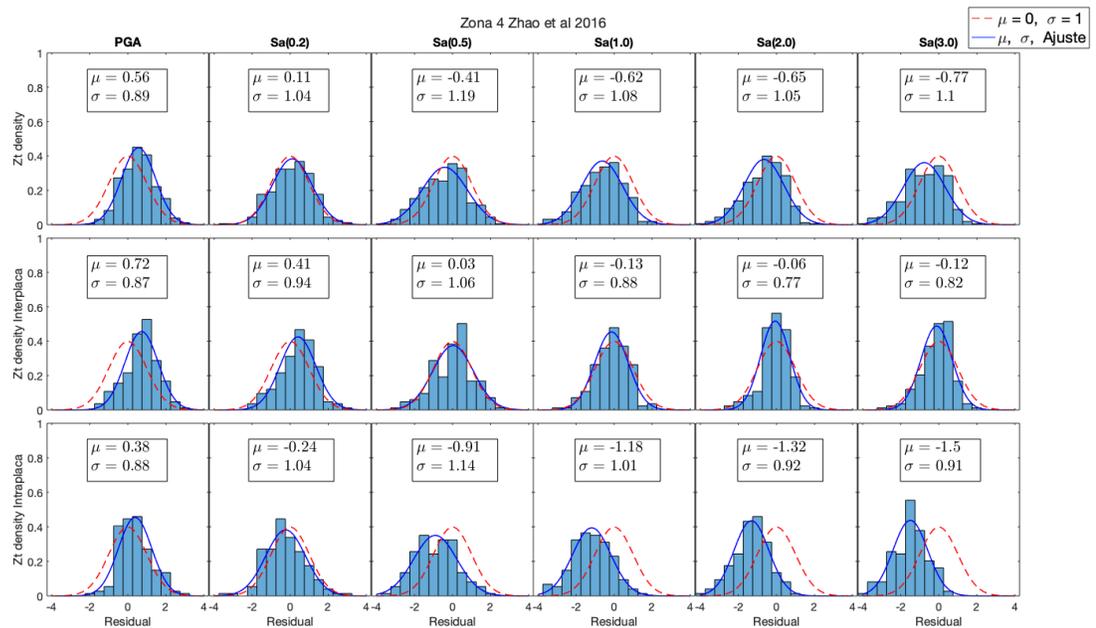


Figura 5.27: Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 4, modelo Zhao et al 2016

5.2.9.5. Resumen Análisis Residual Zona 4

Tabla 5.9: Resumen Análisis Residual Zona 4, μ

Zona 4 μ							
Modelo	Mecanismo	PGA	Sa (0.2)	Sa (0.5)	Sa (1.0)	Sa (2.0)	Sa (3.0)
Montalva et al. 2017	Todos	1.04	0.90	0.30	-0.02	-0.16	-0.25
	Interplaca	1.12	1.14	0.41	0.02	-0.13	-0.17
	Intraplaca	0.95	0.62	0.17	-0.07	-0.20	-0.34
Abrahamson et al. 2016	Todos	2.00	1.83	0.67	-0.13	-0.29	-0.30
	Interplaca	2.38	2.53	1.35	0.43	0.24	0.22
	Intraplaca	1.58	1.04	-0.10	-0.76	-0.89	-0.87
Contreras Boroschek 2012	Todos	1.12	0.78	0.08	-0.19	-0.48	-0.63
	Interplaca	0.83	0.80	0.15	-0.08	-0.40	-0.54
	Intraplaca	1.45	0.75	0.01	-0.31	-0.56	-0.73
Zhao et al. 2016	Todos	0.56	0.11	-0.41	-0.62	-0.65	-0.77
	Interplaca	0.72	0.41	0.03	-0.13	-0.06	-0.12
	Intraplaca	0.38	-0.24	-0.91	-1.18	-1.32	-1.50

Tabla 5.10: Resumen Análisis Residual Zona 4, σ

Zona 4 σ							
Modelo	Mecanismo	PGA	Sa (0.2)	Sa (0.5)	Sa (1.0)	Sa (2.0)	Sa (3.0)
Montalva et al. 2017	Todos	0.76	0.93	0.94	0.81	0.77	0.81
	Interplaca	0.84	0.91	0.89	0.78	0.75	0.82
	Intraplaca	0.64	0.86	0.98	0.85	0.80	0.79
Abrahamson et al. 2016	Todos	0.94	1.32	1.30	1.16	1.04	0.99
	Interplaca	0.90	1.10	1.05	0.95	0.83	0.82
	Intraplaca	0.79	1.08	1.11	1.04	0.93	0.83
Contreras Boroschek 2012	Todos	1.05	1.15	1.03	0.88	0.79	0.80
	Interplaca	0.96	1.12	1.01	0.86	0.80	0.82
	Intraplaca	1.05	1.19	1.06	0.89	0.77	0.76
Zhao et al. 2016	Todos	0.89	1.04	1.19	1.08	1.05	1.10
	Interplaca	0.87	0.94	1.06	0.88	0.77	0.82
	Intraplaca	0.88	1.04	1.14	1.01	0.92	0.91

Para la Zona 4, la base de datos considera la siguiente cantidad de registros:

- 315 registros en total.
- 167 registros asociados a eventos interplaca.
- 148 registros asociados a eventos intraplaca

Para el modelo Montalva et al. (2017)^[1] se observa una tendencia en el ajuste para PGA y el pseudo espectro de aceleración en el período 0.2 segundos, a subestimar las observaciones de la base de datos. En cambio, a partir del período 1 segundo se observa una tendencia conservadora en el ajuste para el pseudo espectro de aceleración, con una media negativa, aunque bastante cercana a cero, que es la media del modelo. En cuanto a la dispersión, se observan desviaciones estándar bastante alejadas de 1, que corresponde a la desviación estándar del modelo. Esto probablemente se deba a que en comparación a las demás Zonas estudiadas se tiene una cantidad reducida de registros, por lo tanto, el ajuste puede ser menos representativo. Se mantiene además la tendencia a no presentar una notoria diferencia al distinguir entre registros interplaca e intraplaca, debido a que el modelo se ha desarrollado a partir una data local, muy similar a la recopilada para elaborar el presente estudio.

Para el modelo de Abrahamson et al. (2016)^[3] también se observa una tendencia en el ajuste de PGA y el pseudo espectro de aceleración en el período 0.2 segundos, a subestimar las observaciones de la base de datos. A partir del período 1 segundo, se observa una notoria diferencia al distinguir entre registro interplaca e intraplaca. Para el primer caso se mantiene la tendencia a subestimar las observaciones, aunque con una media del ajuste más cercana a cero. Para el caso intraplaca, en cambio, se observa una tendencia conservadora, con una media del ajuste negativa, lo que indica que las predicciones del modelo sobrestiman las observaciones en la base de datos recopilada. La diferencia al distinguir entre tipos de evento, puede producirse debido a que el modelo se ha desarrollado en base a data global y no local, como la base de datos utilizada en presente estudio.

Para el modelo de Contreras Boroschek (2012)^[2] se mantiene tendencia del modelo de Montalva et al. (2017). Es decir, no se observan notorias diferencias al distinguir entre registros asociados a eventos interplaca e intraplaca. Para ambos tipos de eventos, se observa una media positiva para el ajuste de PGA y el pseudo espectro de aceleración en los períodos 0.2 y 0.5 segundos. Para los demás períodos se observa una tendencia conservadora, con una media negativa para el ajuste negativa, es decir, las predicciones del modelo en este rango sobrestiman lo observado en la base de datos recopilada. Cabe recordar que este modelo también ha sido desarrollado en base a data local, sin embargo, considera una data más reducida en comparación a la recopilada para elaborar el presente estudio.

Para el modelo de Zhao et al. (2016)^[4], desarrollado a partir de data global, se mantiene la tendencia en el ajuste a subestimar el valor de PGA, sin embargo para los pseudo espectros de aceleración en los demás períodos se observa la tendencia más conservadoras en relación a los demás modelos, con medias negativas en el ajuste alejadas del cero. Al comparar entre registros asociados a eventos interplaca e intraplaca, se observa una tendencia conservadora mucho más marcada para el caso intraplaca, con medias en el ajuste menores. En cuanto a la dispersión, se observan desviaciones estándar alejadas de 1, probablemente debido a la poca cantidad de registros que se tienen en la base de datos para la Zona 4.

A continuación se presentan los resultados para los parámetros LH y LLH para todos los registros en Zona 4 de Núñez.

5.2.10. Likelihood (LH) y log-Likelihood (LLH) para Zona 4 de Núñez

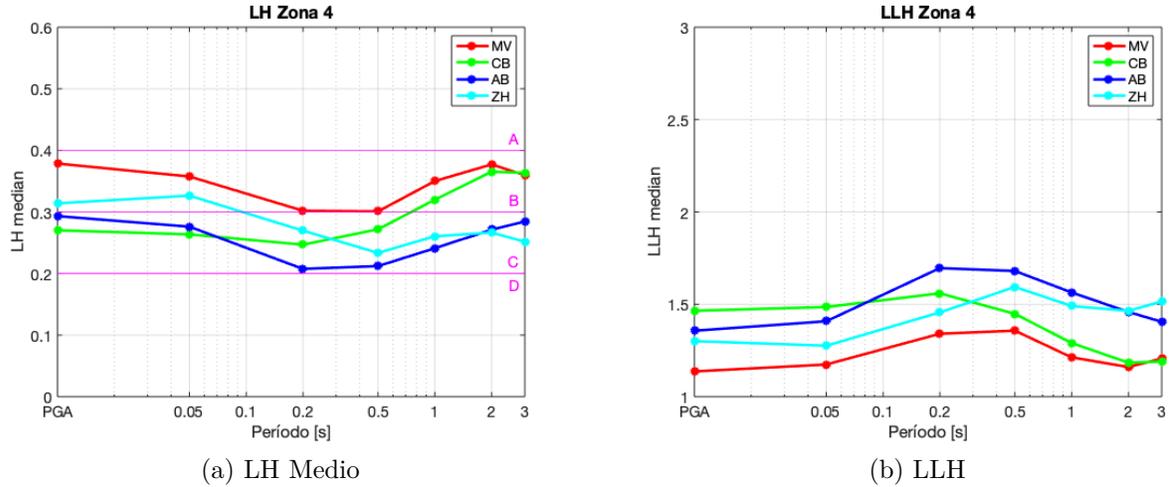


Figura 5.28: LH medio y LLH para Zona 4

Para la Zona 4, a pesar de contar con una cantidad reducida de registros, nuevamente la mayor capacidad predictiva en función de los parámetros LH y LLH, la presenta el Modelo de Montalva et al. (2017)^[1], esto sucede probablemente debido a que la base de datos utilizada para desarrollar este modelo y sus rangos de validez son los más similares a la base de datos recopilada para elaborar el presente estudio. Este modelo, tanto para PGA como para los pseudo espectros de aceleración en los demás períodos, se ubica en Clase B para el parámetro LH, lo cual indica que el modelo presenta una capacidad predictiva intermedia. Para el resto de los modelos se observa que para los distintos períodos, en ningún momento se baja a la categoría D, de capacidad predictiva inaceptable. Se observa además, que a partir del período 0.5, todos los modelos presentan valores de LH más altos y valores de LLH más bajos, lo cual indica una mejora en la capacidad predictiva de los modelos en este rango de períodos. Esta mejoría coincide con la tendencia conservadora que se observa en su análisis residual, donde el ajuste de los histogramas presenta una media negativa, con tendencia a sobrestimar las observaciones de la base de datos.

5.2.11. Análisis residual según mecanismo de la Zona 5

5.2.11.1. Montalva et al. (2017)

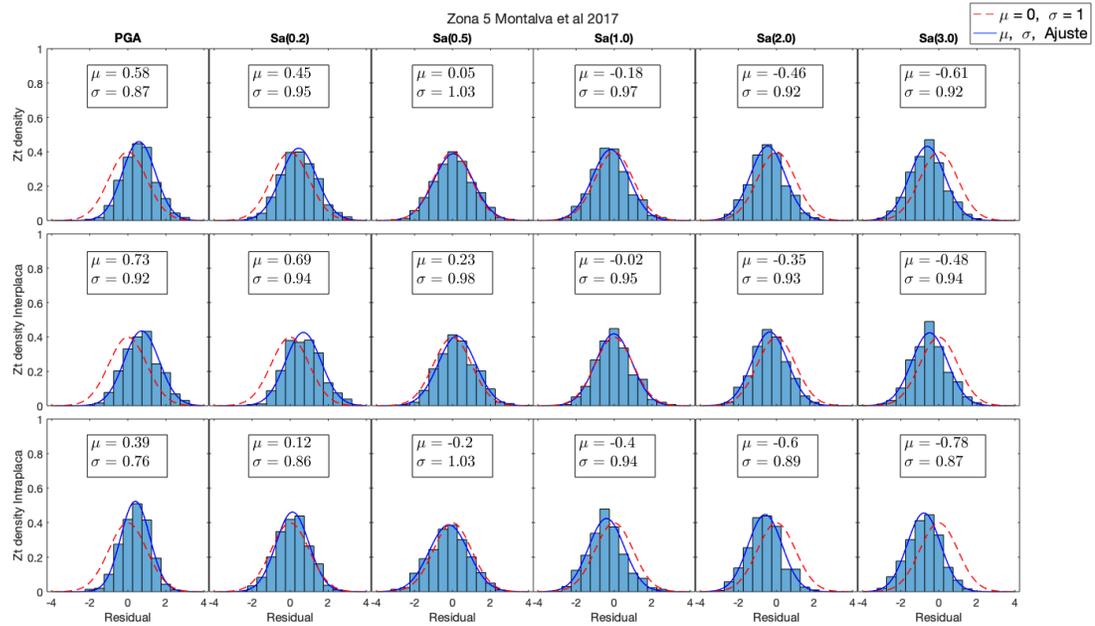


Figura 5.29: Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 5, modelo Montalva et al 2017

5.2.11.2. Abrahamson et al. (2016)

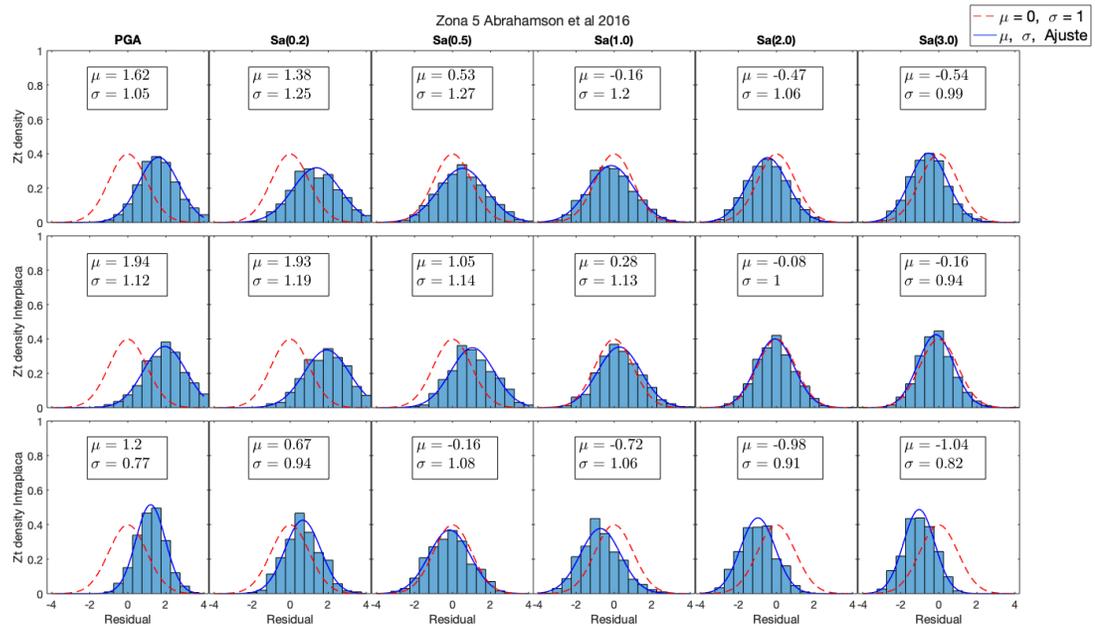


Figura 5.30: Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 5, modelo Abrahamson et al 2016

5.2.11.3. Contreras Boroschek 2012

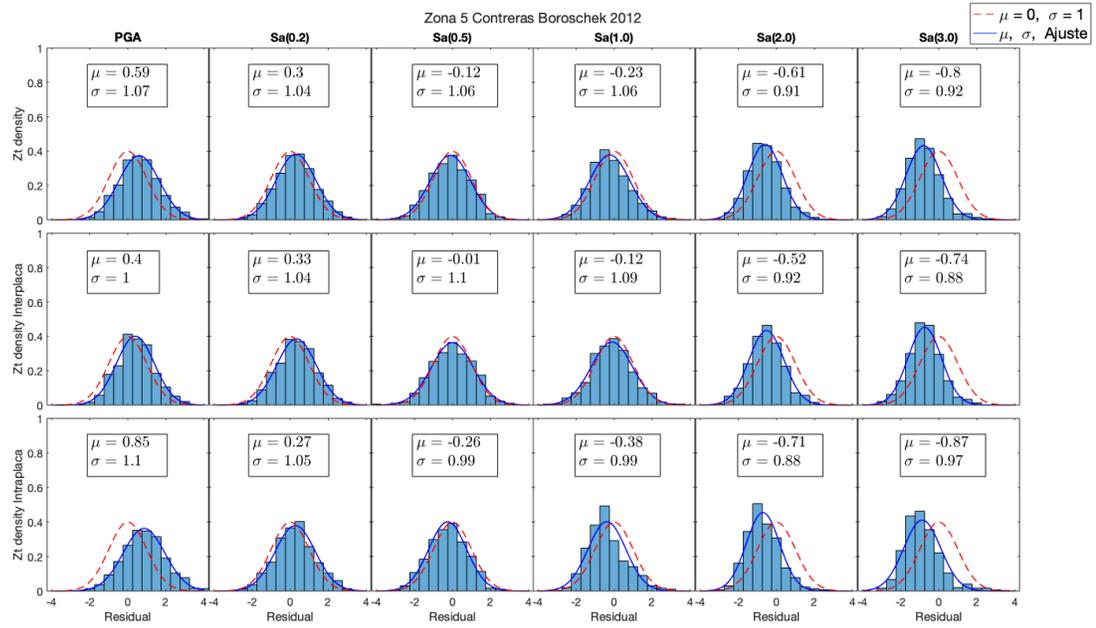


Figura 5.31: Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 5, modelo Contreras Boroschek 2012

5.2.11.4. Zhao et al. (2016)

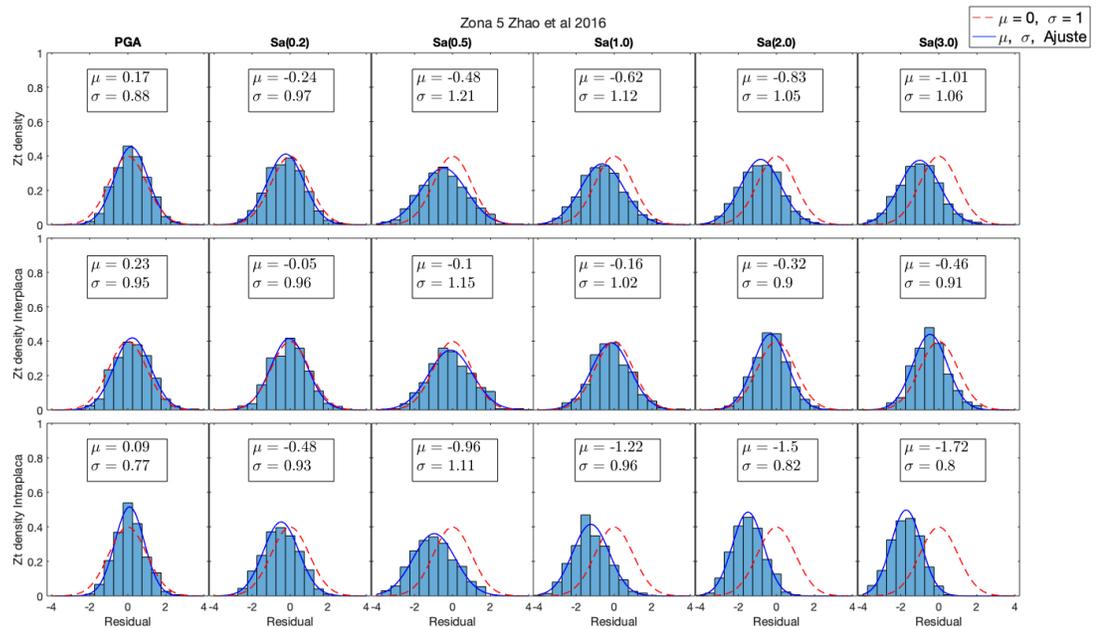


Figura 5.32: Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 5, modelo Zhao et al 2016

5.2.11.5. Resumen Análisis Residual Zona 5

Tabla 5.11: Resumen Análisis Residual Zona 5, μ

Zona 5 μ							
Modelo	Mecanismo	PGA	Sa (0.2)	Sa (0.5)	Sa (1.0)	Sa (2.0)	Sa (3.0)
Montalva et al. 2017	Todos	0.58	0.45	0.05	-0.18	-0.46	-0.61
	Interplaca	0.73	0.69	0.23	-0.20	-0.35	-0.48
	Intraplaca	0.39	0.12	-0.20	-0.40	-0.60	-0.78
Abrahamson et al. 2016	Todos	1.62	1.38	0.53	-0.16	-0.47	-0.54
	Interplaca	1.94	1.93	1.05	0.28	-0.08	-0.16
	Intraplaca	1.20	0.67	-0.16	-0.72	-0.98	-1.04
Contreras Boroschek 2012	Todos	0.59	0.30	-0.12	-0.23	-0.61	-0.80
	Interplaca	0.40	0.33	-0.01	-0.12	-0.52	-0.74
	Intraplaca	0.85	0.27	-0.26	-0.38	-0.71	-0.87
Zhao et al. 2016	Todos	0.17	-0.24	-0.48	-0.62	-0.83	-1.01
	Interplaca	0.23	-0.05	-0.10	-0.16	-0.32	-0.46
	Intraplaca	0.09	-0.48	-0.96	-1.22	-1.50	-1.72

Tabla 5.12: Resumen Análisis Residual Zona 5, σ

Zona 5 σ							
Modelo	Mecanismo	PGA	Sa (0.2)	Sa (0.5)	Sa (1.0)	Sa (2.0)	Sa (3.0)
Montalva et al. 2017	Todos	0.87	0.95	1.03	0.97	0.92	0.92
	Interplaca	0.92	0.94	0.98	0.95	0.93	0.94
	Intraplaca	0.76	0.86	1.03	0.94	0.89	0.87
Abrahamson et al. 2016	Todos	1.05	1.25	1.27	1.20	1.06	0.99
	Interplaca	1.12	1.19	1.14	1.13	1.00	0.94
	Intraplaca	0.77	0.94	1.08	1.06	0.91	0.82
Contreras Boroschek 2012	Todos	1.07	1.04	1.06	1.06	0.91	0.92
	Interplaca	1.00	1.04	1.10	1.09	0.92	0.88
	Intraplaca	1.10	1.05	0.99	0.99	0.88	0.97
Zhao et al. 2016	Todos	0.88	0.97	1.21	1.12	1.05	1.06
	Interplaca	0.95	0.96	1.15	1.02	0.90	0.91
	Intraplaca	0.77	0.93	1.11	0.96	0.82	0.80

Para la Zona 5 se tiene un número importante de registros, pues se considera el Terremoto de Illapel 2015 Mw 8.4. La base de datos considera la siguiente cantidad de registros:

- 1377 registros en total.
- 780 registros asociados a eventos interplaca.
- 597 registros asociados a eventos intraplaca

Para el modelo de Montalva et al. (2017)^[1] se observa una tendencia en el ajuste a subestimar los valores de PGA con medias mayores a cero. Esta situación se tiene tanto para el caso general como al distinguir entre registros interplaca e intraplaca. Sin embargo, al igual que en las zonas anteriores, se observa una tendencia más conservadora para la predicción de los pseudo espectros de aceleración a partir del período 1 segundo. Esta tendencia es más marcada para el caso intraplaca donde la media en el ajuste es menor y se tienden a sobrestimar las predicciones del modelo en relación a las observaciones de la base de datos recopilada.

Para el modelo de Abrahamson et al. (2016)^[3], se observa la misma tendencia que para el modelo de Montalva et al. (2017)^[1], es decir, se tiene un corrimiento hacia la derecha en el ajuste para PGA y el pseudo espectro de aceleración en el período 1 segundo. Esto indica que las predicciones del modelo subestiman lo observado en dichos casos. A diferencia del modelo de Montalva et al. (2017)^[1] sí se observa una diferencia en la tendencia al distinguir registros interplaca de intraplaca. Para el primer caso se observan medias cercanas a cero, mientras que para el caso intraplaca se tiene un marcado corrimiento hacia la izquierda, con medias negativas en el ajuste, lo cuál indica que las predicciones sobrestiman lo observado. Esta distinción, como se ha observado en zonas anteriores puede explicarse en el contexto de que este modelo ha sido desarrollado a partir de una base de datos global y no una base de datos local, como la recopilada en el presente estudio. Para la dispersión de los datos, se observan valores de desviación estándar cercanos a uno en el ajuste, esto coincide con la desviación estándar unitaria de los modelos. Esta coincidencia se debe probablemente al hecho de que se tiene una cantidad numerosa de registros en la base de datos para la Zona 5, puesto que se consideran los registros asociados al Terremoto de Illapel 2015 Mw 8.4.

Para el modelo de Contreras Boroschek (2012)^[2] se repite lo observado en el modelo de Montalva et al. (2017)^[1], es decir, no se tiene una diferencia notoria al distinguir entre registros asociados a eventos interplaca o intraplaca. Se repite además la tendencia a mostrar ajustes con medias positivas y cercanas a cero para PGA y el pseudo espectro de aceleración el período 1 segundo. A partir de los siguientes períodos se tiene una tendencia conservadora, donde las predicciones del modelo sobrestiman lo observado en la base datos. Las similitudes entre ambos modelos se explican en el hecho de que ambos han sido desarrollados a partir de una base de datos local.

Para el modelo de Zhao et al. (2016)^[4] se observa el ajuste para PGA con la media más cercana a cero. Para los pseudo espectros de aceleración se observa la tendencia más conservadora, con ajustes cuya media es negativa y menor en relación a los demás modelos. Al distinguir interplaca e intraplaca, se observa que la tendencia conservadora es más marcada para el caso intraplaca con un mayor corrimiento hacia la izquierda en el ajuste. A pesar de ser un modelo desarrollado a partir de data global se observan desviaciones estándar similares a la desviación estándar unitaria de los modelos, esto se debe probablemente a la numerosa

cantidad de registros recopilados para Zona 5.

A continuación se presentan los resultados para los parámetros LH y LLH para todos los registros en Zona 5 de Núñez.

5.2.12. Likelihood (LH) y log-Likelihood para Zona 5 de Núñez

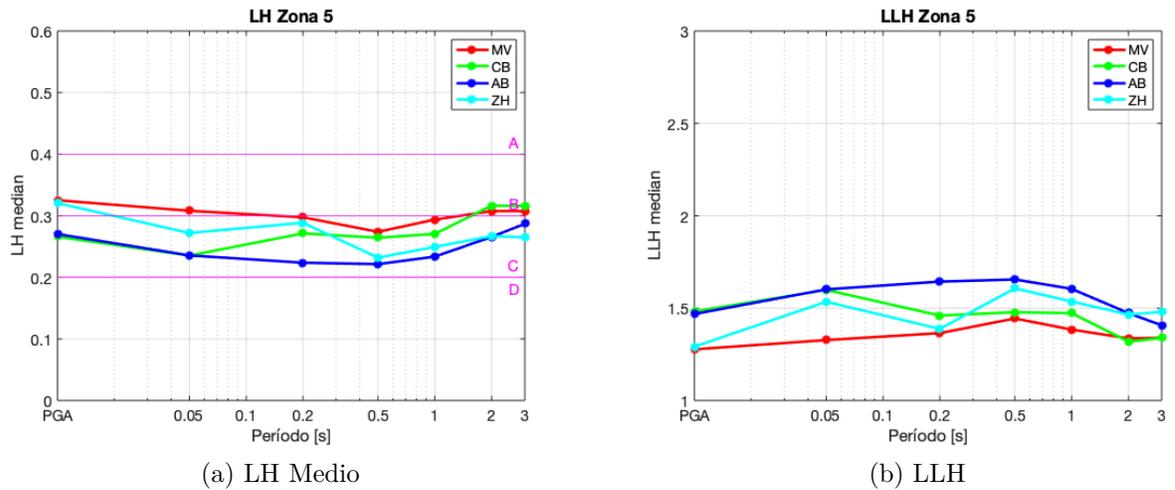


Figura 5.33: LH medio y LLH para Zona 5

A partir de los parámetros LH y LLH, se puede señalar nuevamente que el modelo de Montalva et al. (2017)^[1] presenta el mejor ajuste. En este contexto, parece ser determinante que la base de datos a partir de la cual se ha desarrollado este modelo es la más similar a la base de datos que se ha recopilado para el presente estudio. La mejor clasificación de la capacidad predictiva se observa para PGA donde los Modelos de Montalva et al. (2017)^[1] y de Zhao et al. (2016)^[4] se ubican en categoría B o intermedia. Para los pseudo espectros de aceleración, a partir del período 1 segundo se observa una mejor capacidad predictiva en general de los 4 modelos. Esto coincide con la tendencia conservadora que se observa en el ajuste del análisis residual, donde se tienen medias negativas. Otro aspecto importante a destacar es que ninguno de los modelos presenta valores de LH inferiores en categoría D o inaceptable, es decir, bajo ciertas condiciones, todos los modelos podrían ser aplicables para la Zona 5, esto se explica en parte debido a que en esta zona se concentra un mayor número de registros, lo cual permite elaborar un ajuste más confiable.

5.2.13. Análisis residual según mecanismo de la Zona 6

5.2.13.1. Montalva et al. (2017)

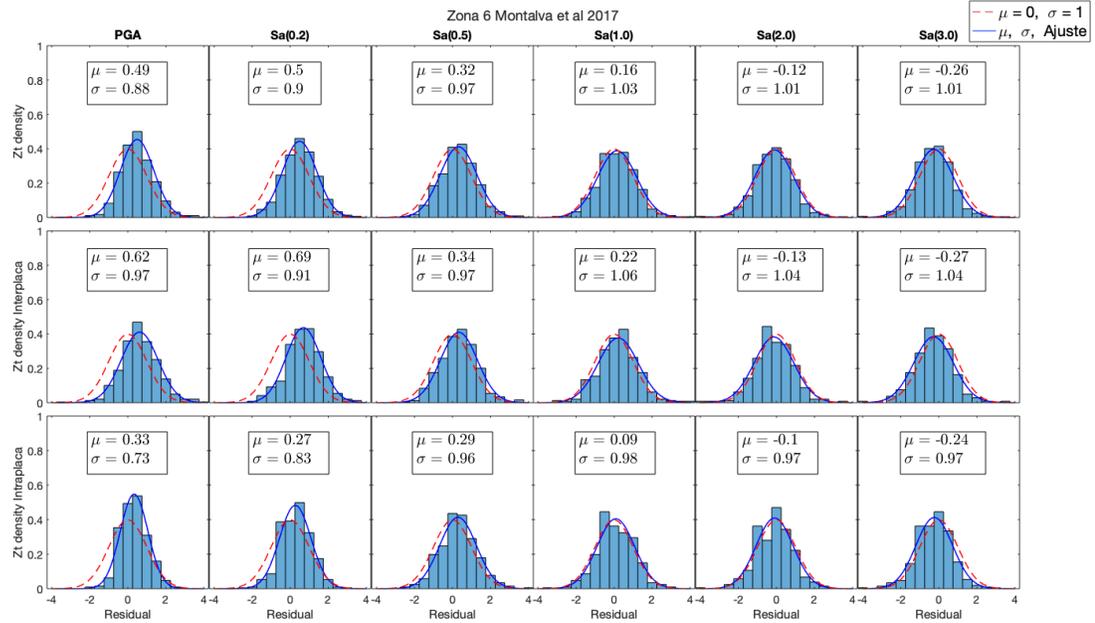


Figura 5.34: Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 6, modelo Montalva et al 2017

5.2.13.2. Abrahamson et al. (2016)

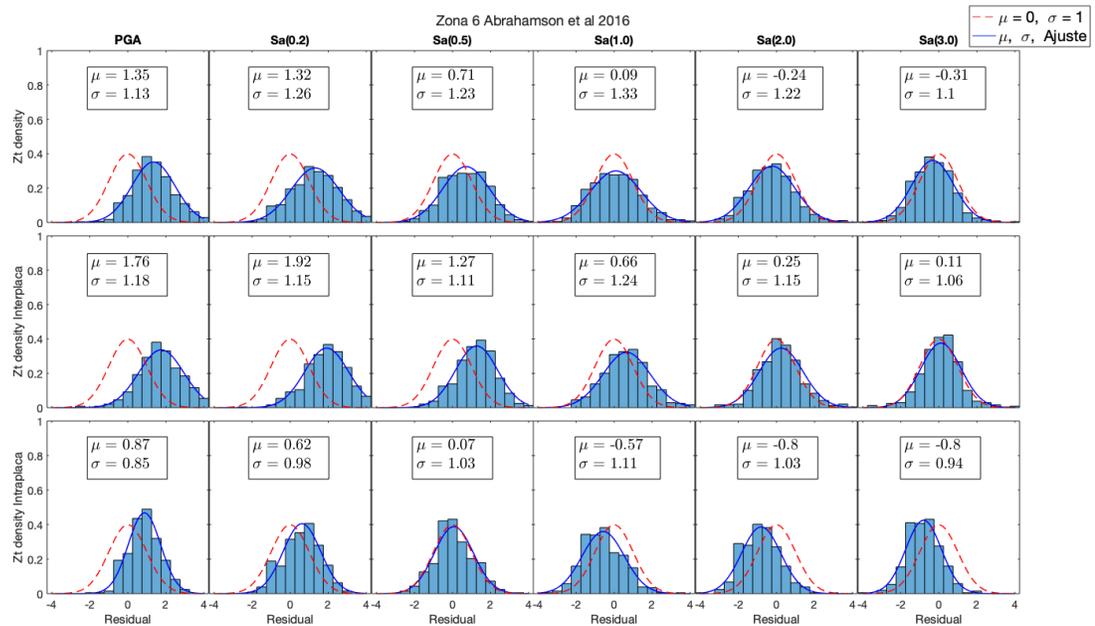


Figura 5.35: Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 6, modelo Abrahamson et al 2016

5.2.13.3. Contreras Boroschek 2012

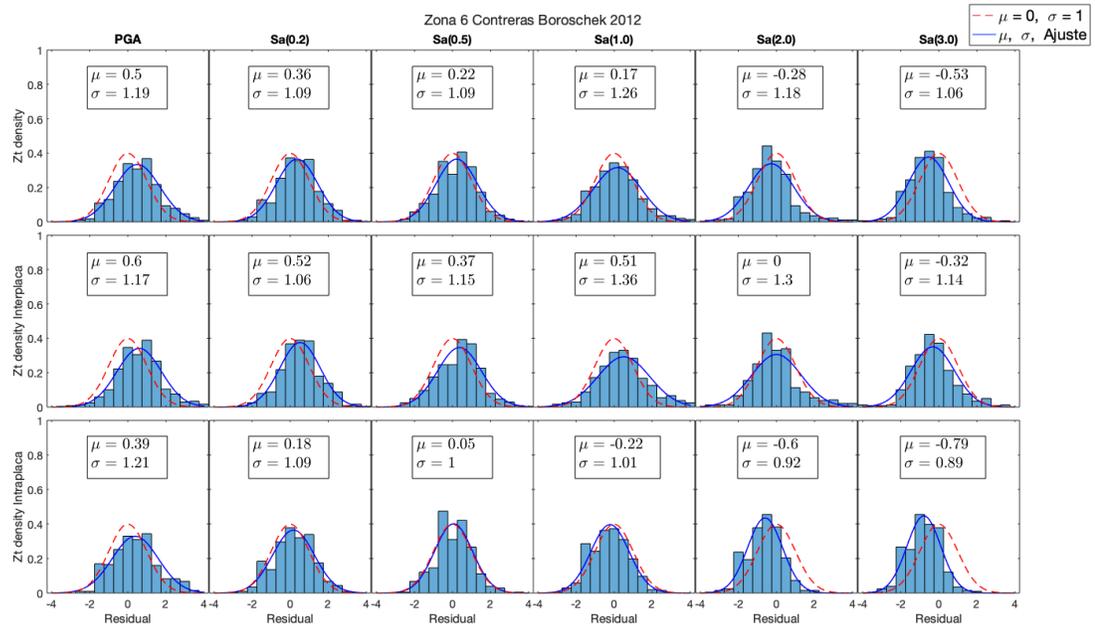


Figura 5.36: Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 6, modelo Contreras Boroschek 2012

5.2.13.4. Zhao et al. (2016)

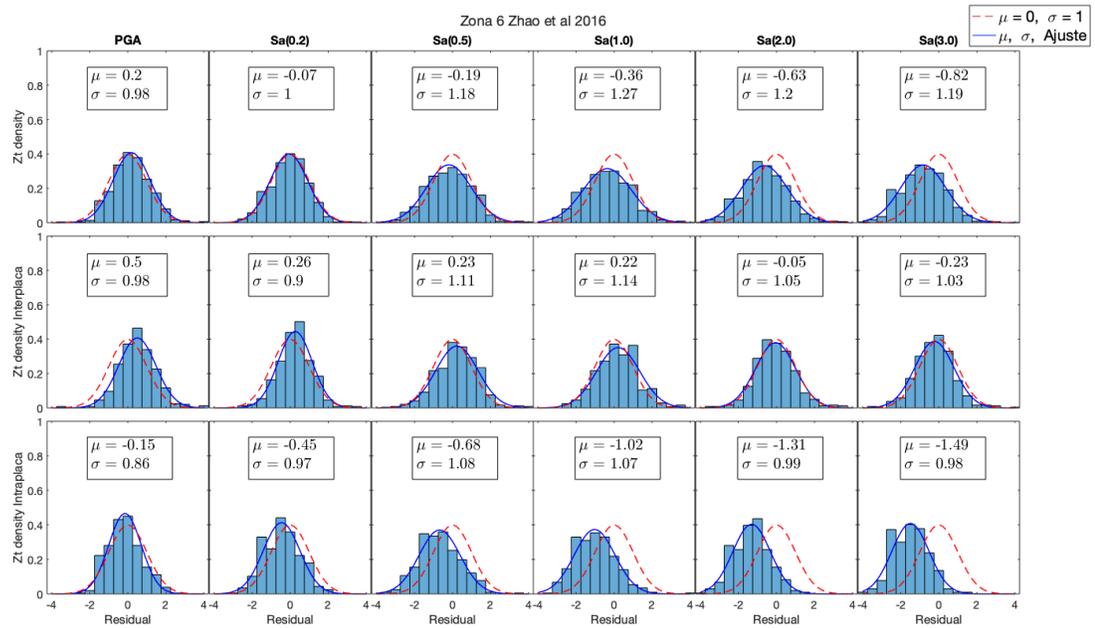


Figura 5.37: Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 6, modelo Zhao et al 2016

5.2.13.5. Resumen Análisis Residual Zona 6

Tabla 5.13: Resumen Análisis Residual Zona 6, μ

Zona 6 μ							
Modelo	Mecanismo	PGA	Sa (0.2)	Sa (0.5)	Sa (1.0)	Sa (2.0)	Sa (3.0)
Montalva et al. 2017	Todos	0.49	0.50	0.32	0.16	-0.12	-0.26
	Interplaca	0.62	0.69	0.34	0.22	-0.13	-0.27
	Intraplaca	0.33	0.27	0.29	0.09	-0.10	-0.24
Abrahamson et al. 2016	Todos	1.35	1.32	0.71	0.09	-0.24	-0.31
	Interplaca	1.76	1.92	1.27	0.66	0.25	0.11
	Intraplaca	0.87	0.62	0.07	-0.57	-0.80	-0.80
Contreras Boroschek 2012	Todos	0.50	0.36	0.22	0.17	-0.28	-0.53
	Interplaca	0.60	0.52	0.37	0.51	0.00	-0.32
	Intraplaca	0.39	0.18	0.05	-0.22	-0.60	-0.79
Zhao et al. 2016	Todos	0.20	-0.07	-0.19	-0.36	-0.63	-0.82
	Interplaca	0.50	0.26	0.23	0.22	-0.05	-0.23
	Intraplaca	-0.15	-0.45	-0.68	-1.02	-1.31	-1.49

Tabla 5.14: Resumen Análisis Residual Zona 6, σ

Zona 6 σ							
Modelo	Mecanismo	PGA	Sa (0.2)	Sa (0.5)	Sa (1.0)	Sa (2.0)	Sa (3.0)
Montalva et al. 2017	Todos	0.88	0.90	0.97	1.03	1.01	1.01
	Interplaca	0.97	0.91	0.97	1.06	1.04	1.04
	Intraplaca	0.73	0.83	0.96	0.98	0.97	0.97
Abrahamson et al. 2016	Todos	1.13	1.26	1.23	1.33	1.22	1.10
	Interplaca	1.18	1.15	1.11	1.24	1.15	1.06
	Intraplaca	0.85	0.98	0.03	1.11	1.03	0.94
Contreras Boroschek 2012	Todos	1.19	1.09	1.09	1.26	1.18	1.06
	Interplaca	1.17	1.06	1.15	1.36	1.30	1.14
	Intraplaca	1.21	1.09	1.00	1.01	0.92	0.89
Zhao et al. 2016	Todos	0.98	1.00	1.18	0.27	1.20	1.19
	Interplaca	0.98	0.90	1.11	1.14	1.05	1.03
	Intraplaca	0.86	0.97	1.08	1.07	0.99	0.98

Para la Zona 6 la base de datos considera la siguiente cantidad de registros:

- 891 registros en total.
- 478 registros asociados a eventos interplaca.
- 413 registros asociados a eventos intraplaca

Para el modelo de Montalva et al. (2017)^[1], el ajuste del análisis residual presenta medias cuyo valor es bastante cercano a cero. Nuevamente se repite la tendencia de zonas anteriores, tal que para los pseudo espectros de aceleración en los períodos 2 y 3 segundos se tienen medias de valor negativo, es decir, para este rango las predicciones del modelo sobrestiman lo observado en la base de datos. Además, no se observan grandes diferencias al distinguir los registros asociados a eventos interplaca e intraplaca. Para la dispersión de los datos, a excepción de PGA en el caso intraplaca, en general se observan valores de desviación estándar cercanos a la desviación estándar unitaria del modelo, tanto para interplaca, como intraplaca. Esta situación se ve favorecida por el hecho de que se tiene un buen número de registros en la base de datos para la Zona 6 y además el número de registros interplaca es similar al número de registros intraplaca.

Para el modelo de Abrahamson et al. (2016)^[3] se observa un notable corrimiento del ajuste hacia la derecha para PGA y los primeros pseudo espectros de aceleración. A diferencia del modelo anterior, sí se observa una diferencia notoria al distinguir entre registros asociados a eventos interplaca de intraplaca. Para el primer caso, en ningún período se observa una media negativa para el ajuste. En cambio, para el caso intraplaca sí se observa una tendencia conservadora a partir del pseudo espectro de aceleración en el período de 1 segundo. Para la dispersión de los datos, se observan valores similares a los del modelo de Montalva et al. (2017)^[1], esto debido al buen número de registros que se tiene en Zona 6 y a la distribución homogénea entre interplaca e intraplaca para esta zona.

Para el modelo de Contreras Boroschek (2012)^[2] se tiene un ajuste con un corrimiento hacia la derecha menor al observado en el modelo de Abrahamson et al. (2016) para PGA y los primeros pseudo espectros de aceleración. Esta menor tendencia de las predicciones a subestimar lo observado probablemente se deba a que el modelo de Contreras Boroschek (2012)^[2] ha sido desarrollado a partir de data local. Otro aspecto notable es que al igual que en los 2 modelos anteriores se observa un ajuste con media negativa para los pseudo espectros de aceleración a partir del período de 1 segundo en el caso intraplaca. Esta tendencia conservadora se observa sólo en el último período para el caso interplaca. En cuanto a la desviación estándar de los ajustes, se observan valores cercanos a la desviación estándar unitaria del modelo, al igual que en los modelos señalados anteriormente.

Para el modelo de Zhao et al. (2016)^[4], desarrollado a partir de data global, nuevamente se presenta el ajuste con la tendencia más conservadora de los 4 modelos. Al considerar la totalidad de los registros, únicamente el ajuste para PGA no presenta una media negativa. Para el resto de períodos, los pseudo espectros que predice el modelo sobrestiman lo observado en la base de datos recopilada para el presente estudio. Esta tendencia conservadora se acentúa para el caso intraplaca en los períodos 1, 2 y 3 segundos, donde la media del ajuste es bastante menor en comparación al caso interplaca. Para la desviación estándar, nuevamente

se presentan valores cercanos a 1, esto gracias al buen número de registros en Zona 6.

A continuación se presentan los resultados para los parámetros LH y LLH para todos los registros en Zona 6 de Núñez.

5.2.14. Likelihood (LH) y log-Likelihood (LLH) para Zona 6 de Núñez

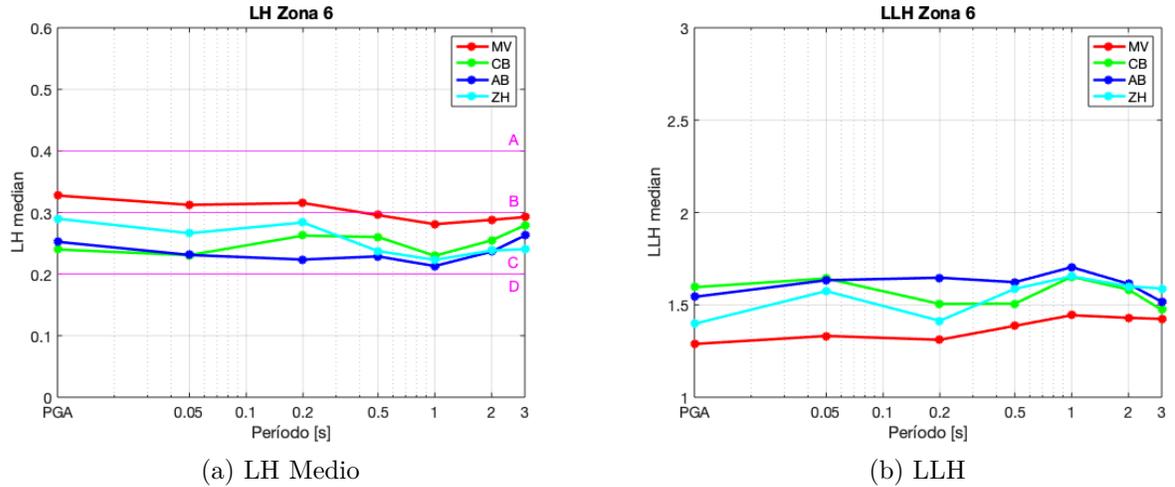


Figura 5.38: LH medio y LLH para Zona 6

A partir de los parámetros LH y LLH nuevamente se tiene que la mejor capacidad predictiva la presenta el modelo de Montalva et al. (2017)^[1]. Para PGA y hasta el período 0.2 s es el único modelo en categoría B o intermedia. Para períodos mayores el modelo cae a la categoría C, es decir de capacidad predictiva baja. Al comparar con el resto de los modelos, se observa que éstos mejoran su capacidad predictiva para los períodos de 1 a 3 segundos. Este rango coincide con el rango en que se observa una tendencia conservadora en el análisis residual de los modelos. De todas formas, ninguno de los modelos cae en la categoría D, o de capacidad predictiva inaceptable en PGA o en los pseudo espectros de aceleración. Otro aspecto a destacar, es que el modelo de Zhao et al. (2016)^[4], a pesar de haberse desarrollado a partir de una data global y presentar la mayor tendencia conservadora de los modelos, tiene la segunda mejor capacidad predictiva para PGA y los primeros pseudo espectros de aceleración.

5.2.15. Análisis residual según mecanismo de la Zona 7

5.2.15.1. Montalva et al. (2017)

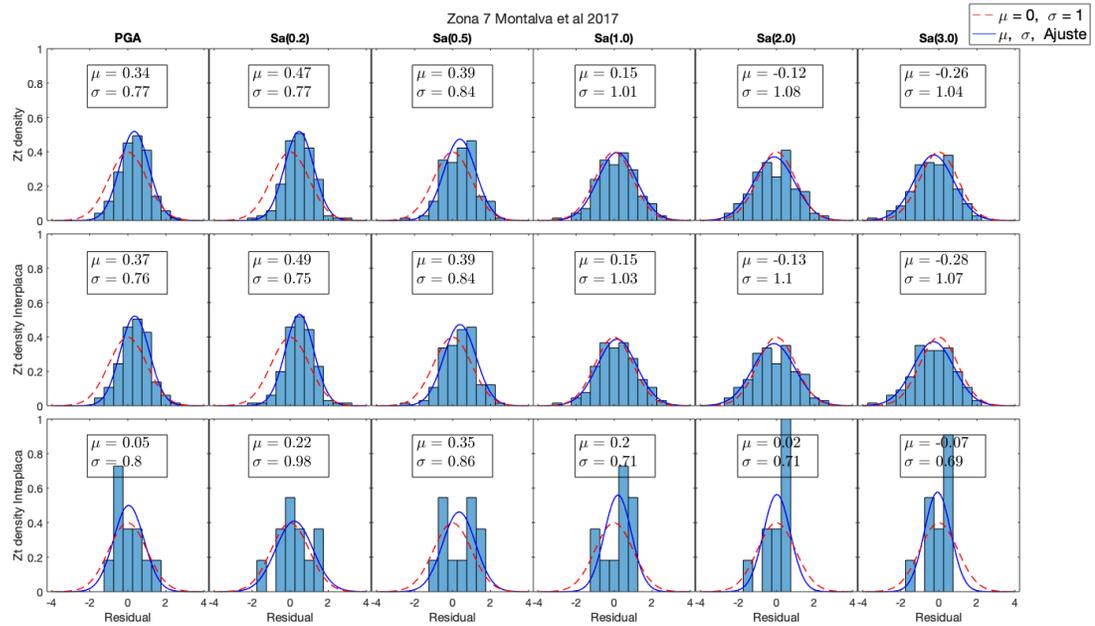


Figura 5.39: Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 7, modelo Montalva et al 2017

5.2.15.2. Abrahamson et al. (2016)

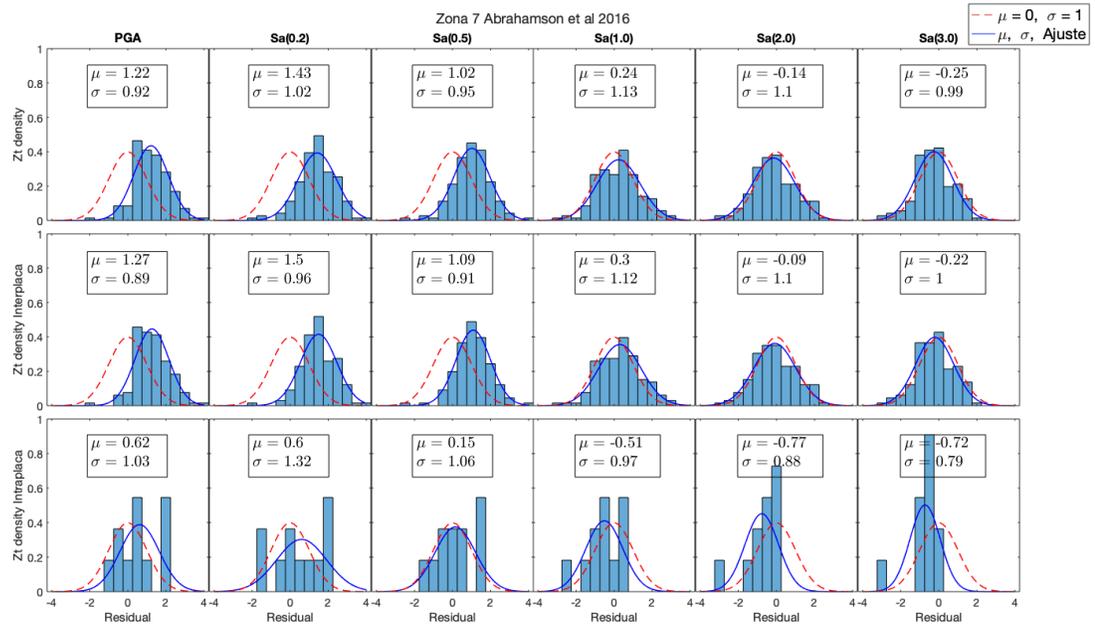


Figura 5.40: Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 7, modelo Abrahamson et al 2016

5.2.15.3. Contreras Boroschek 2012

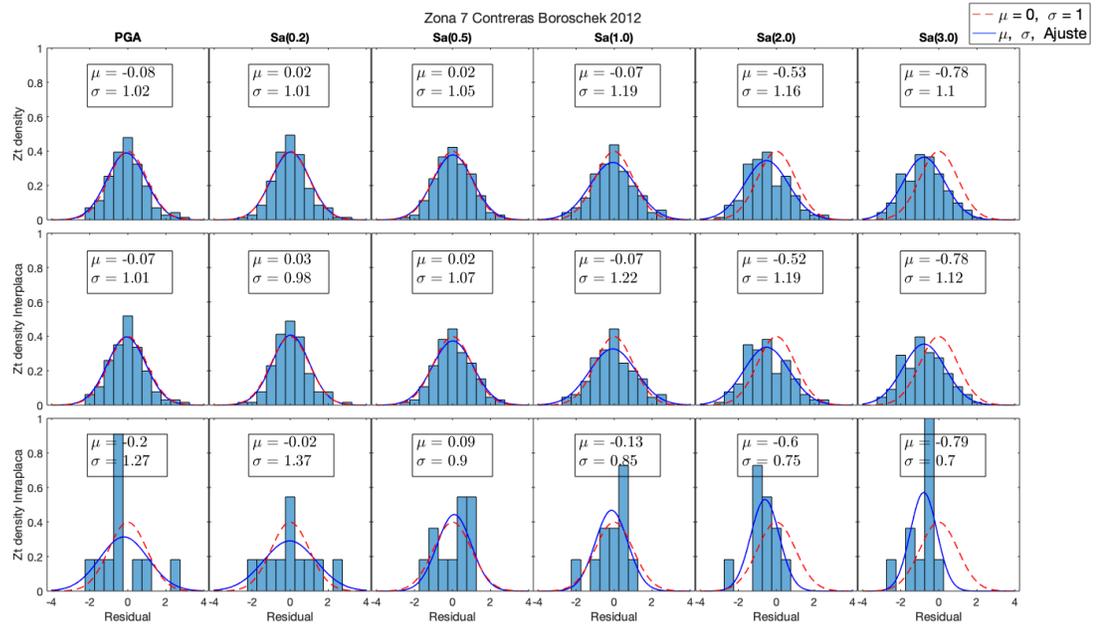


Figura 5.41: Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 7, modelo Contreras Boroschek 2012

5.2.15.4. Zhao et al. (2016)

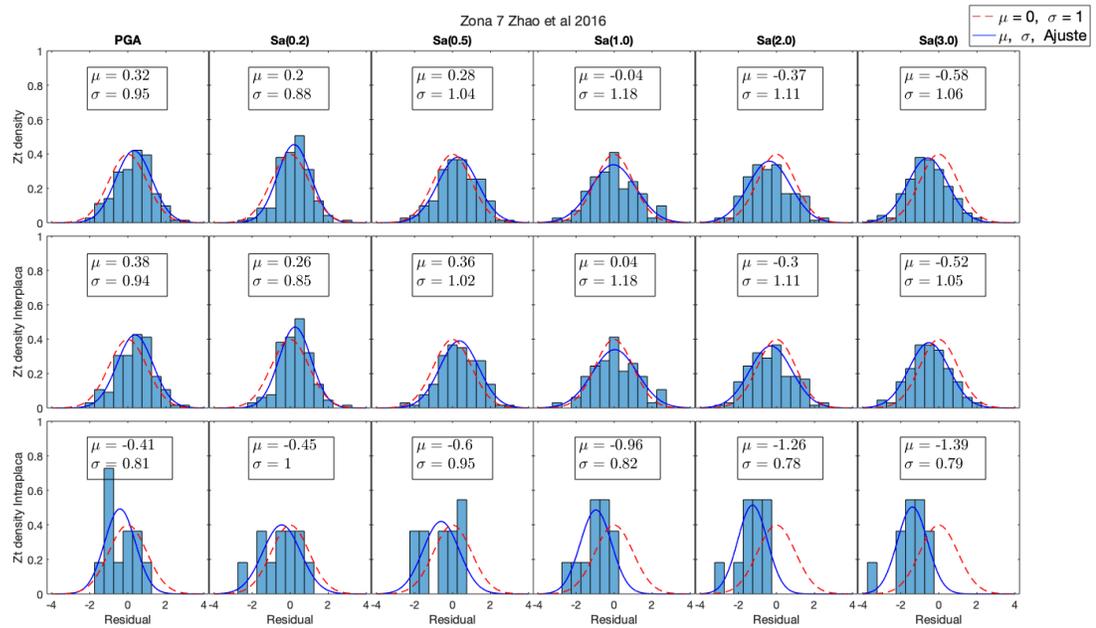


Figura 5.42: Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 7, modelo Zhao et al 2016

5.2.15.5. Resumen Análisis Residual Zona 7

Tabla 5.15: Resumen Análisis Residual Zona 7, μ

Zona 7 μ							
Modelo	Mecanismo	PGA	Sa (0.2)	Sa (0.5)	Sa (1.0)	Sa (2.0)	Sa (3.0)
Montalva et al. 2017	Todos	0.34	0.47	0.39	0.15	-0.12	-0.26
	Interplaca	0.37	0.49	0.39	0.15	-0.13	-0.28
	Intraplaca	0.05	0.22	0.35	0.20	0.02	-0.07
Abrahamson et al. 2016	Todos	1.22	1.43	1.02	0.24	-0.14	-0.25
	Interplaca	1.27	1.50	1.09	0.30	-0.09	-0.22
	Intraplaca	0.62	0.60	0.15	-0.51	-0.77	-0.72
Contreras Boroschek 2012	Todos	-0.08	0.02	0.02	-0.07	-0.53	-0.78
	Interplaca	-0.07	0.03	0.02	-0.07	-0.52	-0.78
	Intraplaca	-0.20	-0.02	0.09	-0.13	-0.60	-0.79
Zhao et al. 2016	Todos	0.32	0.20	0.28	-0.04	-0.37	-0.58
	Interplaca	0.38	0.26	0.36	0.04	-0.30	-0.52
	Intraplaca	-0.41	-0.45	-0.60	-0.96	-1.26	-1.39

Tabla 5.16: Resumen Análisis Residual Zona 7, σ

Zona 7 σ							
Modelo	Mecanismo	PGA	Sa (0.2)	Sa (0.5)	Sa (1.0)	Sa (2.0)	Sa (3.0)
Montalva et al. 2017	Todos	0.77	0.77	0.84	1.01	1.08	1.04
	Interplaca	0.76	0.75	0.84	1.03	1.10	1.07
	Intraplaca	0.80	0.98	0.86	0.71	0.71	0.69
Abrahamson et al. 2016	Todos	0.92	1.02	0.95	1.13	1.10	0.99
	Interplaca	0.89	0.96	0.91	1.12	1.10	1.00
	Intraplaca	1.03	1.32	1.06	0.97	0.88	0.79
Contreras Boroschek 2012	Todos	1.02	1.01	1.05	1.19	1.16	1.10
	Interplaca	1.01	0.98	1.07	1.22	1.19	1.12
	Intraplaca	1.27	1.37	0.90	0.85	0.75	0.70
Zhao et al. 2016	Todos	0.95	0.88	1.04	1.18	1.11	1.06
	Interplaca	0.94	0.85	1.02	1.18	1.11	1.05
	Intraplaca	0.81	1.00	0.95	0.82	0.78	0.79

Para la Zona 7 destaca el Terremoto del Maule 2010 Mw 8.8, la base de datos considera la siguiente cantidad de registros:

- 142 registros en total.
- 131 registros asociados a eventos interplaca.
- 11 registros asociados a eventos intraplaca

Para el modelo de Montalva et al. (2017)^[1] en Zona 7 se observa que el ajuste del modelo tiene una media positiva para PGA y los pseudo espectros de aceleración hasta el período 1.0 segundo. Para los siguientes períodos se presenta una tendencia conservadora, al igual que para las Zonas anteriores. Para estos períodos se observa una media negativa, lo que indica que las predicciones del modelo sobrestiman lo observado en la base de datos. En cuanto a la comparación entre interplaca e intraplaca se tienen pocos registros del tipo intraplaca, debido a que predominan los registros asociados al Terremoto del Maule del 2010 Mw 8.8, por lo mismo, se observa una dispersión con desviación estándar bastante alejada a la desviación estándar unitaria del modelo para el caso intraplaca.

Para el modelo e Abrahamson et al. (2016)^[3] se observa un mayor corrimiento del ajuste hacia la derecha, es decir, las predicciones presentan una tendencia a subestimar lo observado en la base de datos. Este mayor corrimiento a la derecha probablemente se deba a las características globales de la base de datos a partir de la que se ha desarrollado el modelo. Nuevamente se repita la condición de revertir esta tendencia a partir de los pseudo espectros de aceleración en los períodos mayores, donde el modelo se muestra conservador, entregando espectros mayores a lo observado. En cuanto a la distinción entre registros interplaca e intraplaca, se observa que ambos tipos muestran un comportamiento similar para cada período, sin embargo, se tiene un número reducido de registros intraplaca que no permiten establecer un buen parámetro de comparación, esto se ve reflejado en los valores de desviación estándar del ajuste para el caso intraplaca, los cuales difieren ampliamente de la desviación estándar unitaria del modelo.

Para el modelo de Contreras Boroschek (2012)^[2] se observa que la medias de los ajustes presentan los valores más cercanos a cero en comparación al resto de los modelos. Esta situación se debe principalmente a que la base de datos a partir de la que se ha desarrollado este modelo está compuesta principalmente por registros asociados al Terremoto del Maule 2010 Mw 8.8, los cuales según la base de datos recopilada para el presente estudio se ubican en Zona 7. Otro aspecto a destacar es que para PGA en esta zona, el modelo de Contreras Boroschek (2012)^[2] es el único que presenta una media negativa en el ajuste, es decir, es el único que sobrestima este parámetro, mostrando una tendencia conservadora. En cuanto a la dispersión de los datos, la poca cantidad de registros intraplaca no permiten comparar con la desviación estándar unitaria del modelo.

Para el modelo de Zhao et al. (2016)^[4], si bien ha sido desarrollado a partir de data global, dentro de esta data también se han considerado registros asociados al Terremoto del Maule 2010 Mw 8.8. Se observa un corrimiento hacia la derecha del ajuste para PGA y los períodos menores. Sin embargo, esta tendencia se revierte a partir del período 1 segundo, donde se tienen medias negativas, es decir, para este rengón, las predicciones del modelo para el pseudo espectro de aceleración sobrestima lo observado en la base de datos. En cuanto a la dispersión

de los datos, la poca cantidad de registros intraplaca no permiten comparar con la desviación estándar unitaria del modelo.

A continuación se presentan los resultados para los parámetros LH y LLH para todos los registros en Zona 7 de Núñez.

5.2.16. Likelihood (LH) y log-Likelihood (LLH) para Zona 7 de Núñez

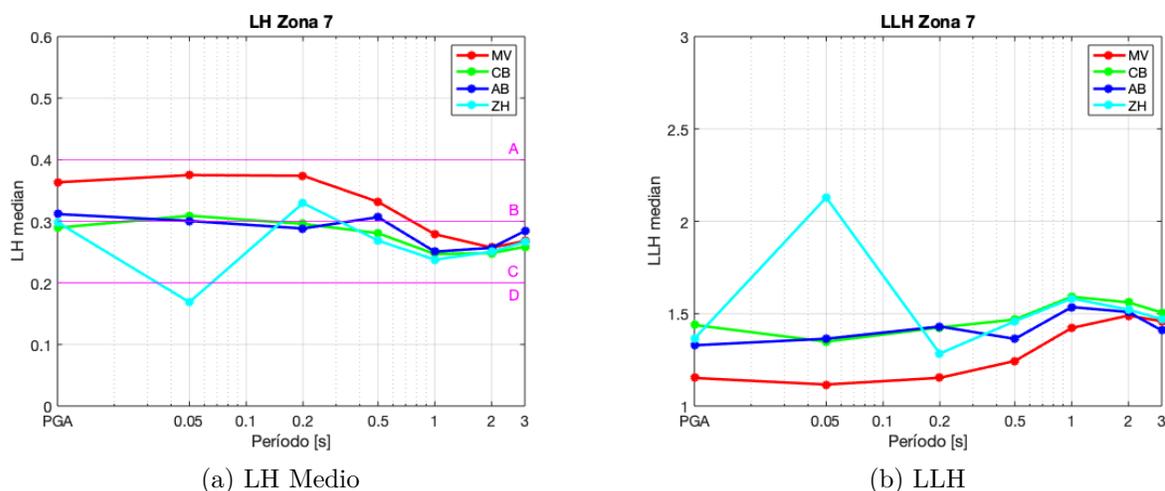


Figura 5.43: LH medio y LLH para Zona 7

A partir de los parámetros LH y LLH, nuevamente el modelo que presenta la mejor capacidad predictiva es el de Montalva et al. (2017)^[1], justamente la base de datos a partir de la cuál se ha desarrollado este modelo es la más similar a la recopilada para elaborar el presente estudio. Se observa que para PGA y los primeros períodos, el modelo se ubica en categoría B, próximo a la categoría A, correspondiente a una alta capacidad predictiva. Para los períodos de 2 y 3 segundos, la predicción del pseudo espectro de aceleración baja a la categoría C, de baja capacidad predictiva. Esto coincide con el rango en que se observa una tendencia conservadora en análisis residual, con medias negativas en el ajuste. Para el resto de los modelos, se observa un aumento del LH en este rango. Otro aspecto a destacar, es que el modelo de Zhao et al. (2016)^[4] presenta un valor de LH notablemente menor para el período 0.05 segundos, lo cuál ubica en categoría D, es decir, con una capacidad predictiva inaceptable. En particular, este modelo ha presentado problemas para períodos menores cuando se estudian suelos de Tipo C o D, los cuáles predominan en Zona 7, asociados al Terremoto del Maule de 2010 Mw 8.8.

5.2.17. Análisis residual según mecanismo de la Zona 8

5.2.17.1. Montalva et al. (2017)

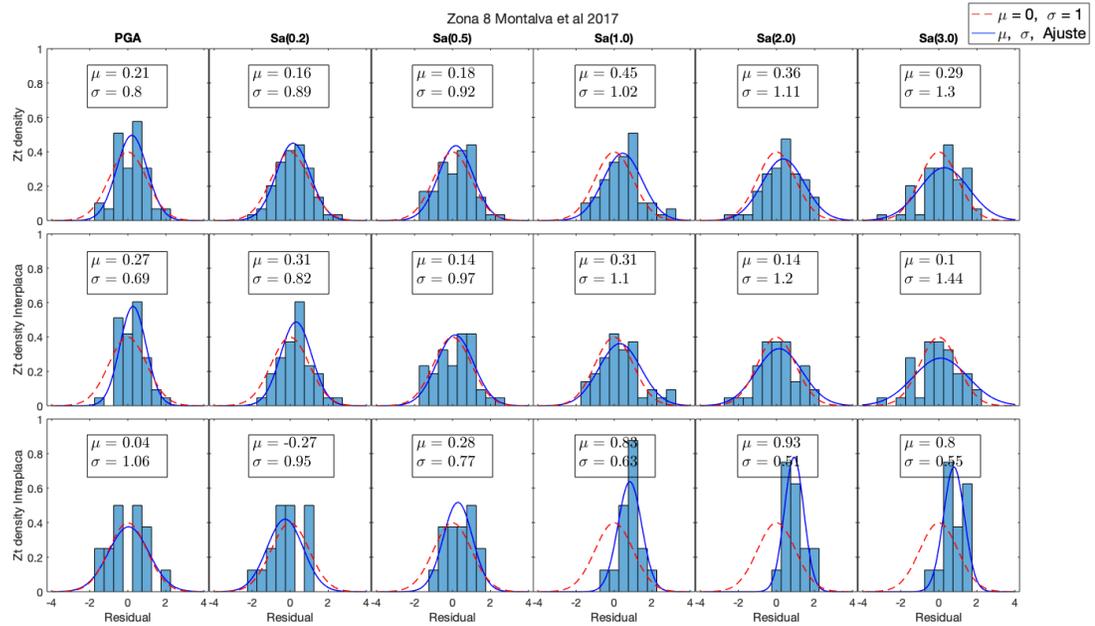


Figura 5.44: Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 8, modelo Montalva et al 2017

5.2.17.2. Abrahamson et al. (2016)

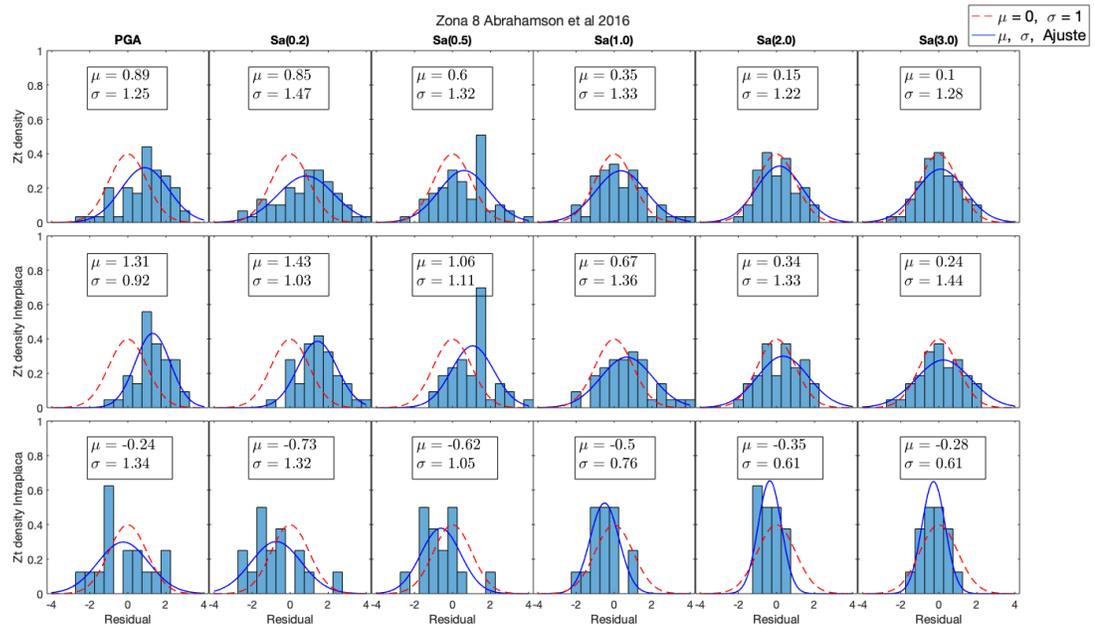


Figura 5.45: Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 8, modelo Abrahamson et al 2016

5.2.17.3. Contreras Boroschek 2012

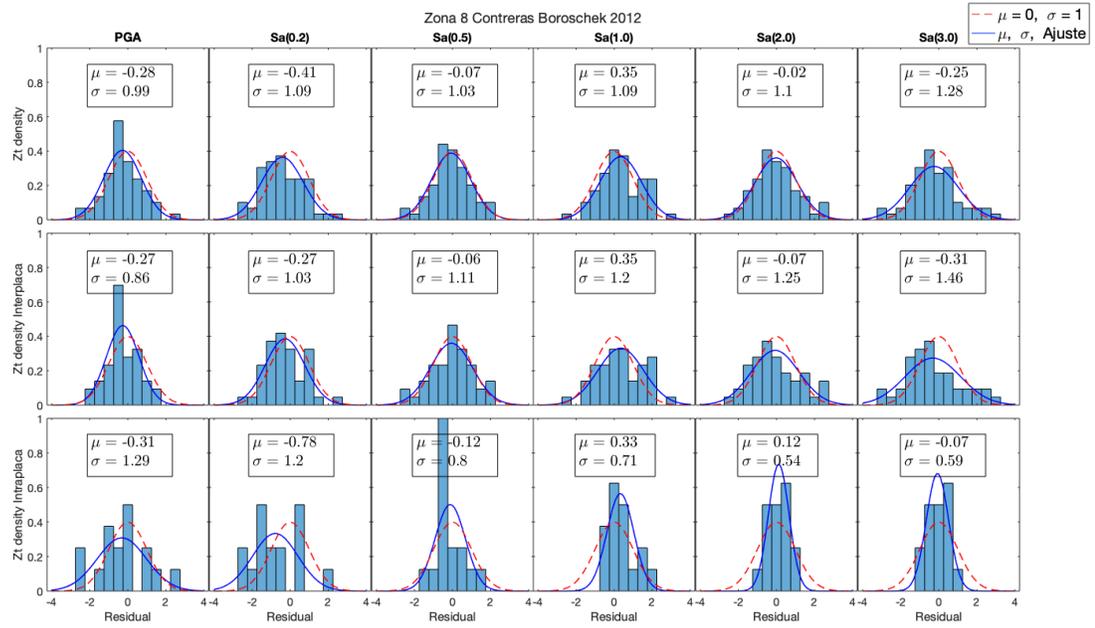


Figura 5.46: Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 8, modelo Contreras Boroschek 2012

5.2.17.4. Zhao et al. (2016)

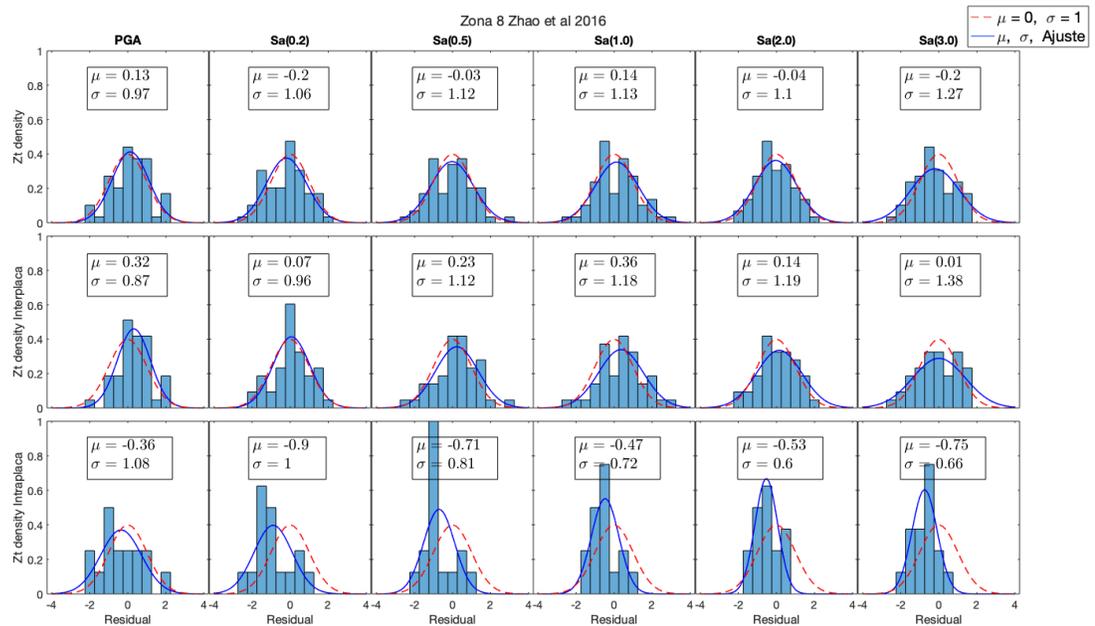


Figura 5.47: Análisis Residual según Mecanismo para la Zona 8, modelo Zhao et al 2016

5.2.17.5. Resumen Análisis Residual Zona 8

Tabla 5.17: Resumen Análisis Residual Zona 8, μ

Zona 8 μ							
Modelo	Mecanismo	PGA	Sa (0.2)	Sa (0.5)	Sa (1.0)	Sa (2.0)	Sa (3.0)
Montalva et al. 2017	Todos	0.21	0.16	0.18	0.45	0.36	0.29
	Interplaca	0.27	0.31	0.14	0.31	0.14	0.10
	Intraplaca	0.04	-0.27	0.28	0.83	0.93	0.80
Abrahamson et al. 2016	Todos	0.89	0.85	0.60	0.35	0.15	0.10
	Interplaca	1.31	1.43	1.06	0.67	0.34	0.24
	Intraplaca	-0.24	-0.73	-0.62	-0.50	-0.35	-0.28
Contreras Boroschek 2012	Todos	-0.28	-0.41	-0.07	0.35	-0.02	-0.25
	Interplaca	-0.27	-0.27	-0.06	0.35	-0.07	-0.31
	Intraplaca	-0.31	-0.78	-0.12	0.33	0.12	-0.07
Zhao et al. 2016	Todos	0.13	-0.20	-0.03	0.14	-0.04	-0.20
	Interplaca	0.32	0.07	0.23	0.36	0.14	0.01
	Intraplaca	-0.36	-0.90	-0.71	-0.47	-0.53	-0.75

Tabla 5.18: Resumen Análisis Residual Zona 8, σ

Zona 8 σ							
Modelo	Mecanismo	PGA	Sa (0.2)	Sa (0.5)	Sa (1.0)	Sa (2.0)	Sa (3.0)
Montalva et al. 2017	Todos	0.80	0.89	0.92	1.02	1.11	1.30
	Interplaca	0.69	0.82	0.97	1.10	1.20	1.44
	Intraplaca	1.06	0.95	0.77	0.63	0.51	0.55
Abrahamson et al. 2016	Todos	1.25	1.47	1.32	1.33	1.22	1.28
	Interplaca	0.92	1.03	1.11	1.36	1.33	1.44
	Intraplaca	1.34	1.32	1.05	0.76	0.61	0.61
Contreras Boroschek 2012	Todos	0.99	1.09	1.03	1.09	1.10	1.28
	Interplaca	0.86	1.03	1.11	1.20	1.25	1.46
	Intraplaca	1.29	1.20	0.80	0.71	0.54	0.59
Zhao et al. 2016	Todos	0.97	1.06	1.12	1.13	1.10	1.27
	Interplaca	0.87	0.96	1.12	1.18	1.19	1.38
	Intraplaca	1.08	1.00	0.81	0.72	0.60	0.66

Para la Zona 8 destaca el Terremoto del Chiloé 2016 Mw 7.6, la base de datos considera la siguiente cantidad de registros:

- 59 registros en total.
- 43 registros asociados a eventos interplaca.
- 16 registros asociados a eventos intraplaca

Para la Zona 8 la actividad sísmica es menos frecuente y por lo mismo se tiene un número reducido de registros para el análisis residual. En este contexto, para el modelo Montalva et al. (2017)^[1] se observa que tanto para PGA como para los pseudo espectros de aceleración, la predicción del modelo subestima lo observado en la base de datos, aunque la tendencia presenta un ajuste cuyas medias son cercanas a cero, dicho valor representa la media asociada al modelo. En cuanto a la dispersión de los datos, la cantidad reducida de registros intraplaca no permite comparar al distinguir por interplaca e intraplaca. Esto se ve reflejado en la desviación estándar que presentan los distintos ajustes, donde el valor se aleja bastante de la desviación estándar unitaria que representa al modelo.

Para el modelo de Abrahamson et al. (2016)^[3] también se observa una tendencia a subestimar PGA y pseudo espectros de aceleración en comparación a lo observado en la base de datos. La media de los ajustes, al igual que para el modelo de Montalva et al. (2017)^[1], también presenta valores positivos, sin embargo, se observan valores más altos para la desviación estándar en los ajustes. Esto probablemente se deba a la condición de la base de datos a partir de la cuál desarrollado el modelo de Abrahamson et al. (2016)^[3], dicha base de datos no solo considera datos locales, sino que también incorpora una data global que difiere de la data recopilada para elaborar el presente estudio.

Para el modelo de Contreras Boroschek (2012)^[2], a diferencia de los modelos anteriores se observa una media negativa en los ajustes, es decir, presenta una tendencia conservadora, donde las predicciones del modelo sobrestiman lo observado en la base de datos. Para este caso se observa una desviación estándar en el ajuste más cercana la desviación estándar unitaria que representa al modelo. Sin embargo, tampoco es posible distinguir entre interplaca e intraplaca, debido a la reducida cantidad de registros asociados a eventos intraplaca en la zona.

Para el modelo de Zhao et al. (2016)^[4], al igual que para el modelo de Montalva et al. (2017)^[1], para el caso interplaca, el ajuste muestra una tendencia de las predicciones del modelo a subestimar lo observado en la base de datos. Sin embargo, para el caso intraplaca se tiene una tendencia notablemente conservadora, con ajustes cuya media es bastante menor a cero. Esto hace que al considerar el caso general, con todos los registros de Zona 8, se tenga una media negativa para los pseudo espectros de aceleración, que indican que el modelo, a excepción de PGA, sobrestima los parámetros estudiados en relación a lo observado en la base de datos recopilada.

A continuación se presentan los resultados para los parámetros LH y LLH para todos los registros en Zona 8 de Núñez.

5.2.18. Likelihood (LH) y log-Likelihood (LLH) para Zona 8 de Núñez

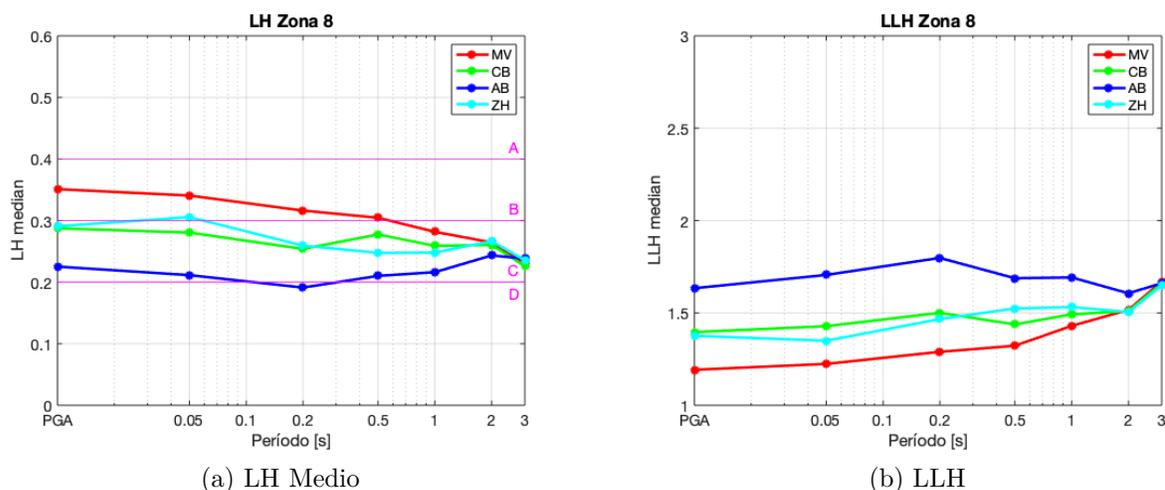


Figura 5.48: LH medio y LLH para Zona 8

A partir de los parámetros LH y LLH se observa nuevamente que el modelo de Montalva et al. (2017)^[1] es el que presenta la mejor capacidad predictiva. Como se ha mencionado anteriormente, esto probablemente se debe a que la base de datos utilizada para desarrollar este modelo es bastante similar a la base de datos local que se ha recopilado para elaborar el presente estudio. Se observa que el modelo de Montalva et al. (2017)^[1] presenta un valor de LH tal que lo ubica en la categoría B, correspondiente a una capacidad predictiva intermedia hasta el período 0.5 segundos. En cambio, el modelo de Abrahamson et al. (2016)^[3] desarrollado a partir de una base de datos global presenta un valor de LH en dicho período que lo ubica en la categoría D, que indica una inaceptable capacidad predictiva. Esta situación coincide con el hecho de que para éste período, el modelo de Abrahamson et al. (2016)^[3] es el que presenta el mayor corrimiento hacia la derecha en el ajuste del análisis residual, es decir, es el modelo que presenta la mayor tendencia a subestimar lo observado en la base de datos recopilada.

En las siguientes tablas se muestra el resumen general del análisis residual para cada modelo. Cada tabla contiene información sobre las distintas zonas estudiadas, con su respectiva distinción entre registros asociados a eventos interplaca, intraplaca y el caso general.

5.2.19. Resumen del Análisis Residual según Mecanismo para el Modelo de Montalva et al 2017

5.2.19.1. Resumen para la media del ajuste

Tabla 5.19: Resumen del análisis residual según mecanismo, Montalva et al 2017, parámetro μ

Modelo	Zona Nuñez	Mecanismo	PGA	Sa (0.2)	Sa (0.5)	Sa (1.0)	Sa (2.0)	Sa (3.0)
μ Montalva et al 2017	1	Todos	0.57	0.62	0.77	0.87	0.62	0.45
		Interplaca	0.94	0.81	0.79	0.70	0.27	0.17
		Intraplaca	0.50	0.58	0.77	0.9	0.68	0.51
	2	Todos	0.56	0.52	0.48	0.32	0.15	0.00
		Interplaca	0.50	0.57	0.50	0.17	-0.12	-0.26
		Intraplaca	0.59	0.59	0.47	0.42	0.34	0.18
	3	Todos	0.28	0.22	0.27	0.11	0.03	-0.11
		Interplaca	-0.01	0.13	0.20	-0.03	-0.13	-0.32
		Intraplaca	0.38	0.25	0.29	0.16	0.09	-0.05
	4	Todos	1.04	0.90	0.30	-0.02	-0.16	-0.25
		Interplaca	1.12	1.14	0.41	0.02	-0.13	-0.17
		Intraplaca	0.95	0.62	0.17	-0.07	-0.20	-0.34
	5	Todos	0.58	0.45	0.05	-0.18	-0.46	-0.61
		Interplaca	0.73	0.69	0.23	-0.02	-0.35	-0.48
		Intraplaca	0.39	0.12	-0.20	-0.40	-0.60	-0.78
	6	Todos	0.49	0.50	0.32	0.16	-0.12	-0.26
		Interplaca	0.62	0.69	0.34	0.22	-0.13	-0.27
		Intraplaca	0.33	0.27	0.29	0.09	-0.10	-0.24
	7	Todos	0.34	0.47	0.39	0.15	-0.12	-0.26
		Interplaca	0.37	0.49	0.39	0.15	-0.13	-0.28
		Intraplaca	0.05	0.22	0.35	0.20	0.02	-0.07
	8	Todos	0.21	0.16	0.18	0.45	0.36	0.29
		Interplaca	0.27	0.31	0.14	0.31	0.14	0.10
		Intraplaca	0.04	-0.27	0.28	0.83	0.93	0.80
	Austral	Todos	-	-	-	-	-	-
		Interplaca	-	-	-	-	-	-
		Intraplaca	-	-	-	-	-	-

5.2.19.2. Resumen para desviación estándar del ajuste

Tabla 5.20: Resumen del analisis residual según mecanismo, Montalva et al 2017, parámetro σ

Modelo	Zona Nuñez	Mecanismo	PGA	Sa (0.2)	Sa (0.5)	Sa (1.0)	Sa (2.0)	Sa (3.0)
σ Montalva et al 2017	1	Todos	0.75	0.78	0.99	1.01	1.01	0.96
		Interplaca	0.72	0.89	0.93	0.92	1.00	0.89
		Intraplaca	0.74	0.75	1.00	1.02	1.01	0.97
	2	Todos	0.91	0.92	1.05	1.06	1.06	1.06
		Interplaca	1.11	1.06	1.12	1.08	1.08	1.12
		Intraplaca	0.74	0.81	1.00	1.02	1.00	0.99
	3	Todos	0.92	0.90	1.12	1.00	1.07	1.12
		Interplaca	0.90	0.96	1.06	1.20	1.44	1.52
		Intraplaca	0.91	0.88	1.15	0.93	0.91	0.95
	4	Todos	0.76	0.93	0.94	0.81	0.77	0.81
		Interplaca	0.84	0.91	0.89	0.78	0.75	0.82
		Intraplaca	0.64	0.86	0.98	0.85	0.80	0.79
	5	Todos	0.87	0.95	1.03	0.97	0.92	0.92
		Interplaca	0.92	0.94	0.98	0.95	0.93	0.94
		Intraplaca	0.76	0.86	1.03	0.94	0.89	0.87
	6	Todos	0.88	0.90	0.97	1.03	1.01	1.01
		Interplaca	0.97	0.91	0.97	1.06	1.04	1.04
		Intraplaca	0.73	0.83	0.96	0.98	0.97	0.97
	7	Todos	0.77	0.77	0.84	1.01	1.08	1.04
		Interplaca	0.76	0.75	0.84	1.03	1.10	1.07
		Intraplaca	0.80	0.98	0.86	0.71	0.71	0.69
	8	Todos	0.80	0.89	0.92	1.02	1.11	1.30
		Interplaca	0.69	0.82	0.97	1.10	1.20	1.44
		Intraplaca	1.06	0.95	0.77	0.63	0.51	0.55
	Austral	Todos	-	-	-	-	-	-
		Interplaca	-	-	-	-	-	-
		Intraplaca	-	-	-	-	-	-

5.2.20. Resumen del Análisis Residual según Mecanismo para el Modelo Abrahamson et al 2016

5.2.20.1. Resumen para la media del ajuste

Tabla 5.21: Resumen del análisis residual según mecanismo, Abrahamson et al 2016, parámetro μ

Modelo	Zona Nuñez	Mecanismo	PGA	Sa (0.2)	Sa (0.5)	Sa (1.0)	Sa (2.0)	Sa (3.0)
μ Abrahamson et al 2016	1	Todos	0.86	0.80	0.44	0.24	0.05	0.04
		Interplaca	2.15	2.11	1.82	1.31	0.80	0.68
		Intraplaca	0.62	0.56	0.18	0.04	-0.09	-0.08
	2	Todos	1.24	1.13	0.57	0.01	-0.16	-0.21
		Interplaca	1.57	1.72	1.31	0.52	0.20	0.08
		Intraplaca	1.02	0.74	0.07	-0.34	-0.40	-0.40
	3	Todos	0.90	0.68	0.25	-0.22	-0.24	-0.26
		Interplaca	1.14	1.27	1.06	0.46	0.42	0.28
		Intraplaca	0.82	0.48	-0.03	-0.45	-0.47	-0.44
	4	Todos	2.00	1.83	0.67	-0.13	-0.29	-0.20
		Interplaca	2.38	2.53	1.35	0.43	0.24	0.22
		Intraplaca	1.58	1.04	-0.10	-0.76	-0.89	-0.87
	5	Todos	1.62	1.38	0.53	-0.16	-0.47	-0.54
		Interplaca	1.94	1.93	1.05	0.28	-0.08	-0.16
		Intraplaca	1.20	0.67	-0.16	-0.72	-0.98	-1.04
	6	Todos	1.35	1.32	0.71	0.09	-0.24	-0.31
		Interplaca	1.76	1.92	1.27	0.66	0.25	0.11
		Intraplaca	0.87	0.62	0.07	-0.57	-0.80	-0.80
	7	Todos	1.22	1.43	1.02	0.24	-0.14	-0.26
		Interplaca	1.27	1.50	1.09	0.30	-0.09	-0.22
		Intraplaca	0.62	0.60	0.15	-0.51	-0.77	-0.72
	8	Todos	0.89	0.85	0.60	0.35	0.15	0.10
		Interplaca	1.31	1.43	1.06	0.67	0.34	0.24
		Intraplaca	-0.24	-0.73	-0.62	0.76	-0.35	-0.28
	Austral	Todos	-	-	-	-	-	-
		Interplaca	-	-	-	-	-	-
		Intraplaca	-	-	-	-	-	-

5.2.20.2. Resumen para la desviación estándar del ajuste

Tabla 5.22: Resumen del análisis residual según mecanismo, Abrahamson et al 2016, parámetro σ

Modelo	Zona Nuñez	Mecanismo	PGA	Sa (0.2)	Sa (0.5)	Sa (1.0)	Sa (2.0)	Sa (3.0)
σ Abrahamson et al 2016	1	Todos	0.92	1.02	1.15	1.18	1.11	1.00
		Interplaca	0.74	1.06	1.02	1.04	1.10	0.96
		Intraplaca	1.16	0.81	0.97	1.11	1.06	0.96
	2	Todos	1.16	1.25	1.30	1.25	1.15	1.09
		Interplaca	1.39	1.38	1.28	1.23	1.18	1.16
		Intraplaca	0.91	0.98	1.06	1.13	1.07	1.00
	3	Todos	1.00	1.10	1.25	1.12	1.16	1.15
		Interplaca	1.05	1.16	1.13	1.18	1.40	1.49
		Intraplaca	0.98	1.00	1.17	1.00	0.98	0.95
	4	Todos	0.94	1.32	1.30	1.16	1.04	0.99
		Interplaca	0.90	1.10	1.05	0.95	0.83	0.82
		Intraplaca	0.79	1.08	1.11	1.04	0.93	0.83
	5	Todos	1.05	1.25	1.27	1.20	1.06	0.99
		Interplaca	1.12	1.19	1.14	1.13	1.00	0.94
		Intraplaca	0.77	0.94	1.08	1.06	0.91	0.82
	6	Todos	1.13	1.26	1.23	1.33	1.22	1.10
		Interplaca	1.18	1.15	1.11	1.24	1.15	1.06
		Intraplaca	0.85	0.98	1.03	1.11	1.03	0.94
	7	Todos	0.92	1.02	0.95	1.13	1.10	0.99
		Interplaca	0.89	0.96	0.91	1.12	1.10	1.00
		Intraplaca	1.03	1.32	1.06	0.97	0.88	0.79
	8	Todos	1.25	1.47	1.32	1.33	1.22	1.28
		Interplaca	0.92	1.03	1.11	1.36	1.33	1.44
		Intraplaca	1.34	1.32	1.05	0.76	0.61	0.61
	Austral	Todos	-	-	-	-	-	-
		Interplaca	-	-	-	-	-	-
		Intraplaca	-	-	-	-	-	-

5.2.21. Resumen del Análisis Residual según Mecanismo para el Modelo Contreras Boroschek 2012

5.2.21.1. Resumen para la media del ajuste

Tabla 5.23: Resumen del análisis residual según mecanismo, Contreras Boroschek 2012, parámetro μ

Modelo	Zona Nuñez	Mecanismo	PGA	Sa (0.2)	Sa (0.5)	Sa (1.0)	Sa (2.0)	Sa (3.0)
μ Contreras Boroschek 2012	1	Todos	0.73	0.56	0.44	0.44	0.06	-0.05
		Interplaca	0.80	0.55	0.68	0.78	0.23	0.03
		Intraplaca	0.71	0.56	0.39	0.37	0.03	-0.07
	2	Todos	0.57	0.35	0.18	0.06	-0.23	-0.44
		Interplaca	0.46	0.38	0.33	0.20	-0.19	-0.45
		Intraplaca	0.64	0.33	0.08	-0.04	-0.27	-0.44
	3	Todos	0.41	0.13	0.07	0.01	-0.06	-0.16
		Interplaca	0.25	0.25	0.25	0.21	0.17	-0.02
		Intraplaca	0.46	0.10	0.01	-0.05	-0.14	-0.21
	4	Todos	1.12	0.78	0.08	-0.19	-0.48	-0.63
		Interplaca	0.83	0.80	0.15	-0.08	-0.40	-0.54
		Intraplaca	1.45	0.75	0.01	-0.31	-0.56	-0.73
	5	Todos	0.59	0.30	-0.12	-0.23	-0.61	-0.80
		Interplaca	0.40	0.33	-0.01	-0.12	-0.52	-0.74
		Intraplaca	0.85	0.27	-0.26	-0.38	-0.71	-0.87
	6	Todos	0.50	0.36	0.22	0.17	-0.28	-0.53
		Interplaca	0.60	0.52	0.37	0.51	0.00	-0.32
		Intraplaca	0.39	0.18	0.05	-0.22	-0.60	-0.79
	7	Todos	-0.08	0.02	0.02	-0.07	-0.53	-0.78
		Interplaca	-0.07	0.03	0.02	-0.07	-0.52	-0.78
		Intraplaca	-0.20	-0.02	0.09	-0.13	-0.60	-0.79
	8	Todos	-0.28	-0.41	-0.07	0.35	-0.02	-0.25
		Interplaca	-0.27	-0.27	-0.06	0.35	-0.07	-0.31
		Intraplaca	-0.31	-0.78	-0.12	0.33	0.12	-0.07
	Austral	Todos	-	-	-	-	-	-
		Interplaca	-	-	-	-	-	-
		Intraplaca	-	-	-	-	-	-

5.2.21.2. Resumen para la desviación estándar del ajuste

Tabla 5.24: Resumen del análisis residual según mecanismo, Contreras Boroschek 2012, parámetro σ

Modelo	Zona Nuñez	Mecanismo	PGA	Sa (0.2)	Sa (0.5)	Sa (1.0)	Sa (2.0)	Sa (3.0)
σ Contreras Boroschek 2012	1	Todos	1.04	0.94	1.05	1.05	0.97	0.92
		Interplaca	0.85	0.89	1.06	1.07	1.05	0.92
		Intraplaca	1.07	0.95	1.05	1.03	0.95	0.92
	2	Todos	1.09	1.05	1.10	1.12	1.03	1.01
		Interplaca	1.11	1.10	1.19	1.24	1.15	1.10
		Intraplaca	1.08	1.02	1.03	1.03	0.94	0.95
	3	Todos	1.18	1.11	1.22	1.07	1.24	1.37
		Interplaca	0.87	1.02	1.16	1.29	1.42	1.49
		Intraplaca	1.27	1.14	1.23	0.99	1.17	1.34
	4	Todos	1.05	1.15	1.03	0.88	0.79	0.80
		Interplaca	0.96	1.12	1.01	0.86	0.80	0.82
		Intraplaca	1.05	1.19	1.06	0.89	0.77	0.76
	5	Todos	1.07	1.04	1.06	1.06	0.91	0.92
		Interplaca	1.00	1.04	1.10	1.09	0.92	0.88
		Intraplaca	1.10	1.05	0.99	0.99	0.88	0.97
	6	Todos	1.19	1.09	1.09	1.26	1.18	1.06
		Interplaca	1.17	1.06	1.15	1.36	1.30	1.14
		Intraplaca	1.21	1.09	1.00	1.01	0.92	0.89
	7	Todos	1.02	1.01	1.05	1.19	1.16	1.10
		Interplaca	1.01	0.98	1.07	1.22	1.19	1.12
		Intraplaca	1.27	1.37	0.90	0.85	0.75	0.70
	8	Todos	0.99	1.09	1.03	1.09	1.10	1.28
		Interplaca	0.86	1.03	1.11	1.20	1.25	1.46
		Intraplaca	1.29	1.20	0.80	0.71	0.54	0.59
	Austral	Todos	-	-	-	-	-	-
		Interplaca	-	-	-	-	-	-
		Intraplaca	-	-	-	-	-	-

5.2.22. Resumen del Análisis Residual según Mecanismo para el Modelo Zhao et al 2016

5.2.22.1. Resumen para la media del ajuste

Tabla 5.25: Resumen del análisis residual según mecanismo, Zhao et al 2016, parámetro μ

Modelo	Zona Nuñez	Mecanismo	PGA	Sa (0.2)	Sa (0.5)	Sa (1.0)	Sa (2.0)	Sa (3.0)
μ Zhao et al 2016	1	Todos	-0.02	-0.21	-0.29	-0.22	-0.43	-0.61
		Interplaca	0.48	0.13	0.65	0.72	0.43	0.31
		Intraplaca	-0.11	-0.27	-0.46	-0.39	-0.49	-0.77
	2	Todos	0.13	-0.09	-0.20	-0.42	-0.57	-0.75
		Interplaca	0.33	0.23	0.46	0.17	-0.05	-0.23
		Intraplaca	0.00	-0.31	-0.66	-0.81	-0.93	-1.10
	3	Todos	-0.33	-0.57	-0.60	-0.72	-0.75	-0.91
		Interplaca	-0.65	-0.58	-0.03	-0.04	0.09	-0.06
		Intraplaca	-0.21	-0.57	-0.79	-0.96	-1.04	-1.19
	4	Todos	0.56	0.11	-0.41	-0.62	-0.65	-0.77
		Interplaca	0.87	0.41	0.03	-0.13	-0.06	0.82
		Intraplaca	0.88	-0.24	-0.91	-1.18	-1.32	0.91
	5	Todos	0.17	-0.24	-0.48	-0.62	-0.83	-1.01
		Interplaca	0.23	-0.05	-0.10	-0.16	-0.32	-0.46
		Intraplaca	0.09	-0.48	-0.96	-1.22	-1.50	-1.72
	6	Todos	0.20	-0.07	-0.19	-0.36	-0.63	-0.82
		Interplaca	0.50	0.26	0.23	0.22	-0.05	-0.23
		Intraplaca	-0.15	-0.45	-0.68	-1.02	-1.31	-1.49
	7	Todos	0.32	0.20	0.28	-0.04	-0.37	-0.58
		Interplaca	0.38	0.26	0.36	0.04	-0.30	-0.52
		Intraplaca	-0.41	-0.45	-0.60	-0.96	-1.26	-1.39
	8	Todos	0.13	-0.20	-0.03	0.14	-0.04	-0.20
		Interplaca	0.32	0.07	0.23	0.36	0.14	0.01
		Intraplaca	-0.36	-0.90	-0.71	-0.47	-0.53	-0.75
	Austral	Todos	-	-	-	-	-	-
		Interplaca	-	-	-	-	-	-
		Intraplaca	-	-	-	-	-	-

5.2.22.2. Resumen para la desviación estándar del ajuste

Tabla 5.26: Resumen del análisis residual según mecanismo, Zhao et al 2016, parámetro σ

Modelo	Zona Nuñez	Mecanismo	PGA	Sa (0.2)	Sa (0.5)	Sa (1.0)	Sa (2.0)	Sa (3.0)
σ Zhao et al 2016	1	Todos	0.89	0.89	1.08	1.10	1.08	1.06
		Interplaca	0.93	0.99	1.03	0.99	1.09	0.99
		Intraplaca	0.86	0.86	1.01	1.03	1.00	0.99
	2	Todos	0.98	0.98	1.23	1.19	1.15	1.17
		Interplaca	1.18	1.05	1.16	1.11	1.11	1.14
		Intraplaca	0.80	0.87	1.06	1.07	1.04	1.05
	3	Todos	0.81	0.85	1.20	1.09	1.19	1.26
		Interplaca	0.87	0.84	1.03	1.15	1.40	1.55
		Intraplaca	0.76	0.86	1.19	0.97	0.96	1.01
	4	Todos	0.98	1.04	1.19	1.08	1.05	1.10
		Interplaca	0.87	0.94	1.06	0.88	0.77	0.82
		Intraplaca	0.88	1.04	1.14	1.01	0.92	0.91
	5	Todos	0.88	0.97	1.21	1.12	1.05	1.06
		Interplaca	0.95	0.96	1.15	1.02	0.90	0.91
		Intraplaca	0.77	0.93	1.11	0.96	0.82	0.80
	6	Todos	0.98	1.00	1.18	1.27	1.20	1.19
		Interplaca	0.98	0.90	1.11	1.14	1.05	1.03
		Intraplaca	0.86	0.97	1.08	1.07	0.99	0.98
	7	Todos	0.95	0.88	1.04	1.18	1.11	1.06
		Interplaca	0.94	0.85	1.02	1.18	1.11	1.05
		Intraplaca	0.81	1.00	0.95	0.82	0.78	0.79
	8	Todos	0.97	1.06	1.12	1.13	1.10	1.27
		Interplaca	0.87	0.96	1.12	1.18	1.19	1.38
		Intraplaca	1.08	1.00	0.81	0.72	0.60	0.66
	Austral	Todos	-	-	-	-	-	-
		Interplaca	-	-	-	-	-	-
		Intraplaca	-	-	-	-	-	-

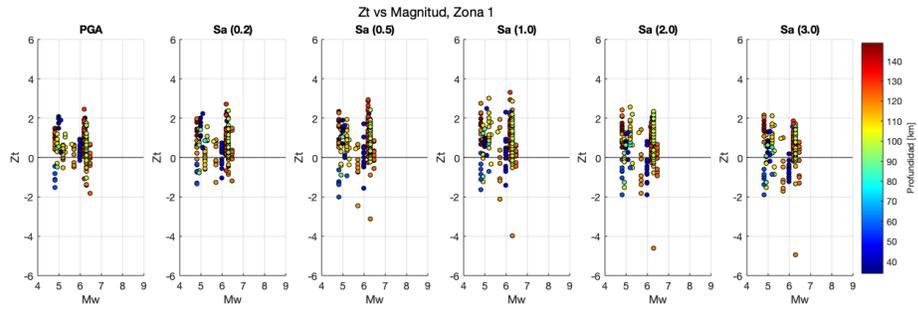
5.3. Distribución del Residuo Total Normalizado para Montalva et al. (2017)

A partir del análisis residual y los resultados para los parámetros LH y LLH se ha observado que en todas las Zonas Sismotectónicas definidas por Nuñez, el modelo con la mejor capacidad predictiva es el de Montalva et. al (2017)^[1]. Sin embargo, al presentar una media μ positiva en el ajuste para los histogramas del residuo total normalizado Z_t , tanto para PGA como para los pseudo espectros de aceleración hasta el período de 1 segundo, se tiene que el modelo presenta un comportamiento no conservador.

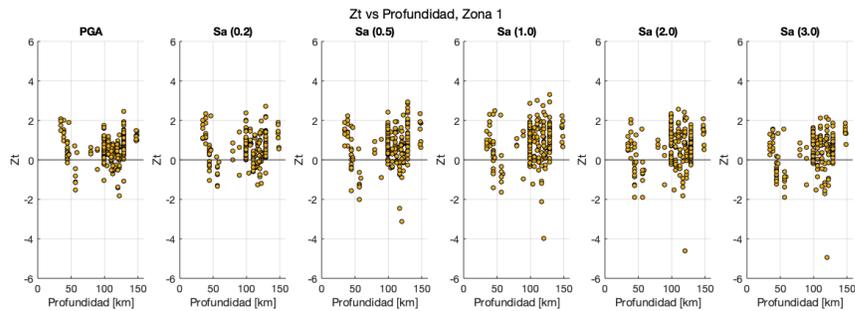
A continuación, se presenta la distribución del Residuo Total Normalizado Z_t para el modelo de Montalva et al. (2017)^[1], en función de distintos parámetros con la finalidad de conocer mejor las características de los registros en cada zona y determinar si estas características pueden incidir en la tendencias predictivas que se observan en cada zona.

Los gráficos de la primera fila muestran el valor del residuo total normalizado Z_t v/s la magnitud del evento, en función de su profundidad focal. Los gráficos de la segunda fila muestran el valor del residuo total normalizado Z_t v/s profundidad focal del evento. Los gráficos de la tercera fila muestran la latitud de cada evento v/s su profundidad focal, en función del residuo total normalizado Z_t . Por último, los gráficos en la cuarta fila muestran el valor del residuo total normalizado Z_t v/s la fecha en que ha ocurrido el evento, en función de su profundidad focal.

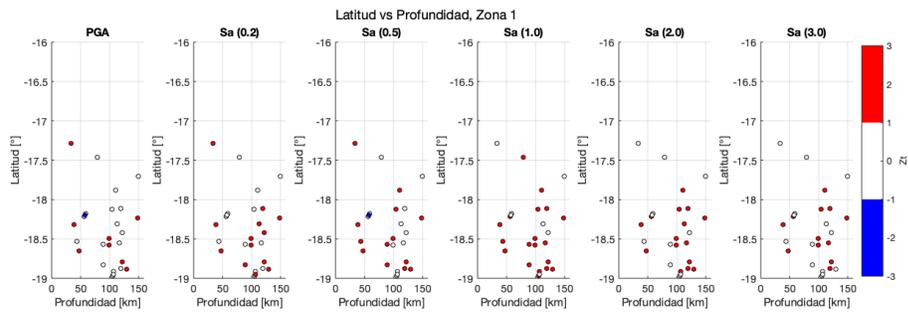
5.3.1. Zona 1



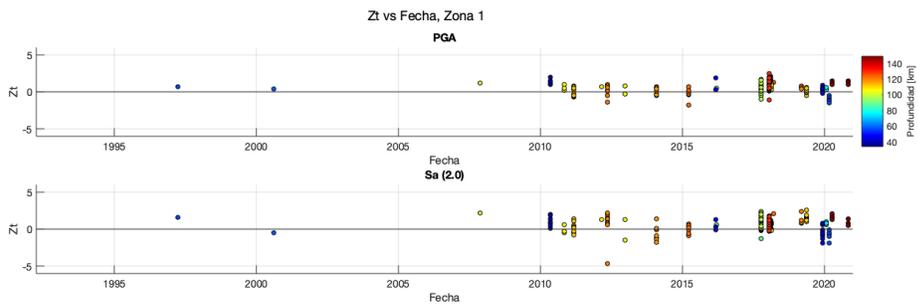
(a) Distribución de Zt vs Magnitud y Profundidad Focal



(b) Distribución de Zt vs Profundidad Focal



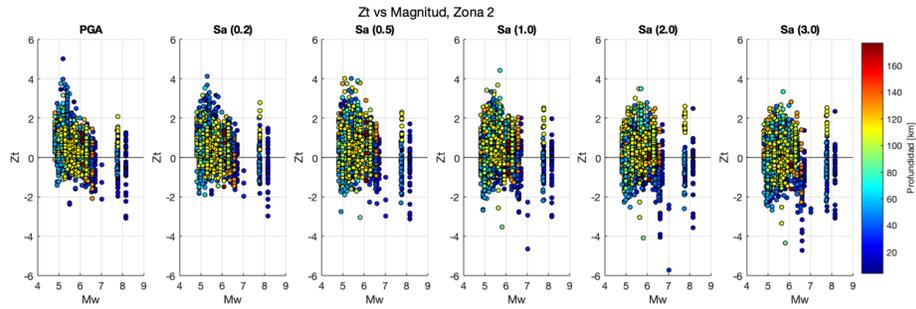
(c) Distribución de Zt con respecto a Latitud y Profundidad Focal



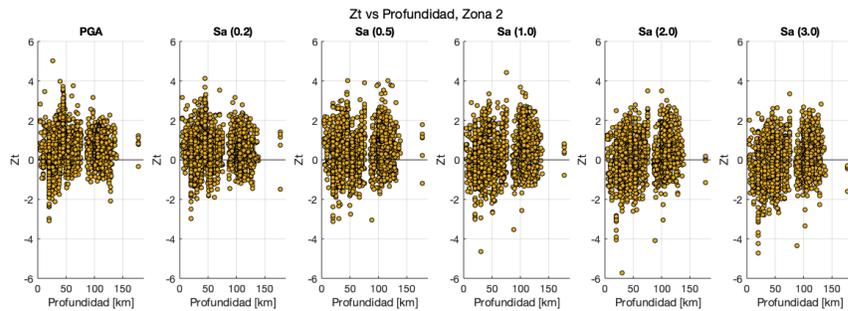
(d) Distribución de Zt vs Tiempo y Profundidad Focal

Figura 5.49: Distribución de Zt para Montalva et al. (2017), Zona 1

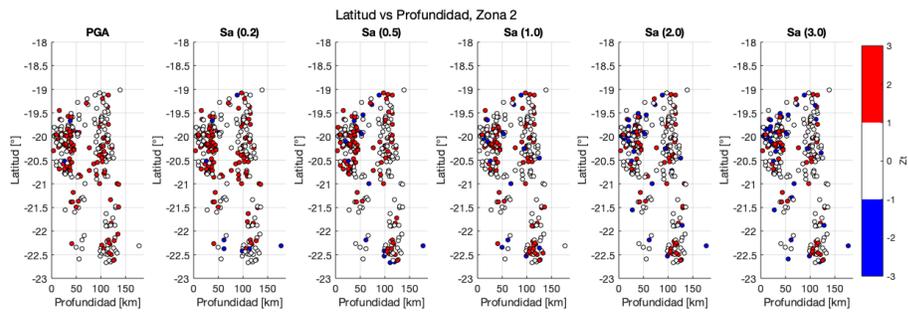
5.3.2. Zona 2



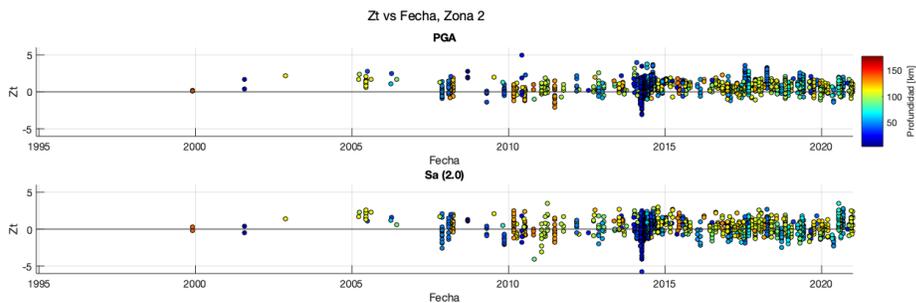
(a) Distribución de Zt vs Magnitud y Profundidad Focal



(b) Distribución de Zt vs Profundidad Focal



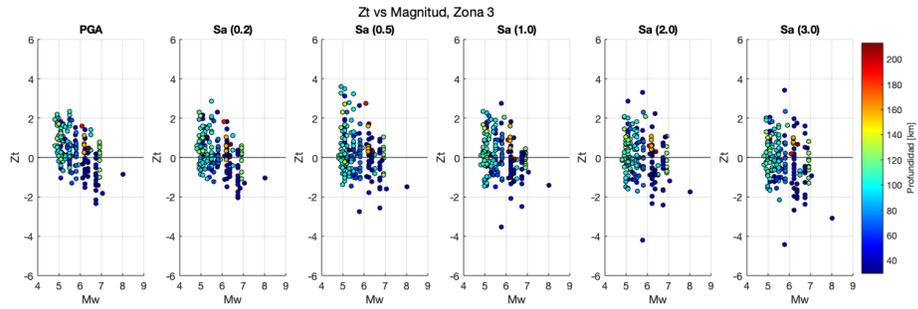
(c) Distribución de Zt con respecto a Latitud y Profundidad Focal



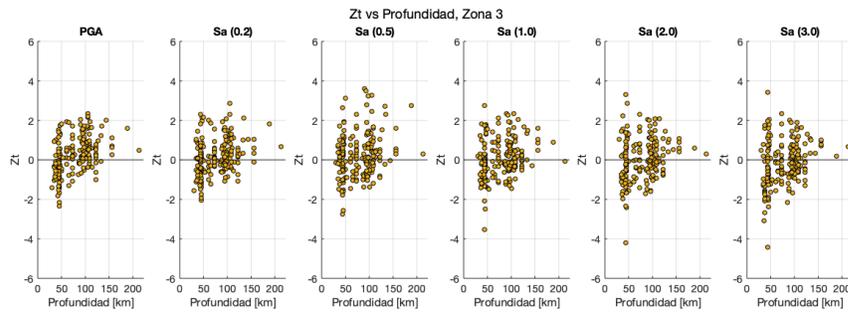
(d) Distribución de Zt vs Tiempo y Profundidad Focal

Figura 5.50: Distribución de Zt para Montalva et al. (2017), Zona 2

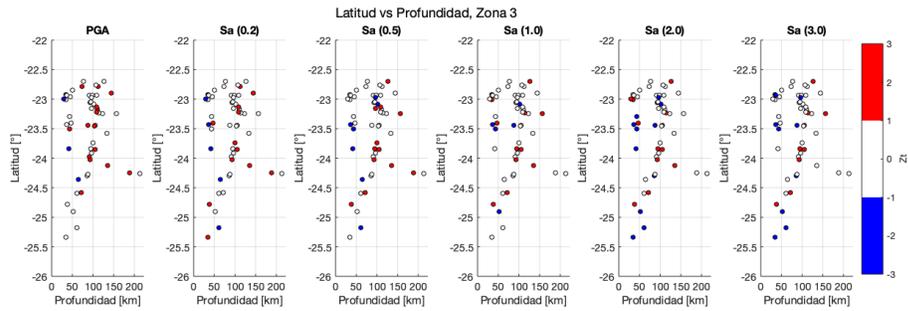
5.3.3. Zona 3



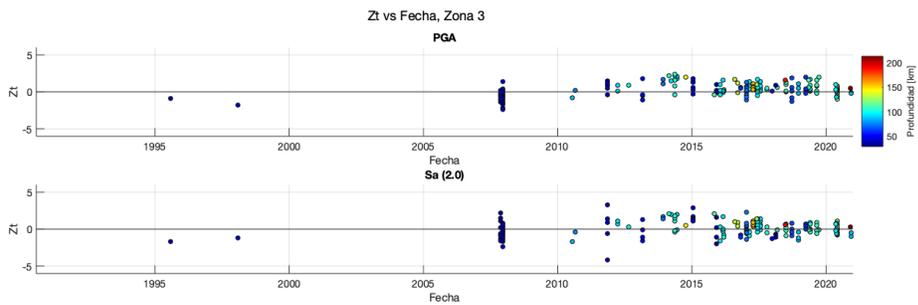
(a) Distribución de Zt vs Magnitud y Profundidad Focal



(b) Distribución de Zt vs Profundidad Focal



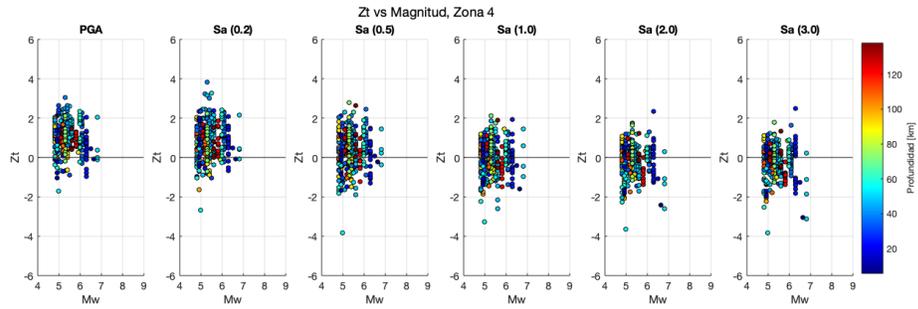
(c) Distribución de Zt con respecto a Latitud y Profundidad Focal



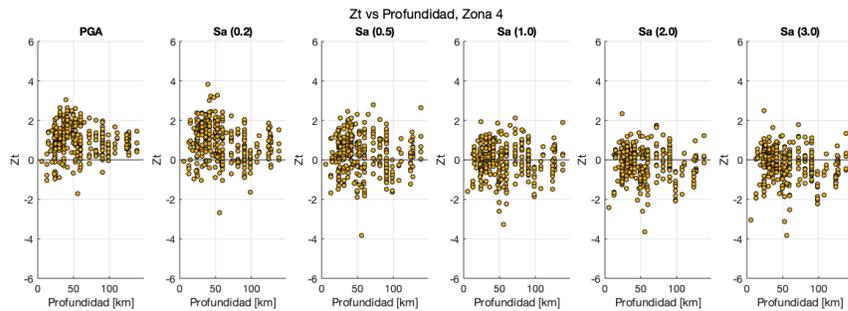
(d) Distribución de Zt vs Tiempo y Profundidad Focal

Figura 5.51: Distribución de Zt para Montalva et al. (2017), Zona 3

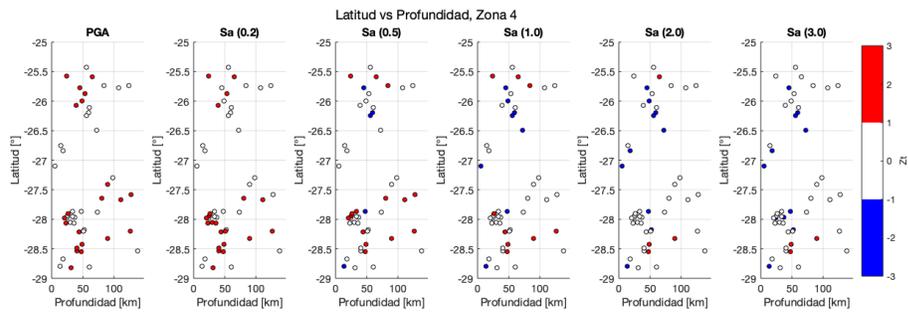
5.3.4. Zona 4



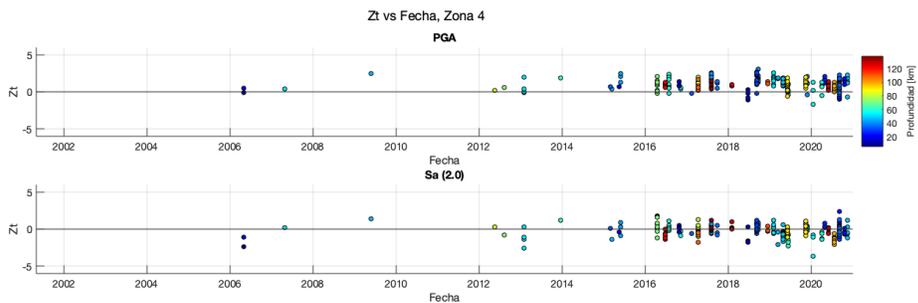
(a) Distribución de Zt vs Magnitud y Profundidad Focal



(b) Distribución de Zt vs Profundidad Focal



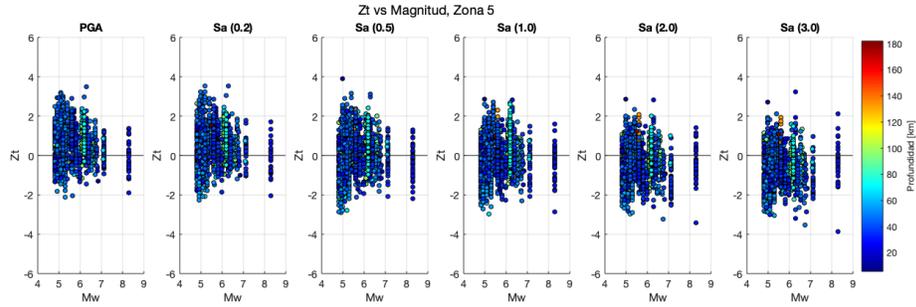
(c) Distribución de Zt con respecto a Latitud y Profundidad Focal



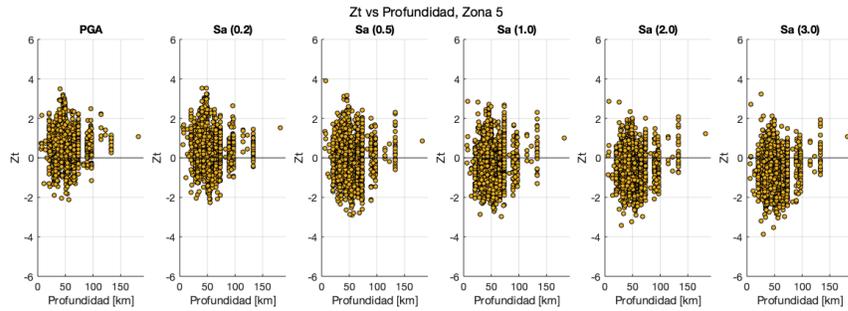
(d) Distribución de Zt vs Tiempo y Profundidad Focal

Figura 5.52: Distribución de Zt para Montalva et al. (2017), Zona 4

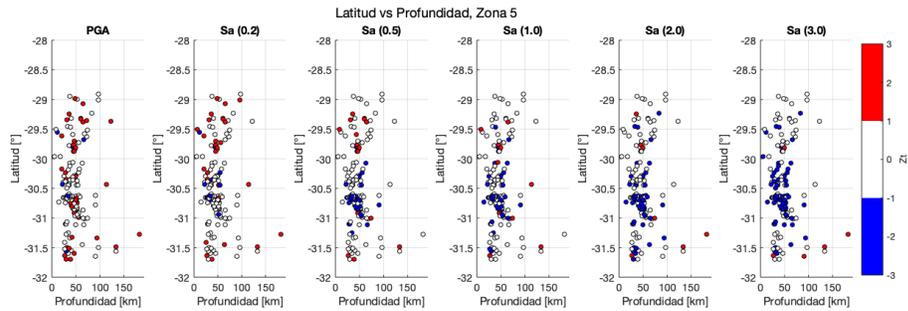
5.3.5. Zona 5



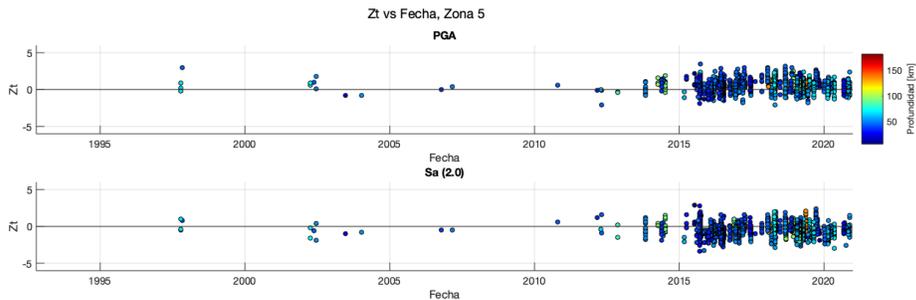
(a) Distribución de Z_t vs Magnitud y Profundidad Focal



(b) Distribución de Z_t vs Profundidad Focal



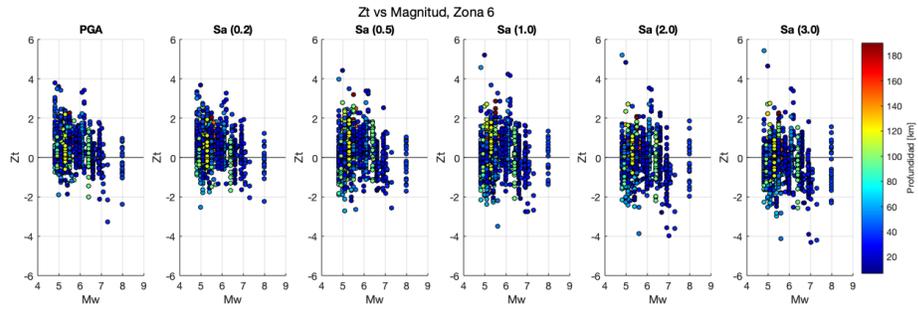
(c) Distribución de Z_t con respecto a Latitud y Profundidad Focal



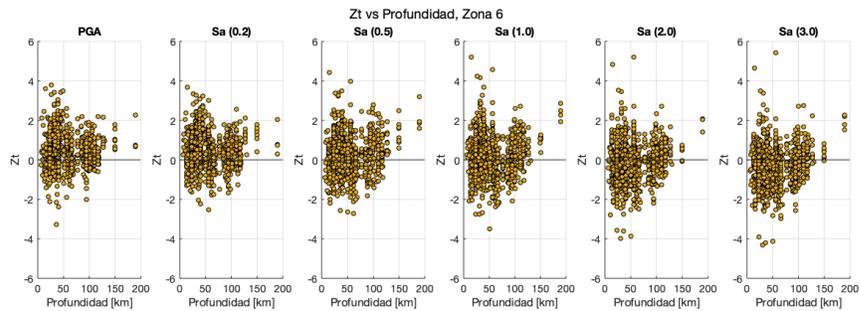
(d) Distribución de Z_t vs Tiempo y Profundidad Focal

Figura 5.53: Distribución de Z_t para Montalva et al. (2017), Zona 5

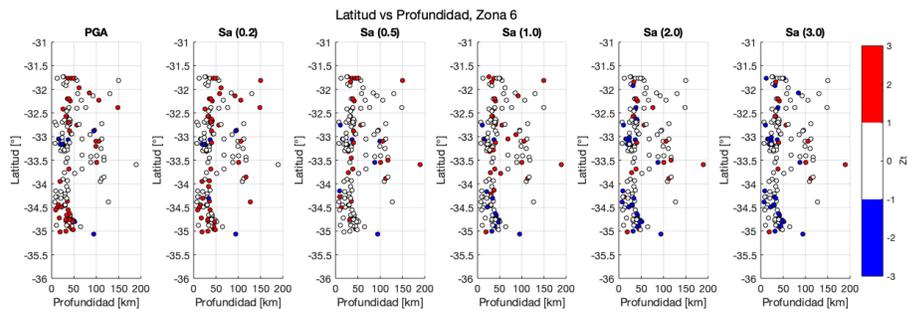
5.3.6. Zona 6



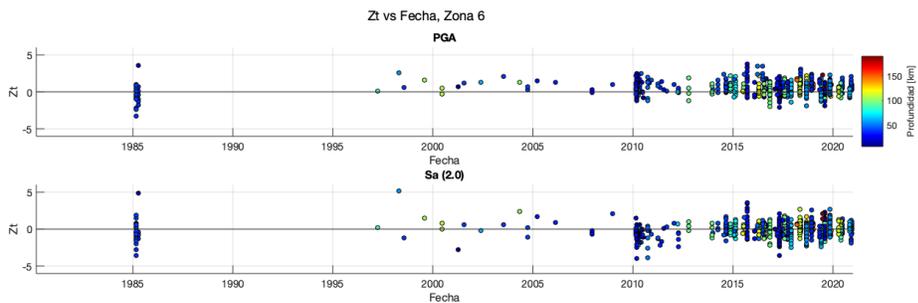
(a) Distribución de Zt vs Magnitud y Profundidad Focal



(b) Distribución de Zt vs Profundidad Focal



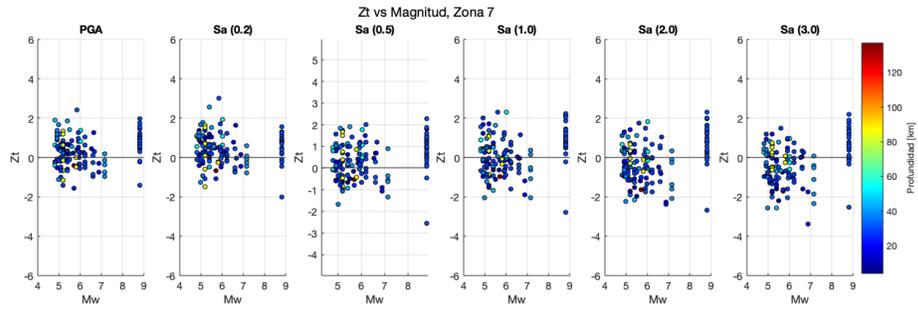
(c) Distribución de Zt con respecto a Latitud y Profundidad Focal



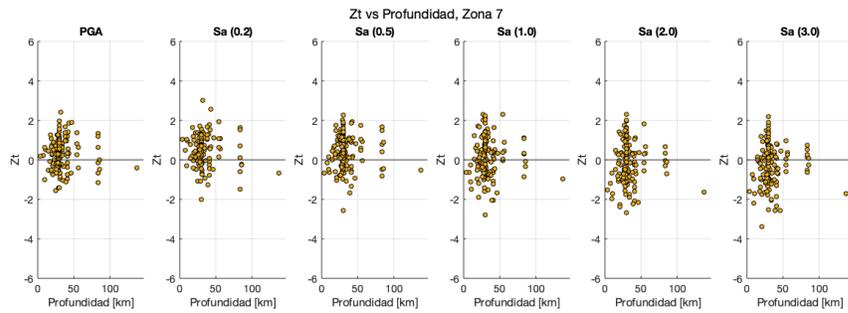
(d) Distribución de Zt vs Tiempo y Profundidad Focal

Figura 5.54: Distribución de Zt para Montalva et al. (2017), Zona 6

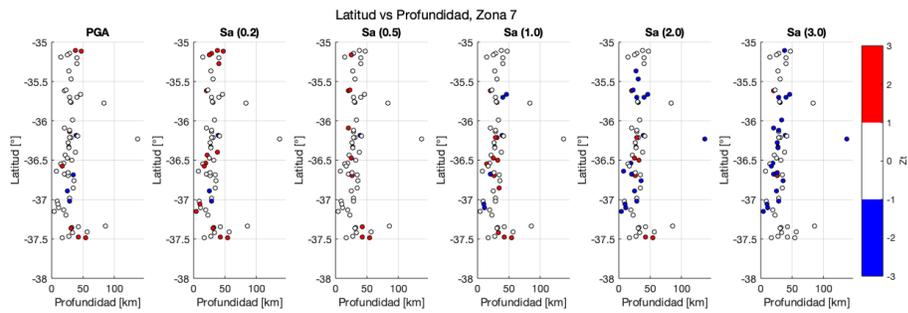
5.3.7. Zona 7



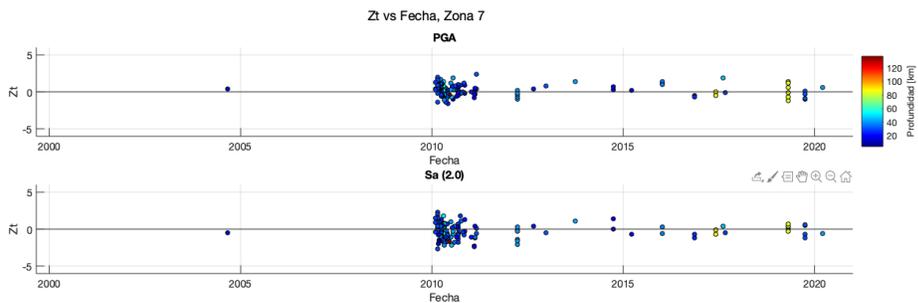
(a) Distribución de Zt vs Magnitud y Profundidad Focal



(b) Distribución de Zt vs Profundidad Focal



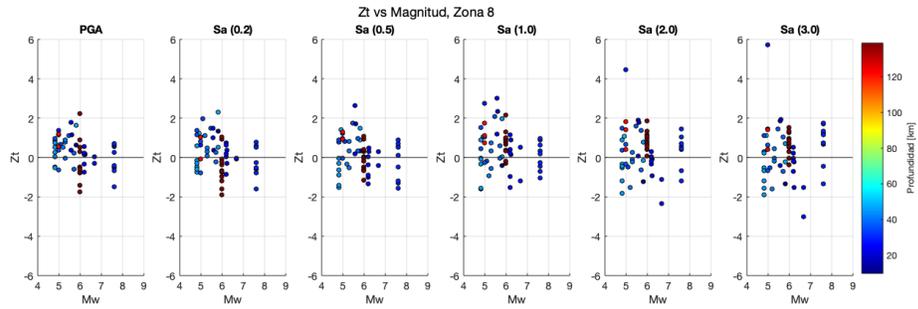
(c) Distribución de Zt con respecto a Latitud y Profundidad Focal



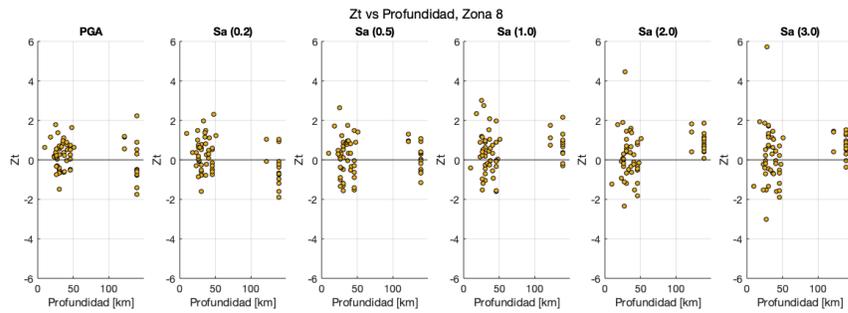
(d) Distribución de Zt vs Tiempo y Profundidad Focal

Figura 5.55: Distribución de Zt para Montalva et al. (2017), Zona 7

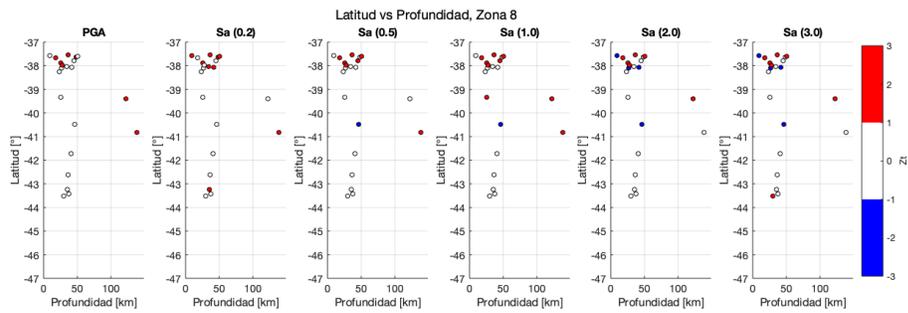
5.3.8. Zona 8



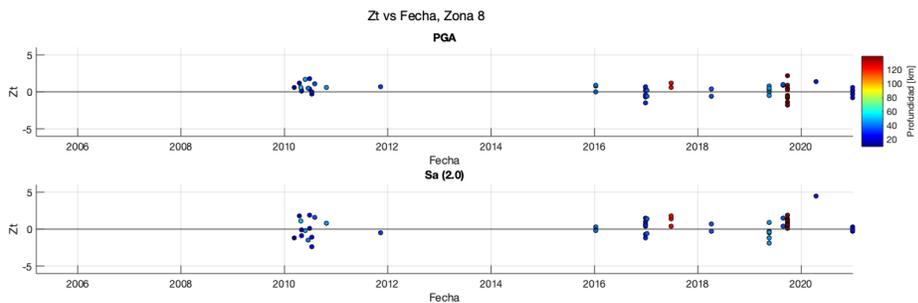
(a) Distribución de Z_t vs Magnitud y Profundidad Focal



(b) Distribución de Z_t vs Profundidad Focal



(c) Distribución de Z_t con respecto a Latitud y Profundidad Focal



(d) Distribución de Z_t vs Tiempo y Profundidad Focal

Figura 5.56: Distribución de Z_t para Montalva et al. (2017), Zona 8

5.4. Análisis Residual según Tipo de Suelo, DS61

A continuación, se presenta el resumen del análisis residual para los modelos de Montalva et al. (2017)^[1], Abrahamson et al. (2016)^[3], Contreras Boroschek (2012)^[2] y Zhao et al. (2016)^[4] contra la base de datos recopilada para el presente estudio. En esta sección se distingue según Tipo de Suelo de acuerdo al Decreto Supremo DS61, en función del Vs30 asociado a cada estación.

Los residuos normalizados se presentan en histogramas junto con su mejor ajuste a la distribución Gaussiana (curva de color azul) y se comparan con los modelos mencionados anteriormente, los cuáles son representados por una distribución Gaussiana de media igual a cero y desviación estándar igual a uno (curva segmentada de color rojo). Se presentan los histogramas para PGA y para los pseudo espectros de aceleración de distintos períodos hasta los 3 segundos.

Los resultados se seccionan según cada Tipo de Suelo, considerando Tipo A, Tipo B, Tipo C y Tipo D. Finalmente, se presentan tablas resumen con los valores de media μ y desviación estándar σ para cada modelo en los distintos tipos de suelo.

En la primera fila de las siguientes figuras se consideran todos los registros asociados a sitios con suelo Tipo A, en la segunda fila los suelos Tipo B, en la tercera fila los suelos Tipo C y en la última fila los suelos Tipo D.

Al final del análisis para cada tipo de suelo, se presentan además los resultados para los parámetros LH y LLH, los cuáles permiten cuantificar la capacidad predictiva de cada modelo al distinguir tipo de suelo.

5.4.1. Montalva et al. (2017)

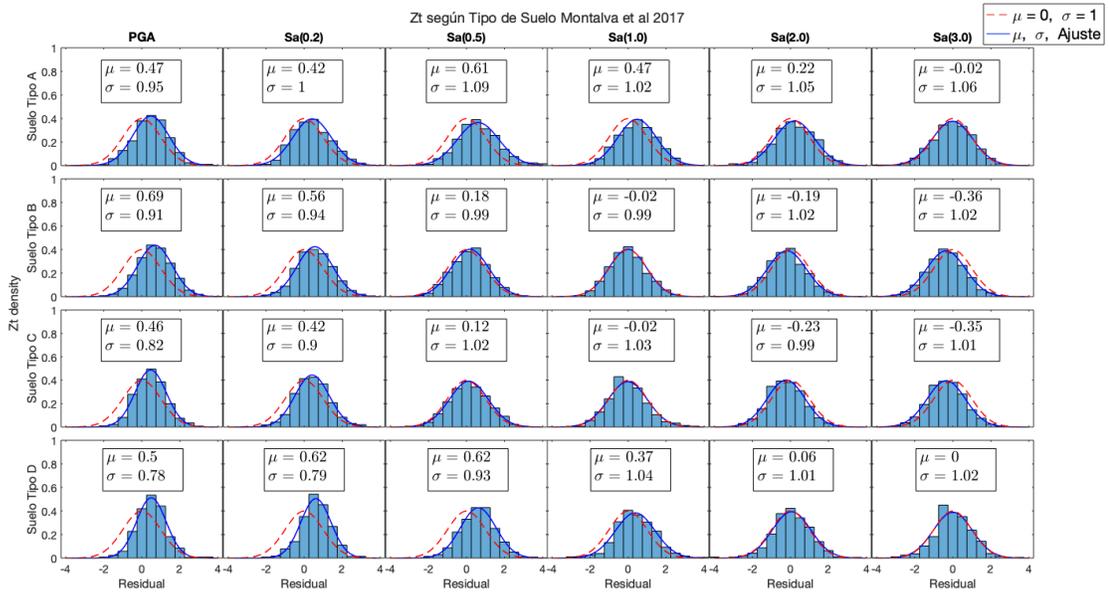


Figura 5.57: Análisis Residual según tipo de suelo, modelo Montalva et al 2017

5.4.2. Abrahamson et al. (2016)

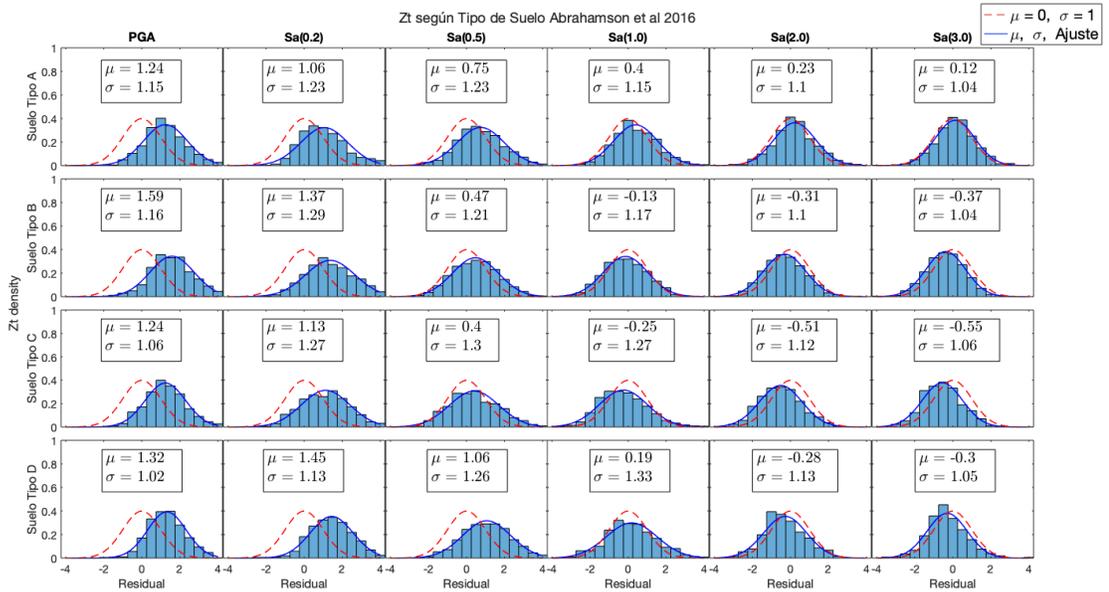


Figura 5.58: Análisis Residual según tipo de suelo, modelo Abrahamson et al 2016

5.4.3. Contreras Boroschek 2012

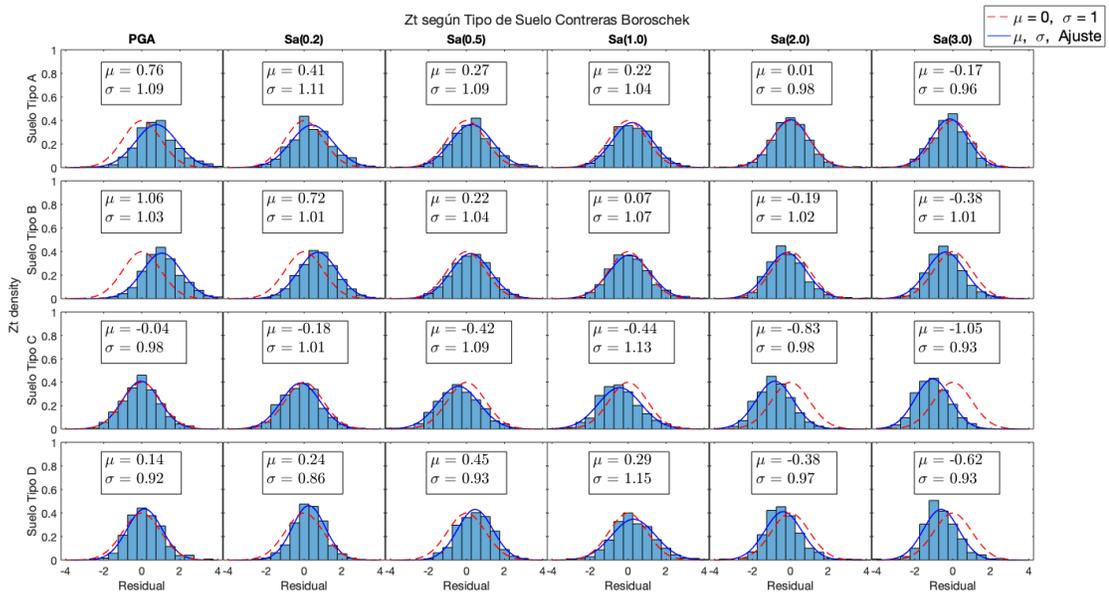


Figura 5.59: Análisis Residual según tipo de suelo, modelo Contreras Boroschek 2012

5.4.4. Zhao et al. (2016)

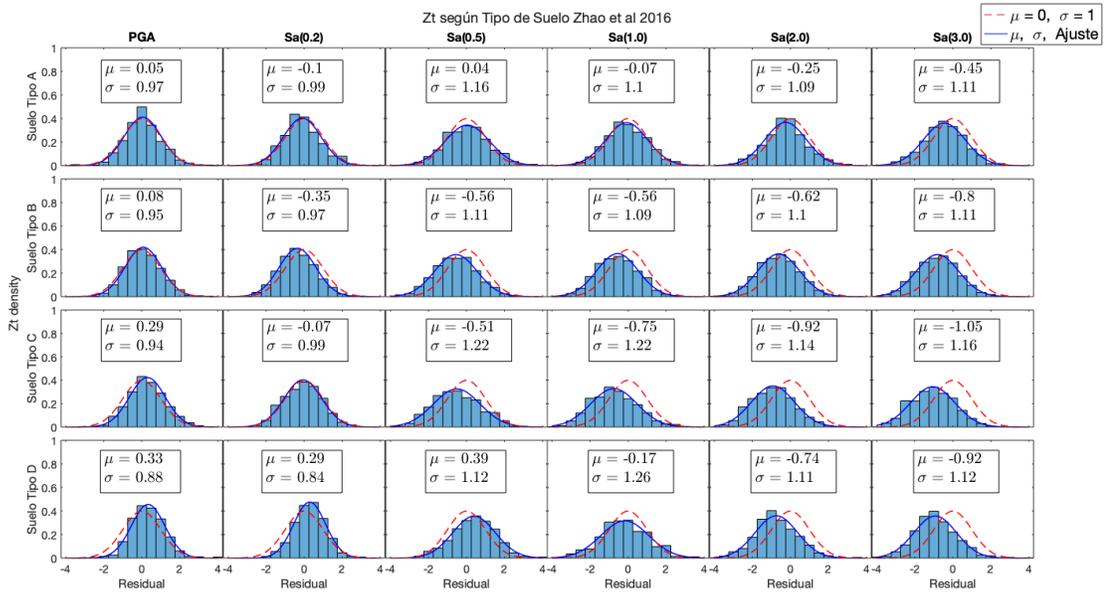


Figura 5.60: Análisis Residual según tipo de suelo, modelo Zhao et al 2016

5.5. Resumen del Análisis Residual según Tipo de Suelo DS61

5.5.1. Resumen para la media del ajuste

Tabla 5.27: Resumen análisis residual según tipo de suelo, parámetro μ

Modelo	Tipo de Suelo	PGA	Sa (0.2)	Sa (0.5)	Sa (1.0)	Sa (2.0)	Sa (3.0)
Montalva et al 2017	Tipo A	0.47	0.42	0.61	0.47	0.22	-0.02
	Tipo B	0.69	0.56	0.18	-0.02	-0.19	-0.36
	Tipo C	0.46	0.42	0.12	-0.02	-0.23	-0.35
	Tipo D	0.50	0.62	0.62	0.37	0.06	0.00
Abrahamson et al 2016	Tipo A	1.24	1.06	0.75	0.40	0.23	0.12
	Tipo B	1.59	1.37	0.47	-0.13	-0.31	-0.37
	Tipo C	1.24	1.13	0.40	-0.25	-0.51	-0.55
	Tipo D	1.32	1.45	1.06	0.19	-0.28	-0.30
Contreras Boroschek 2012	Tipo A	0.76	0.41	0.27	0.22	0.01	-0.17
	Tipo B	1.06	0.72	0.22	0.07	-0.19	-0.28
	Tipo C	-0.04	-0.18	-0.42	-0.44	-0.83	-1.05
	Tipo D	0.14	0.24	0.45	0.29	-0.38	-0.62
Zhao et al 2016	Tipo A	0.05	-0.10	0.04	-0.07	-0.25	-0.45
	Tipo B	0.08	-0.35	-0.56	-0.56	-0.62	-0.80
	Tipo C	0.29	-0.07	-0.51	-0.75	-0.92	-1.05
	Tipo D	0.33	0.29	0.39	-0.17	-0.74	-0.92

5.5.2. Resumen para el para la desviación estándar del ajuste

Tabla 5.28: Resumen análisis residual según tipo de suelo, parámetro σ

Modelo	Tipo de Suelo	PGA	Sa (0.2)	Sa (0.5)	Sa (1.0)	Sa (2.0)	Sa (3.0)
Montalva et al 2017	Tipo A	0.95	1.00	1.09	1.02	1.05	1.06
	Tipo B	0.91	0.94	0.99	0.99	1.02	1.02
	Tipo C	0.82	0.90	1.02	1.03	0.99	1.01
	Tipo D	0.78	0.79	0.93	1.04	1.01	1.02
Abrahamson et al 2016	Tipo A	1.15	1.23	1.23	1.15	1.10	1.04
	Tipo B	1.16	1.29	1.21	1.17	1.10	1.04
	Tipo C	1.06	1.27	1.30	1.27	1.12	1.06
	Tipo D	1.02	1.13	1.26	1.33	1.13	1.05
Contreras Boroschek 2012	Tipo A	1.09	1.11	1.09	1.04	0.98	0.96
	Tipo B	1.03	1.01	1.04	1.07	1.02	1.01
	Tipo C	0.98	1.01	1.09	1.13	0.98	0.93
	Tipo D	0.92	0.86	0.93	1.15	0.97	0.93
Zhao et al 2016	Tipo A	0.97	0.99	1.16	1.10	1.09	1.11
	Tipo B	0.95	0.97	1.11	1.09	1.10	1.11
	Tipo C	0.94	0.99	1.22	1.22	1.14	1.16
	Tipo D	0.88	0.84	1.12	1.26	1.11	1.12

Para la clasificación según tipo de suelo en función de Vs30 se tiene la siguiente cantidad de registros:

- 810 registros Tipo A.
- 1868 registros Tipo B.
- 1253 registros Tipo C.
- 715 registros Tipo D.

Para el modelo de Montalva et al. (2017)^[1] se observan los ajustes cuya media es la más cercana a cero en comparación con el resto de los modelos. Cabe recordar que uno de los parámetros de entrada de este modelo es el Vs30, y en función de dicho parámetro se han clasificado los sitios de acuerdo al Decreto Supero DS61. Comparativamente, se tiene que la mayor media o tendencia a subestimar lo observado en la base de datos, se da para el suelo Tipo D en los períodos 0.2 y 0.5 segundos, probablemente se deba a que se trata del suelo de peor calidad o menor compactación. A partir del período 2 segundos se observa una tendencia conservadora en el ajuste, con medias negativas para suelos Tipo B y C. Esta tendencia solo se observa para el período 3 segundos en el caso del suelo Tipo A. En cuanto a PGA se observan la media más alta para el suelo Tipo B, el resto de los modelos presenta una media similar, cercana a cero. Por último para la dispersión de los datos, se tienen desviaciones estándar que en general son cercanas a la desviación estándar unitaria que representa al modelo, esto debido al buen número de registros que se han considerado para cada Tipo de Suelo.

Para el modelo de Abrahamson et al. (2016)^[3] se observan los ajustes cuyas medias son las mayores en comparación al resto de los modelos, es decir, el modelo presenta la mayor tendencia a subestimar lo observado en la base de datos. Probablemente se deba a que el modelo a sido desarrollado a partir de una base de datos global. Al igual que para el modelo de Montalva et al. (2017)^[1], se observan medias negativas en los suelos Tipo B y C para el ajuste del pseudo espectro de aceleración a partir del período 1 segundo. Esta tendencia también se observa para el suelo Tipo D pero solo desde el período de 2 segundos. Para el suelo Tipo A, en cambio, las medias son positivas en todos los casos, es decir no se presenta una tendencia conservadora, probablemente se deba a que corresponde al suelo de mejor calidad.

Para el modelo de Contreras Boroschek (2012)^[2], el Vs30 no es uno de los parámetros de entrada, solo se distingue entre suelo y roca a partir de $Vs30 \geq 900$ m/s. En este contexto tiene sentido la notoria tendencia conservadora que se obtiene para el Suelo Tipo C, donde tanto el PGA y los pseudo espectros de aceleración que predice el modelo sobrestiman lo observado en la base de datos. Para el resto de Tipos de Suelo, los ajustes presentan una media positiva cercana a cero, sin embargo, a partir del período 2 segundos, al igual que para el modelo de Montalva et al. (2017)^[1], se revierte esta tendencia por una más conservadora donde los ajustes presentan medias negativas, indicando que para este rango las predicciones del modelo sobrestiman lo observado. Por último, debido al buen número de registros, se observan desviaciones estándar cercanas a la desviación estándar unitaria que representa al modelo.

Para el modelo de Zhao et al (2016)^[4], tampoco se tiene el Vs30 como parámetro de entrada, sino que directamente el tipo de suelo es uno de los parámetros de entrada. Para suelos Tipo A, Tipo B y Tipo C, este modelo presenta la mayor tendencia conservadora en comparación al resto de los modelos. Para este caso, los ajustes presentan un media negativa, que indica que el modelo sobrestima lo observado. Para el suelo Tipo C se observan las medias más alejadas de cero a partir del período 1 segundo, en comparación al resto de suelos. Para la predicción de PGA se observa la tendencia de que a peor calidad de suelo, más se aleja la media del ajuste a la media nula del modelo, de todas formas, el modelo subestima PGA para todos los tipos de suelo. La desviación estándar de los ajustes presentan valores cercanos a uno, debido al buen números de registros para cada tipo de suelo.

A continuación se presentan los resultados de los parámetros LH y LLH para cada tipo de suelo.

5.6. Likelihood (LH) y log-Likelihood (LLH) según Tipo de Suelo DS61

5.6.1. Suelo Tipo A

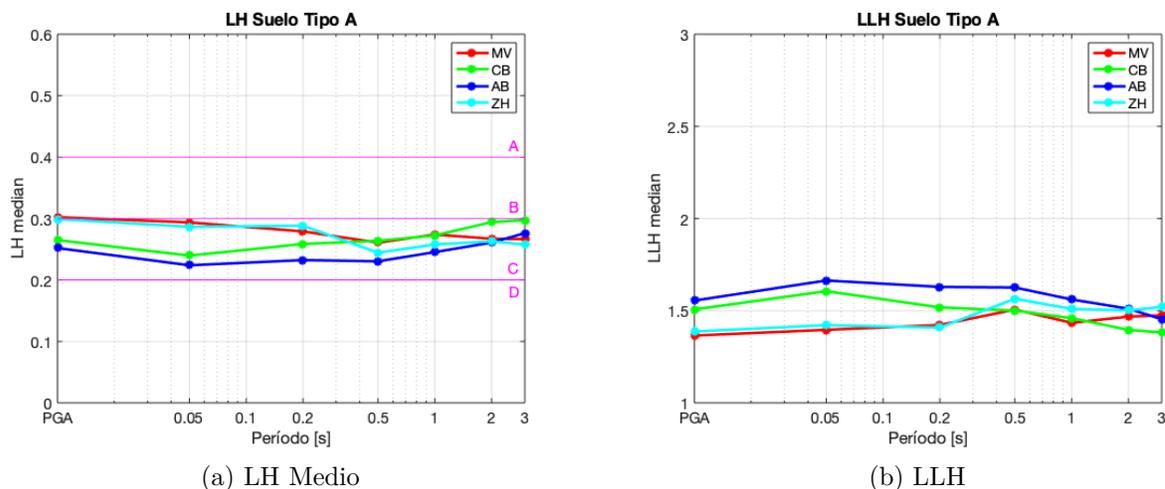


Figura 5.61: LH medio y LLH para Suelo Tipo A

Para suelo Tipo A, los modelos de Montalva et al. (2017)^[1] y Zhao et al. (2016)^[4] son los que presentan la mejor capacidad predictiva en función de los parámetros LH y LLH. Para PGA, ambos modelos presentan un LH tal que los clasifica en categoría B, correspondiente a una capacidad predictiva intermedia, sin embargo, para los períodos mayores se ve reducido el valor de LH clasificando a ambos modelos en categoría C, correspondiente a una capacidad predictiva baja. Esto coincide con la tendencia a presentar medias negativas en el ajuste del análisis residual, es decir, estos modelos pierden capacidad predictiva en la medida que sus predicciones comienzan a sobrestimar los parámetros observados en la base de datos para períodos mayores. Otro aspecto que puede explicar la buena capacidad predictiva del modelo de Zhao et al. (2016)^[4] es que no considera V_{s30} como parámetro de entrada, sino que directamente considera como parámetro de entrada el tipo de suelo. Otro aspecto particular, es que el modelo de Contreras Boroschek (2012)^[2] presenta una buena calidad predictiva para el pseudo espectro de aceleración en los períodos 2 y 3 segundos. A pesar de que este modelo solo distingue entre suelo o roca ($V_{s30} \geq 900$ m/s) como parámetro de entrada, esta clasificación parece ser suficiente para entregar una buena predicción para suelo tipo A.

5.6.2. Suelo Tipo B

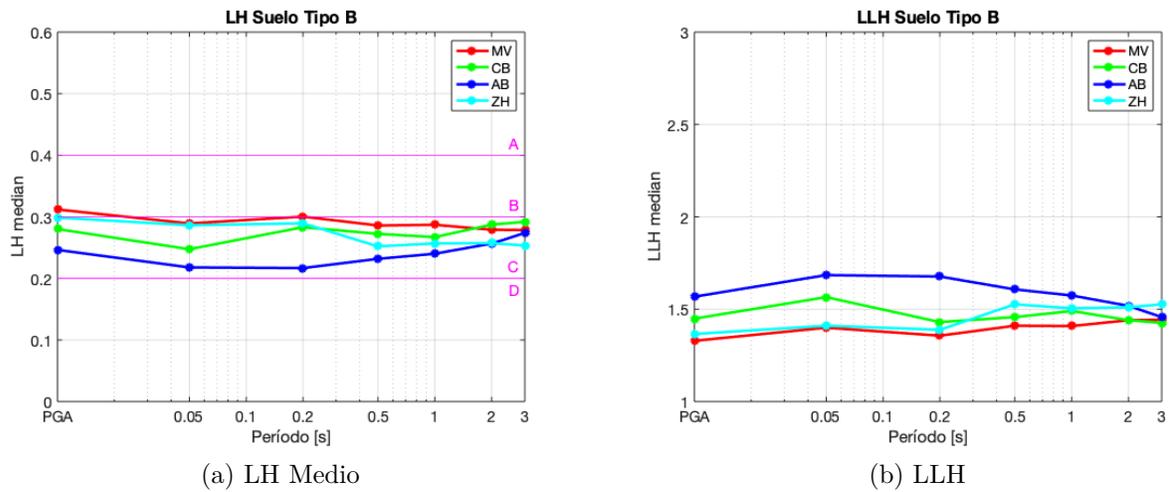


Figura 5.62: LH medio y LLH para Suelo Tipo B

Para suelo Tipo B se presenta una tendencia similar a la correspondiente a suelo Tipo A, es decir, en función de LH y LLH los Modelos de Montalva et al. (2017)^[1] y Zhao et al. (2016)^[4] presentan la mejor capacidad predictiva para PGA y los pseudo espectros de aceleración en los períodos menores. Para el caso de Montalva et al. (2017)^[1] esta buena capacidad predictiva probablemente se deba al hecho de que el modelo ha sido desarrollado a partir de una base de datos local, similar a la base de datos que se ha recopilado para el presente estudio. En el caso de Zhao et al. (2016)^[4], probablemente se deba al hecho de que el modelo considera como parámetro de entrada el tipo de suelo en el sitio. Para los períodos mayores, nuevamente se observa una buena capacidad predictiva del Modelo Contreras Boroschek (2012)^[2], esto coincide con una tendencia conservadora en el ajuste del análisis residual, donde las medias negativas, indican que las predicciones han sobrestimado lo observado, lo cual tiene sentido al recordar que este modelo solo distingue suelo y roca. En este caso, los suelos tipo B clasifican como suelo y por ende se tiene una tendencia de las predicciones a sobrestimar las observaciones.

5.6.3. Suelo Tipo C

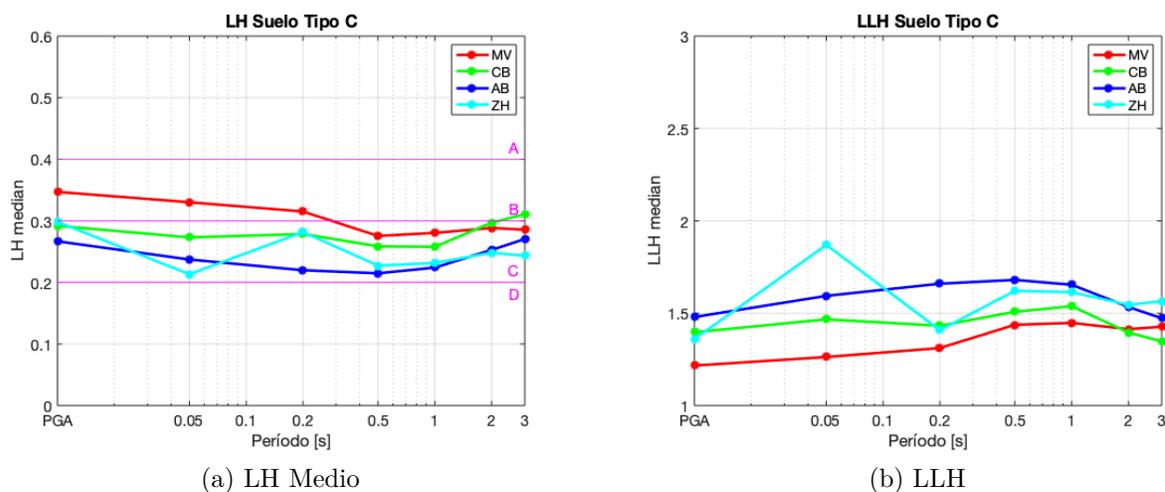


Figura 5.63: LH medio y LLH para Suelo Tipo C

Para suelo Tipo C, según los parámetros LH y LLH, el modelo de Montalva et al. (2017)^[1] es el que presenta nuevamente la mejor capacidad predictiva. Para PGA y para los primeros períodos alcanza la categoría B, correspondiente a una capacidad predictiva intermedia. A partir del período 0.5 se observa un menor LH, cayendo a la categoría C, lo cuál indica una baja capacidad predictiva. Esta situación coincide con el rango en que el ajuste del análisis residual presenta una tendencia conservadora y medias negativas. Es decir, mientras las predicciones del modelo sobrestiman lo observado, su capacidad predictiva disminuye. A diferencia del caso para los tipos de suelo A y B; el modelo de Zhao et al. (2016)^[4] presenta una baja capacidad predictiva para suelo tipo C, particularmente en el período 0.05 segundos. Esta baja capacidad predictiva se puede deber a errores en la programación del modelo, específicamente en los coeficientes asociados a suelo tipo C en el modelo, o bien, puede ser producto de que la base de datos a partir de la cuál se ha desarrollado el modelo es global y difiere de la data local que se ha recopilado para el presente estudio.

Para el modelo de Contreras Boroschek (2012)^[2], se observa una mejora de la capacidad predictiva para los pseudo espectros de aceleración en los períodos 1, 2 y 3 segundos. Esto le permite al modelo alcanzar la categoría B para el valor de LH, lo cuál indica que el modelo presenta una capacidad predictiva intermedia. Cabe recordar que este modelo distingue únicamente entre suelo y roca, es decir, no distingue Vs30, lo cuál implica que los suelos Tipo C clasifiquen simplemente como suelo. En este contexto, las predicciones del modelo sobrestiman lo observado en la base de datos, lo cuál en este caso se traduce en una mejora de la capacidad predictiva del modelo en dichos períodos.

5.6.4. Suelo Tipo D

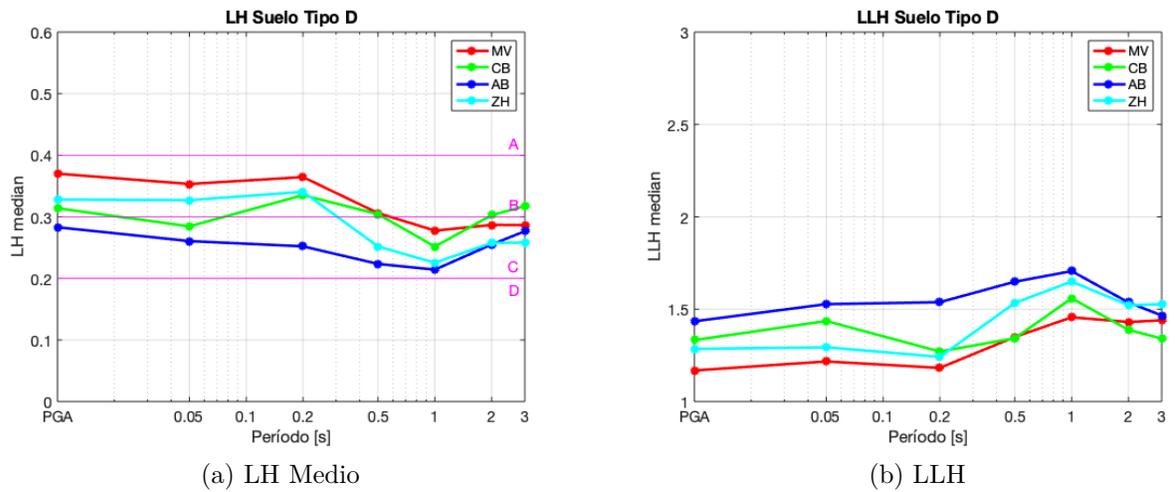


Figura 5.64: LH medio y LLH para Suelo Tipo D

Para el suelo Tipo D, según los parámetros LH y LLH, la mejor capacidad predictiva la presenta el Modelo de Montalva et al (2017)^[1]. Para PGA y los primeros períodos, este modelo junto con el de Zhao et al. (2016)^[4] presentan valores de LH entre 0.3 y 0.4, lo cuál los clasifica en categoría B, correspondiente a una capacidad predictiva intermedia. A partir del período 0.2 segundos comienza a decaer la capacidad predictiva de estos modelos hasta la categoría C o de baja capacidad predictiva. Esta situación coincide con una tendencia conservadora en el ajuste del análisis residual, donde se observan medias menores y negativas principalmente para el modelo de Zhao et al. (2016)^[4]. Esta tendencia a sobrestimar los pseudo espectros de aceleración observados incide en una disminución de la capacidad predictiva del modelo. Otro aspecto a destacar es que nuevamente el modelo de Contreras Boroschek (2012)^[2] presenta un aumento en la capacidad predictiva para los períodos mayores. Se observa que el valor de LH sube a categoría B o de capacidad predictiva intermedia. Cabe destacar que la base de datos a partir de la cuál se ha desarrollado este modelo es una data local, similar a la recopilada para elaborar el presente estudio, la cuál además está compuesta principalmente por registros asociados al Terremoto del Maule 2010 Mw 8.8, dónde gran parte de los registros relevantes del evento pertenecen a sitios con suelo Tipo D.

A continuación, se presentan los resultados del análisis residual distinguiendo según Zona Sísmica NCH 433

5.7. Análisis Residual según Zona Sísmica NCH 433

A continuación, se presenta el resumen del análisis residual para los modelos de Montalva et al. (2017)^[1], Abrahamson et al. (2016)^[3], Contreras Boroschek (2012)^[2] y Zhao et. al (2016)^[4] contra la base de datos recopilada para el presente estudio. En esta sección se distingue según Zona Sísmica de acuerdo a la norma NCH 433.

Los residuos normalizados se presentan en histogramas junto con su mejor ajuste a la distribución Gaussiana (curva de color azul) y se comparan con los modelos mencionados anteriormente, los cuáles son representados por una distribución Gaussiana de media igual a cero y desviación estándar igual a uno (curva segmentada de color rojo). Se presentan los histogramas para PGA y para los pseudo espectros de aceleración de distintos períodos hasta los 3 segundos.

Los resultados se seccionan según cada Zona Sísmica, considerando Zona Sísmica 1, Zona Sísmica 2 y Zona Sísmica 3. Finalmente, se presentan tablas resumen con los valores de media μ y desviación estándar σ para cada modelo en las distintas zonas sísmicas.

En la primera fila de las siguientes figuras se consideran todos los registros asociados a sitios en Zona Sísmica 1, en la segunda fila los sitios ubicados en Zona Sísmica 2 y en la tercera fila los sitios ubicados en Zona Sísmica 3.

Al final del análisis para cada Zona Sísmica, se presentan además los resultados para los parámetros LH y LLH, los cuáles permiten cuantificar la capacidad predictiva de cada modelo al distinguir según Zona Sísmica.

5.7.1. Montalva et al. (2017)

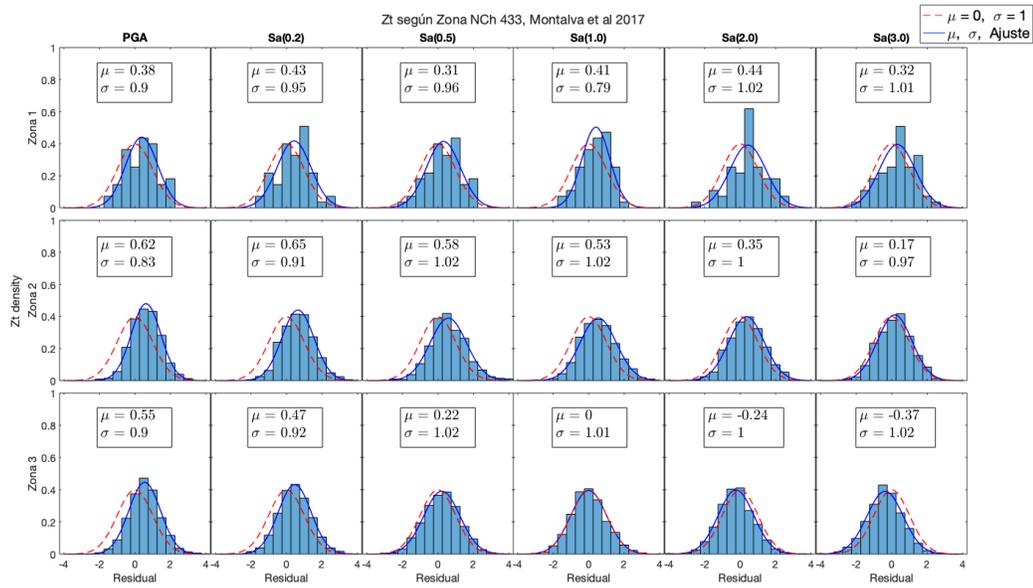


Figura 5.65: Análisis Residual según Zona NCH 433, modelo Montalva et al 2017

5.7.2. Abrahamson et al. (2016)

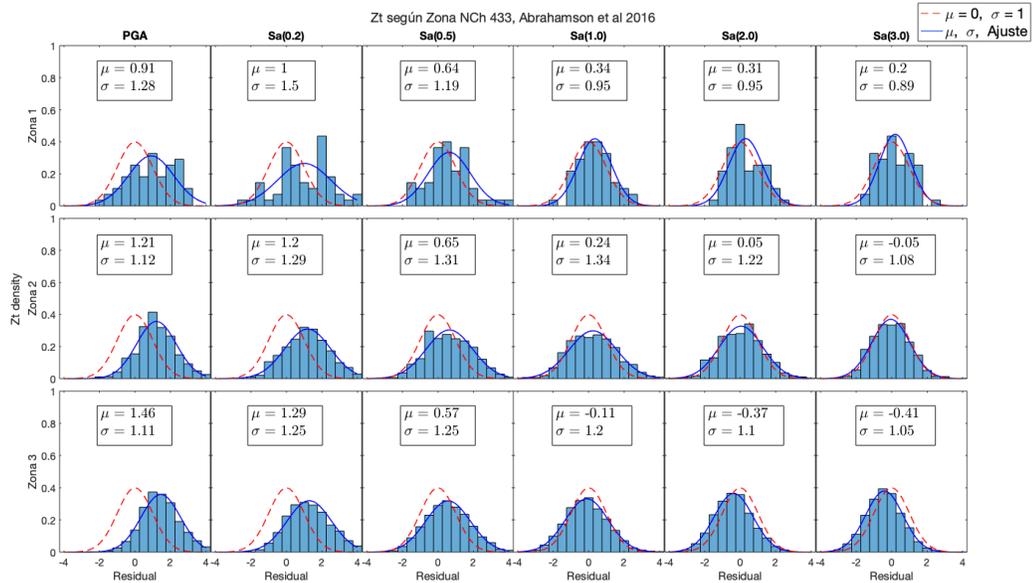


Figura 5.66: Análisis Residual según Zona NCH 433, modelo Abrahamson et al 2016

5.7.3. Contreras Boroschek 2012

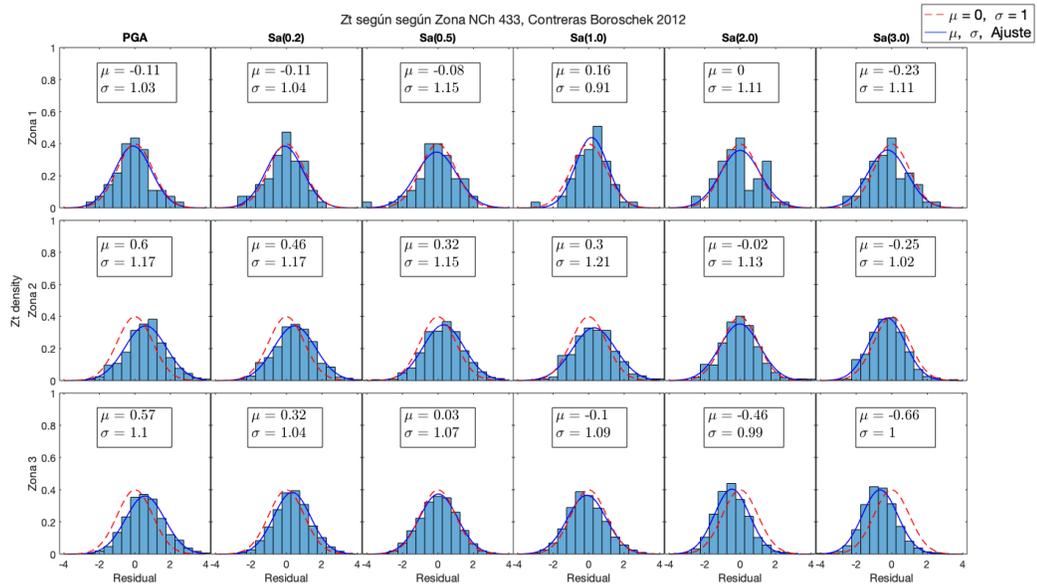


Figura 5.67: Análisis Residual según Zona NCH 433, modelo Contreras Boroschek 2012

5.7.4. Zhao et al. (2016)

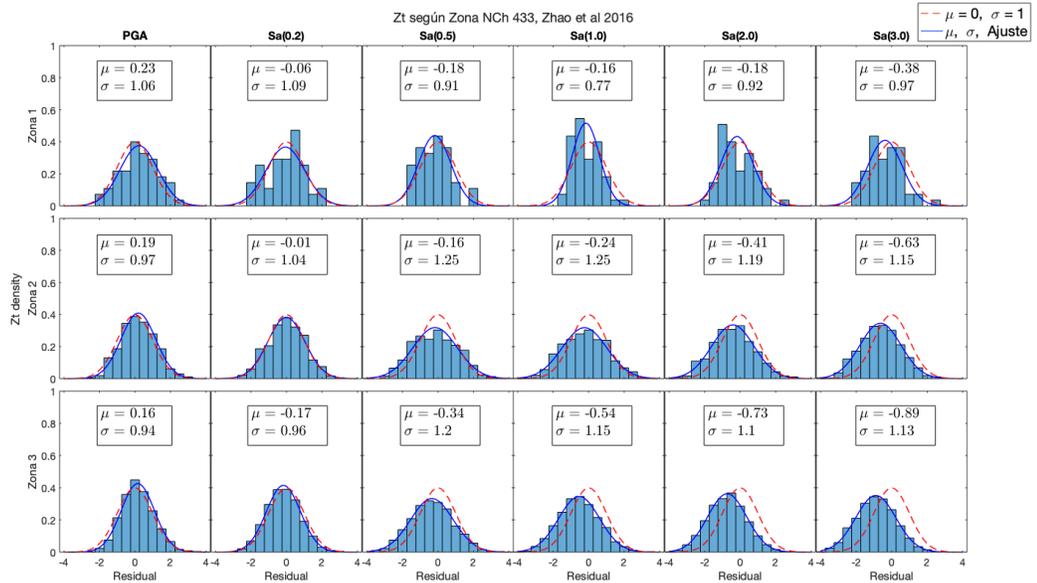


Figura 5.68: Análisis Residual según Zona NCH 433, modelo Zhao et al 2016

5.8. Resumen del Análisis Residual según Zona Sísmica NCH 433

5.8.1. Resumen para la media del ajuste

Tabla 5.29: Resumen análisis residual según Zona NCH 433, parámetro μ

Modelo	Zona Nch 433	PGA	Sa (0.2)	Sa (0.5)	Sa (1.0)	Sa (2.0)	Sa (3.0)
Montalva et al 2017	1	0.38	0.43	0.31	0.41	0.44	0.32
	2	0.62	0.65	0.58	0.53	0.35	0.17
	3	0.55	0.47	0.22	0.00	-0.24	-0.37
Abrahamson et al 2016	1	0.91	1.00	0.64	0.34	0.31	0.20
	2	1.21	1.20	0.65	0.24	0.05	-0.05
	3	1.46	1.29	0.57	-0.11	-0.37	-0.41
Contreras Broschek 2012	1	-0.11	-0.11	-0.08	0.16	0.00	-0.23
	2	0.60	0.46	0.32	0.30	-0.02	-0.25
	3	0.57	0.32	0.03	-0.10	-0.46	-0.66
Zhao et al 2016	1	0.23	-0.06	-0.18	-0.16	-0.18	-0.38
	2	0.19	-0.01	-0.16	-0.24	-0.41	-0.63
	3	0.16	-0.17	-0.34	-0.54	-0.73	-0.89

5.8.2. Resumen para la desviación estándar del ajuste

Tabla 5.30: Resumen análisis residual según Zona NCH 433, parámetro σ

Modelo	Zona Nch 433	PGA	Sa (0.2)	Sa (0.5)	Sa (1.0)	Sa (2.0)	Sa (3.0)
Montalva et al 2017	1	0.90	0.95	0.96	0.79	1.02	1.01
	2	0.83	0.91	1.02	1.02	1.00	0.97
	3	0.90	0.92	1.02	1.01	1.00	1.02
Abrahamson et al 2016	1	1.28	1.50	1.19	0.95	0.95	0.89
	2	1.12	1.29	1.31	1.34	1.22	1.08
	3	1.11	1.25	1.25	1.20	1.10	1.05
Contreras Broschek 2012	1	1.03	1.04	1.15	0.91	1.11	1.11
	2	1.17	1.17	1.15	1.21	1.13	1.02
	3	1.10	1.04	1.07	1.09	0.99	1.00
Zhao et al 2016	1	1.03	1.09	0.91	0.77	0.92	0.97
	2	0.97	1.04	1.25	1.25	1.19	1.15
	3	0.94	0.96	1.20	1.15	1.10	1.13

Para la clasificación según Zona Sísmica NCH 433, se tiene la siguiente cantidad de registros:

- 41 registros en Zona Sísmica 1.
- 1008 registros en Zona Sísmica 2.
- 3593 registros en Zona Sísmica 3.

Para el modelo de Montalva et al. (2017)^[1], el ajuste del análisis residual muestra para Zona 1 y Zona 2 una media positiva tanto para PGA, como para los pseudo espectros de aceleración, lo cual indica una tendencia por parte del modelo a subestimar lo observado en la base de datos. Para la Zona 3, en cambio, donde se tiene un mayor número de registros, la media positiva solo se observa para PGA y los períodos 0.2 y 0.5 segundos. Para los pseudo espectros de aceleración en los siguientes períodos se observa una media negativa, lo que indica que en este rango el modelo sobrestima lo observado para Zona 3. En cuanto a la dispersión de los datos, debido a la gran cantidad de registros que se han considerado particularmente para Zona 3, se observan valores de desviación estándar bastante cercanos a la desviación estándar unitaria que representa al modelo. Destaca el caso del pseudo espectro de aceleración en el período 1 segundo para Zona 3, cuyo ajuste presenta una media nula igual a cero como la que representa al modelo y una desviación estándar bastante próxima a la que representa al modelo.

Para el modelo de Abrahamson et al. (2016)^[3] se observa un corrimiento mayor del ajuste hacia la derecha en comparación al modelo de Montalva et al. (2017)^[1] y además presenta una mayor desviación estándar. Probablemente se deba a que el modelo se ha desarrollado a partir de data global a diferencia de la data local recopilada para el presente estudio. Esta tendencia a subestimar lo observado es más marcada para PGA y el pseudo espectro en el período 0.2 segundos donde la media del ajuste es mayor. Al igual que para el modelo de Montalva et al. (2017)^[1], se observa una tendencia a mostrar un ajuste con media negativa para el pseudo espectro en los períodos mayores asociados a los registros de Zona 3. Para el caso de las Zonas 1 y 2 se mantiene la tendencia a subestimar lo observado, con media positiva en el ajuste.

Para el modelo de Contreras Boroschek (2012)^[2], se observa una media negativa para el ajuste en Zona Sísmica 1. A diferencia de los modelos de Montalva et al. (2017)^[1] y Abrahamson et al. (2016)^[3] se presenta una tendencia a sobrestimar lo observado en la base de datos recopilada. Cabe recordar que para el modelo de Contreras Boroschek (2012)^[2], la base de datos para desarrollar el modelo es bastante más acotada que para los demás modelos y está marcada por los registros asociados al Terremoto del Maule 2010 Mw 8.8. Para las Zonas 2 y 3, se repite la tendencia conservadora de los demás modelos para los pseudo espectros de aceleración en los períodos mayores. Además, el ajuste presenta una desviación estándar cercana a uno, que corresponde a la desviación estándar que representa al modelo, esto se produce por el buen número de registros en la base de datos para Zona Sísmica 3.

Para el modelo de Zhao et al. (2016)^[4] se presenta la mayor tendencia conservadora. El ajuste del análisis residual para las tres Zonas Sísmicas muestra medias negativas para el pseudo espectro de aceleración en todos los períodos. Esta tendencia en las predicciones a sobrestimar lo observado es mayor para Zona 3, pues presenta la menor media. En cuanto a la predicción de PGA, el ajuste del modelo muestra una media positiva para las tres Zonas,

lo que indica que el modelo subestima este parámetro en relación a lo observado en la base de datos. En orden se tiene que la Zona Sísmica 3 presenta la media positiva para PGA más cercana a cero, luego Zona Sísmica 2 y por último la Zona Sísmica 1. Esto coincide con el hecho de que la mayor cantidad de registros de la base de datos corresponden a Zona Sísmica 3, seguido de la Zona Sísmica 2 y por último, Zona Sísmica 1.

A continuación, se muestran los resultados para los parámetros LH y LLH en cada Zona Sísmica NCH 433.

5.9. Likelihood (LH) y log-Likelihood (LLH) según Zona Sísmica NCH 433

5.9.1. Zona Sísmica 1 NCH 433

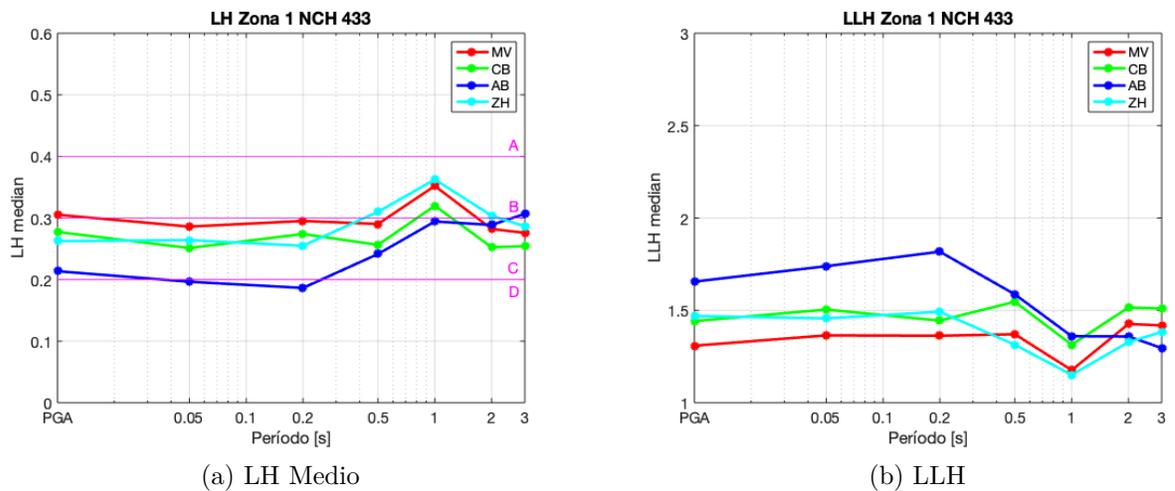


Figura 5.69: LH medio y LLH para Zona Sísmica 1 NCH 433

Para Zona Sísmica 1 se tiene una menor cantidad de registros en la base de datos en comparación a Zona Sísmica 2 y Zona Sísmica 3. En este contexto, el modelo de Montalva et al. (2017)^[1] es el que presenta la mejor capacidad predictiva en función de los parámetros LH y LLH para PGA y los pseudo espectros de aceleración en los primeros períodos. Para este caso, solo el modelo de Montalva et al. (2017)^[1] presenta únicamente medias positivas en el ajuste del análisis residual. Sin embargo, al contar con una cantidad reducida de registros en Zona Sísmica 1, se observa que el modelo clasifica en categoría C o de baja capacidad predictiva. En el período 1 segundo se observa una mejora en la capacidad predictiva de los modelos que les permite alcanzar la categoría B correspondiente a un capacidad predictiva intermedia. Esto coincide con el inicio de una tendencia a presentar medias negativas en el ajuste del análisis residual para los modelos de Abrahamson et al. (2016)^[3], Contreras Boroscchek (2012)^[2] y Zhao et al. (2016)^[4]. Es decir, para este caso, en que los modelos comienzan a sobrestimar lo observado en la base de datos, se observa un aumento de su capacidad predictiva. Otro aspecto a destacar es que para el pseudo espectro de aceleración en el período 0.2 segundos el modelo de Abrahamson et al. (2016)^[3] alcanza una inaceptable capacidad predictiva, lo que indica que se debería evitar aplicar este modelo para el caso señalado

5.9.2. Zona Sísmica 2 NCH 433

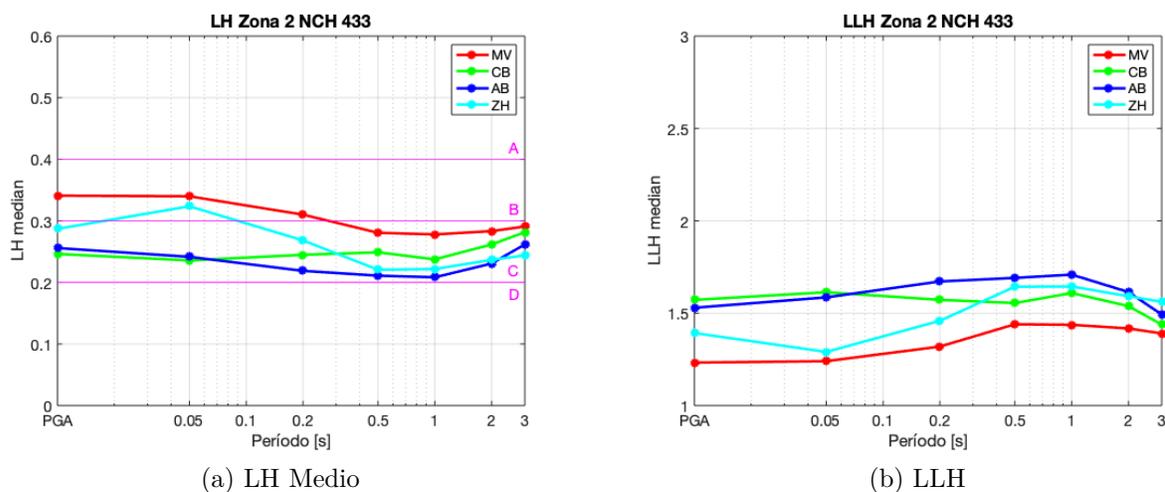


Figura 5.70: LH medio y LLH para Zona Sísmica 2 NCH 433

Para Zona Sísmica 2 se observan en general mayores valores de LH y nuevamente el modelo de Montalva et al. (2017)^[1] es el que presenta la mejor capacidad predictiva según LH y LLH. Esto coincide con el hecho de que es el único modelo que presenta medias positivas en el ajuste del análisis residual para todos los períodos. A pesar de que el modelo de Montalva et al. (2017)^[1] presenta el mayor LH para PGA y todos los demás períodos; se observa un decaimiento en su capacidad predictiva a partir del período 0.5 segundos. En este rango el modelo presenta una clasificación C, que indica una baja capacidad predictiva. Esto coincide con el límite en que el resto de los modelos comienzan a mostrar una tendencia conservadora al presentar medias negativas en el ajuste del análisis residual.

5.9.3. Zona Sísmica 3 NCH 433

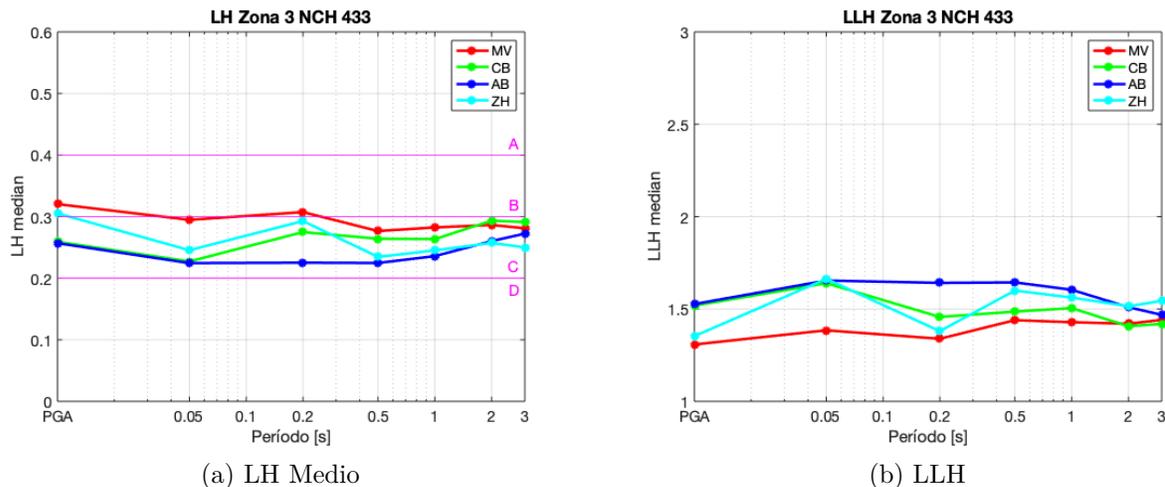


Figura 5.71: LH medio y LLH para Zona Sísmica 3 NCH 433

Para la Zona Sísmica 3, nuevamente el modelo de Montalva et al. (2017)^[1] presenta la mejor capacidad predictiva en función de los parámetros LH y LLH, probablemente porque considera la base de datos más similar a la que se ha recopilado para el presente estudio. Para el caso de Zhao et al (2016)^[4], que presenta la tendencia más conservadora de los cuatro modelos, se observa una buena capacidad predictiva en Zona Sísmica 3, lo que indica que se premia para PGA y los primeros períodos el hecho de sobrestimar lo observado en la base de datos. Otro aspecto a destacar es que gracias al gran número de registros en Zona Sísmica 3, se puede analizar de forma más confiable la capacidad predictiva de los modelos. En este contexto, ninguno de los modelos alcanza un valor de LH bajo, tal que lo ubique en categoría D correspondiente a una inaceptable capacidad predictiva.

Capítulo 6

Conclusiones

A partir de un análisis residual y en función de los parámetros LH y LLH se ha evaluado la validez y capacidad predictiva de los modelos de movimiento fuerte de Montalva et al. (2017)^[1], Abrahamson et al. (2016)^[3], Contreras Boroschek (2012)^[2] y Zhao et al. (2016)^[4] para el caso chileno.

6.1. Análisis contra toda la Base de Datos

El análisis residual y el ajuste de los histogramas para el residuo total normalizado Z_t , ha permitido evaluar a partir de las medias μ del ajuste si los modelos son conservadores o no conservadores. En este contexto, una media positiva indica que las predicciones del modelo subestiman lo observado en la base de datos, en cambio, una media negativa indica una tendencia conservadora, donde las predicciones de los modelos sobrestiman lo observado en la base de datos.

Al revisar el análisis residual contra toda la base de datos recopilada, se observa que las medias más cercanas a cero son las registradas para el modelo de Montalva et al. (2017)^[1] y Contreras Boroschek (2012)^[2]. Esto se debe a que ambos modelos cumplen con la condición de haber sido desarrollados a partir de una base de datos local. Para el caso de Montalva et al. (2017)^[1], su base de datos es similar a la recopilada para desarrollar el presente estudio, tal que el rango de validez para magnitudes en este modelo ($5.0 \leq MW \leq 8.0$ o 9.0) es el más cercano al rango de magnitudes de la base de datos propia ($4.8 \leq Mw \leq 8.8$). Esta condición le permite al modelo alcanzar la mejor capacidad predictiva en función de los parámetros LH y LLH, alcanzando un buen ajuste tanto para períodos cortos como para períodos largos. Sin embargo, se observa que el modelo presenta medias positivas en el ajuste para PGA y los pseudo espectros de aceleración hasta el período de 1 segundo, esto indica que el modelo puede ser no conservador en este rango, de tal forma que las predicciones del modelo subestiman lo observado en la base de datos.

Al distinguir entre registros asociados a eventos interplaca de registros asociados a eventos intraplaca no se observan diferencias notables en las medias μ para los modelos de Montalva et al. (2017)^[1] ni Contreras Boroschek (2012)^[2]. Sin embargo, para los modelos desarrollados a partir de data global, como el de Abrahamson et al. (2016)^[3] y Zhao et al. (2016)^[4], se tiene que las medias en el ajuste sí presentan una diferencia notable al distinguir según mecanismo. Para el modelo de Montalva et al. (2017)^[1], los valores de la media (μ) se ven similares entre

fuerza interplaca o intraplaca. Para el modelo de Abrahamson et al. (2016)^[3], en cambio, el valor de la media (μ) es levemente mejor, es decir, más cercano a 0, en el caso intraplaca que en el caso interplaca.

Para el modelo de Abrahamson et al. (2016)^[3] se observa un mayor corrimiento del ajuste hacia la derecha para el caso interplaca, lo cual indica una mayor tendencia del modelo a ser no conservador al estimar parámetros asociados a eventos de este tipo. Para el caso intraplaca las medias en el ajuste son menores, e incluso se pueden observar medias negativas para el ajuste del pseudo espectro en los períodos de 2 y 3 segundos, lo cual indica que en este rango el modelo puede ser conservador, de forma tal que sus predicciones sobrestimen lo observado.

El modelo de Zhao et al. (2016)^[4] en general se presenta como el más conservador de los modelos estudiados, con una media negativa en todos los períodos analizados para el pseudo espectro de aceleración en registros asociados a eventos intraplaca. A pesar de que el modelo de Zhao et al. (2016)^[4] se presenta como el más conservador, se destaca su buen ajuste y capacidad predictiva sobre todo en períodos cortos. Esto se confirma en función de los parámetros LH y LLH donde solo es superado por el modelo de Montalva et al. (2017)^[1] en PGA y períodos hasta 0.5 segundos. Incluso se observa que el modelo puede ser un gran predictor de PGA para eventos intraplaca al presentar una media $\mu = 0$ y σ menor a 1. La razón del buen ajuste de este modelo, de acuerdo a lo indicado en la publicación de Zhao et al. (2016)^[4] se puede explicar en función de que se han excluido de su base de datos aquellos registros provenientes de sitios en los cuales la clasificación de sitio ha sido inferida, lo cual le ha permitido al modelo mejorar la bonanza del ajuste. Por otro lado, la gran instrumentalización presente en Japón y por ende la buena calidad de los registros en su base de datos también juega un papel fundamental en el buen ajuste del modelo.

Lo anterior permite concluir que para aplicar modelos de movimiento fuerte desarrollados a partir de data global, se requiere una mayor certeza acerca del tipo de mecanismo para el evento que se desea estimar, puesto que como se ha visto en el análisis residual, estos modelos pueden pasar de sobrestimar a subestimar ciertos parámetros solo por distinguir si el evento es interplaca o intraplaca. Para el caso chileno, los modelos de Montalva et al. (2017)^[1] y Contreras Boroschek (2012)^[2], desarrollados a partir de data local no presentan una diferencia notable al distinguir mecanismo, esto se traduce en que para ambos mecanismos se observa una buena capacidad predictiva. En el caso del modelo de Montalva et al. (2017)^[1], esta buena capacidad predictiva se observa para PGA y para los pseudo espectros de aceleración para todo el rango de períodos estudiados. Sin embargo, esta buena capacidad predictiva está sujeta a una tendencia no conservadora del modelo para PGA y para el pseudo espectro hasta el período de 1 segundo. En el caso del modelo de Contreras Boroschek (2012)^[2], la buena capacidad predictiva se observa principalmente en el pseudo espectro de aceleración a partir de un período de 2 segundos. Este rango coincide con el rango conservador del modelo, donde presenta medias negativas y por ende una tendencia a sobrestimar lo observado.

6.2. Análisis según Mecanismo en las distintas Zonas de Sismotectónicas

En primera instancia se han clasificado los eventos de la base de datos en 8 Zonas sismotectónicas, según lo propuesto en la Memoria de Ignacio Núñez (2014)^[14], basado en el estudio de Davor Susa (2004)^[15]. A continuación, para cada Zona se han distinguido los registros asociados a eventos interplaca y los registros asociados a eventos intraplaca.

Los resultados muestran que el origen de la base de datos a partir de la cuál se ha desarrollado cada modelo juega un papel fundamental en su capacidad predictiva. Los modelos de Montalva et al. (2017)^[1] y Contreras Boroschek (2012)^[2], desarrollados específicamente para el caso chileno, con una base de datos local muestran una buena capacidad predictiva en todas las zonas, lo cual se confirma con los parámetros LH y LLH. Según el parámetro LH, ambos modelos se clasifican en categorías superiores a categoría D, es decir, en ninguna Zona Sismotectónica presentan una capacidad predictiva inaceptable.

En cambio, los modelos desarrollados a partir de data global sí han presentado una inaceptable capacidad predictiva para determinados casos. Tal es el caso del modelo de Abrahamson et al. (2016)^[3] en Zona 8, esta condición se produce debido a que la base de datos a partir de la cual se ha desarrollado el modelo no considera eventos ocurridos en la Zona sur de Chile. En la base de datos recopilada para el presente evento, los registros de Zona 8 están asociados principalmente al Terremoto de Melinka 2018 Mw 7.6, sin embargo, estos registros no se han incluido para el desarrollo del modelo de Abrahamson et al. (2016)^[3]. El otro caso donde se observa una inaceptable capacidad predictiva es para el modelo de Zhao et al. (2016)^[4] en Zona 7, principalmente para el pseudo espectro de aceleración en los períodos menores a 0.5 segundos. En este caso se tiene que en Zona 7 predominan registros asociados al Terremoto del Maule 2010 y a sitios con suelo tipo C o D. Es probable que el modelo presente algún error en los coeficientes para este tipo de suelos en los períodos menores a 0.5 segundos. Para el resto de los casos, el modelo de de Zhao et al. (2016)^[4] a pesar de ser el más conservador, presenta un buen ajuste y altos valores de LH, esto se explica en función de la gran instrumentalización presente en Japón y a que se hayan excluido de su base de datos aquellos registros de sitios cuya clasificación haya sido inferida.

Otro aspecto a destacar es que las zonas que presentan un mejor ajuste para el análisis residual y los valores de LH más altos son aquellas zonas donde se tiene un mayor número de registros. Tal es el caso de la Zona 2, donde se concentran gran parte de los registros asociados al Terremoto de Tocopilla 2007 Mw 7.7 y el Terremoto de Iquique Mw 8.2, la Zona 5, donde se concentran los registros asociados al Terremoto de Illapel 2015 Mw 8.4 y la Zona 7 donde se concentran los registros asociados al Terremoto del Maule 2010 Mw 8.8. En este contexto, se destaca la gran capacidad predictiva del modelo de Montalva et al. (2017)^[1] para Zona 7 y Zona 1. Cabe recordar que los registros asociados al Terremoto del Maule 2010 constituyen parte importante de la base de datos a partir de la cual se ha desarrollado este modelo. Esto permite explicar el buen ajuste del modelo y la buena capacidad predictiva en la Zona.

La distribución del residuo total normalizado para el modelo de Montalva et al. (2017)^[1], en función de profundidad focal, magnitud, latitud y fecha en las distintas Zonas Sismotectónicas, permite concluir que el modelo presenta una tendencia no conservadora para PGA

y los pseudo espectros en los períodos menores, donde predominan valores de Z_t positivos. Sin embargo, esta tendencia cambia a partir del período de 1 segundo, donde predominan valores de Z_t negativos, lo cual indica una tendencia conservadora del modelo para este rango.

Por último, la distribución del residuo total normalizado Z_t en función de la profundidad focal confirma que se tiene un número reducido de eventos cuyas profundidades son menores a 15 km, principalmente en las Zonas 2, 4, 5, 7 y que por ende puedan corresponder a sismos corticales. Esto que indica que a pesar de haber sido considerados como eventos interplaca en la base de datos, su cantidad no es suficiente para modificar la tendencia en los valores de los ajustes, además sus valores de Z_t según se puede observar en las Figuras 5.50, 5.52, 5.53 y 5.55 son cercanos a cero, por lo tanto no debiesen incidir notablemente en las medias μ de los análisis residuales.

6.3. Comparación con el estudio de Herrera et al. (2020)

La comparación con el estudio de Herrera et al. (2020)^[16] para los modelos de Montalva et al. (2017)^[1] y Abrahamson et al. (2016)^[3], permite concluir que efectivamente el primero de ellos es el que presenta en general la mejor capacidad predictiva. Se confirma además la tendencia no conservadora que presenta el modelo de Abrahamson et al. (2016)^[3], así como también la baja capacidad predictiva en la Zona Sur, desde donde se tiene una cantidad reducida de registros, los cuales no se han incluido para el desarrollo de los modelos.

En el estudio de Herrera et al. (2020)^[16] se observa que en la Zona Norte para períodos cortos el mejor ajuste lo presenta el modelo de Abrahamson et al. (2016)^[3] y que para períodos largos el mejor ajuste lo presenta el modelo de Montalva et al. (2017)^[1]. Sin embargo, los resultados del presente trabajo tanto para las Zonas Sismotectónicas en el Norte como para el resto de las Zonas y para el caso general muestran que el modelo de Montalva et al. (2017)^[1] presenta un mejor ajuste tanto para períodos cortos como para períodos largos.

En general se observa que los resultados del presente estudio muestran un corrimiento de los ajustes hacia la derecha en relación a los resultados del estudio de Herrera et al. (2020)^[16]. Los mayores valores de las medias μ , pueden indicar que los modelos presentan un mayor comportamiento no conservador en relación a lo observado en Herrera et al. (2020)^[16]. La razón por la cual no se han podido replicar los resultados de Herrera et al. (2020)^[16] para el ajuste de los histogramas, radica principalmente en el hecho de que la base de datos recopilada para ambos estudios es distinta. Para la base de datos de Herrera et al. (2020)^[16] se han considerado únicamente eventos del tipo interplaca hasta profundidades de 70 km, mientras que para la base de datos del presente estudio se han considerado registros de eventos interplaca e intraplaca, teniendo un gran número de registros de eventos a profundidades mayores a 70 km e incluso mayores a 100 km. Además, se ha añadido la restricción de considerar únicamente registros con PGA mayor o igual a 0.01 [g].

Los resultados para la distribución de Z_t en función de la profundidad focal para el modelo de Montalva et al. (2017)^[1] en las Figuras 5.49, 5.50, 5.51, 5.52, 5.53, 5.54, 5.55, 5.56 indican que los eventos de profundidad mayor a 70 km presentan, en mayor medida, valores de Z_t positivos. Esta tendencia es notoria principalmente en las Zonas 1, 2 y 3 y podría explicar por qué se observa un corrimiento hacia la derecha de los ajustes en relación a los resultados

de Herrera et al. (2020)^[16] donde no se han considerado eventos de profundidades mayores a 70 km. Además, se observan registros en la base de datos de Herrera et al. (2020)^[16] con tendencia a mostrar valores de Z_t negativos en profundidades menores a 70 km. Esta nube de registros con Z_t negativos no se observa en la distribución de Z_t del presente trabajo para Zona 3, debido a la restricción de considerar registros con PGA mayores a 0.01 [g]. Esto indica que en definitiva, la base de datos de Herrera et al. (2020)^[16] es distinta a la recopilada para el presente estudio, por lo tanto, si bien se confirma el buen ajuste del Modelo de Montalva et al. (2017)^[1], no permite replicar con exactitud los valores de las medias en el ajuste para el análisis residual de Herrera et al. (2020)^[16]. Por último, para el presente trabajo se está aplicando la versión estándar para el modelo de Montalva et al. (2017)^[1], mientras que en el estudio de Herrera et al. (2020)^[16] no se señala si se está aplicando la versión estándar o la versión *HQ*. La versión *HQ* ha sido desarrollada únicamente a partir de registros y estaciones bien documentados y por ende puede presentar un mejor ajuste que su versión estándar.

6.4. Análisis según Tipo de Suelo, DS61

Se han clasificado los registros de la base de datos en 4 tipos de suelo en función del Vs30 correspondiente a cada estación y de acuerdo al Decreto Supremo DS61. El resultado de esta clasificación indica que el tipo de suelo predominante en la base de datos corresponde al suelo Tipo B, seguido de suelo Tipo C, suelo Tipo A y por último suelo Tipo D.

En análisis residual muestra que las medias μ más cercanas a cero corresponden al Modelo de Montalva et al. (2017)^[1], lo cual coincide con el hecho de que es el modelo que presenta los mayores valores de LH y por ende una mejor capacidad predictiva. Sin embargo, se observan medias positivas para el ajuste de PGA y el pseudo espectro de aceleración en los primeros períodos, lo que indica que el modelo puede ser no conservador en ese rango.

El modelo de Abrahamson et al. (2016)^[3], es el que presenta el mayor corrimiento hacia la derecha en el ajuste, lo cual indica que es el modelo de mayor tendencia no conservadora. Esto coincide con el hecho de que es el modelo que presenta el menor valor de LH en los cuatros tipos de suelo, sin embargo, en ningún caso alcanza la categoría D correspondiente a una inaceptable capacidad predictiva.

El suelo Tipo C es el que presenta los mayores valores para LH, se entiende por lo tanto que la capacidad predictiva de los modelos puede ser mejor en sitios con suelo Tipo C. La razón de esta buena capacidad predictiva es que se tiene un buen número de registros asociados a este Tipo de Suelo. Para el caso del modelo de Contreras Boroscchek (2012)^[2] se observa el mayor valor de LH para el pseudo espectro en el período de 3 segundos. Esto coincide con un comportamiento conservador que presenta el modelo para suelos Tipo C, donde se observan valores negativos para la media en el ajuste. A pesar de que este modelo solo distingue suelo y roca, presenta una capacidad predictiva intermedia, esto se debe a que gran parte de los registros del Terremoto del Maule 2010 están asociados a sitios de suelo Tipo C o D, y este evento constituye parte importante de la base de datos a partir de la cual se ha desarrollado este modelo. Para el caso del modelo de Zhao et al. (2016)^[4] se confirma lo señalado para la Zona 7, con respecto a que el modelo presenta un decaimiento de su capacidad predictiva para períodos de 0.05 segundos en registros asociados a suelos Tipo C. Esta tendencia se observa tanto en los gráficos de LH y LLH para Suelo Tipo C como en los graficos de LH y

LLH para Zona 7 donde justamente predominan registros en suelos Tipo C.

Los resultados confirman nuevamente que los modelos desarrollados a partir de una base de datos local presentan un mejor ajuste y capacidad predictiva. Sin embargo, se observa que en suelo Tipo A y Tipo B, el modelo de Zhao et al. (2016)^[4], desarrollado a partir de una base de datos global, presenta una buena capacidad predictiva. La particularidad del modelo de Zhao et al. (2016)^[4], es que es el único de los modelos estudiados que considera como parámetro de entrada directamente el Tipo de Suelo para el sitio, a diferencia de los demás modelos que consideran como parámetro de entrada el valor del Vs30. Esta consideración permite que el modelo presente un buen ajuste a pesar de ser el más conservador.

6.5. Análisis según Zona Sísmica NCH 433

Se han clasificado los registros de la base de datos en tres Zonas Sísmicas, de acuerdo a lo indicado en la Norma NCH 433. El resultado de esta clasificación indica que la mayor cantidad de registros se tienen en Zona Sísmica 3, seguido de Zona Sísmica 2 y por última Zona Sísmica 1 con tan solo 41 registros. Las normas de diseño en Chile presentan coeficientes más restrictivos para Zona Sísmica 3, pues representa la Zona de mayores sollicitaciones sísmicas.

El análisis residual muestra un ajuste con una alta dispersión en Zona Sísmica 1, esto se debe principalmente a la poca cantidad de registros en esta zona. La media más cercana a cero la presenta y modelo de Montalva et al. (2017)^[1], sin embargo sus predicciones pueden ser no conservadoras. Los modelos de Contreras Boroschek (2012)^[2] y Zhao et al. (2016)^[4] presentan en cambio, una tendencia conservadora con medias negativas. En cuanto a los valores de LH, se observa que nuevamente el modelo de Montalva et al. (2017)^[1] es el que presenta la mejor capacidad predictiva. El modelo de Contreras Boroschek (2012)^[2] por ser desarrollado a partir de data local, también presenta una buena capacidad predictiva alcanzando una categoría B para el período de 1 segundo. Esta situación también se observa para el modelo de Zhao et al. (2016)^[4], siendo este último mucho más conservador. El modelo de Abrahamson et al. (2016)^[3] desarrollado a partir de data global es el que presenta las mayores medias en el ajusta y la peor capacidad predictiva en función de LH, esto sucede porque probablemente no se han considerado registros de Zona Sísmica 1 para el desarrollo del modelo.

En Zona Sísmica 3 y Zona Sísmica 2 se observa el mejor ajuste y los valores de LH más altos, esto permite concluir que en la medida que se tenga una buena cantidad de registros locales a la hora de desarrollar modelos de movimiento fuerte, luego sus estimaciones serán más confiables, de forma tal que podrán presentar una mejor capacidad predictiva.

Para estas zonas, nuevamente se observa que los modelos desarrollados a partir de una base de datos local presentan la mejor capacidad predictiva, sin embargo, el modelo de Zhao et al. (2016)^[4] también puede presentar una alternativa válida a partir de estimaciones más conservadoras. Por último, se concluye que en general las predicciones de los modelos tienden a subestimar lo observado para PGA y los pseudo espectros de los períodos menores hasta 1 segundo, luego, a partir de períodos mayores se observa una tendencia más conservadora, con medias negativas para el ajuste residual, lo que indica que en este rango las predicciones de los modelos sobrestiman lo observado.

Por último, se concluye que en general las predicciones de los modelos tienden a subestimar lo observado para PGA y los pseudo espectros de los períodos menores, hasta períodos de 1 segundo, luego, a partir de períodos mayores se observa una tendencia más conservadora, con medias negativas para el ajuste residual, lo que indica que en este rango las predicciones de los modelos sobrestiman lo observado.

6.6. Consideraciones para próximos trabajos

De cara a futuros trabajos orientados a estudiar la validez de modelos de movimiento fuerte para el caso chileno se propone considerar nuevas zonificaciones para segmentar la base de datos. Se ha observado que la zonificación propuesta por Nuñez (2014)^[14] permite obtener un número homogéneo de registros de eventos interplaca e intraplaca, sin embargo, en ciertas zonas la cantidad de registros es bastante menor, lo que implica que el ajuste para el análisis residual pierda contundencia en dicha zona. Una buena alternativa podría ser considerar un punto medio entre la zonificación propuesta en Herrera et al. (2020)^[16] y la zonificación de Nuñez (2014)^[14], de forma tal de poder obtener una cantidad homogénea de registros interplaca e intraplaca en cada zona y además, que la cantidad de registros para cada zona sea suficiente para desarrollar un buen análisis residual.

La distribución de los valores de Z_t , en función de profundidad, magnitud y otros parámetros ha mostrado que al comparar los resultados entre el estudio de Herrera et al. (2020)^[16] y los resultados para el presente trabajo, no ha sido posible replicar con exactitud los valores de las medias μ para el análisis residual. Esto indica que el análisis es sensible a las condiciones de la base de datos, puesto que al agregar sismos de profundidades mayores a 70 km se ha observado una tendencia a mostrar valores de Z_t positivos, desplazando el ajuste hacia un comportamiento no conservador. Es por esto que, con la finalidad de determinar de mejor manera cómo afectan estos parámetros al ajuste de los modelos, se propone para futuros trabajos considerar además de la segmentación desarrollada en el presente estudio, desarrollar una segmentación de la base de datos y de los valores de Z_t según profundidad, rango de magnitudes y rangos de PGA.

Por último, también se propone poder incluir el cálculo de los residuos Z_b (*between-event*) y Z_w (*within-event*), de forma tal de poder replicar el comportamiento descrito por Herrera et al. (2020)^[16] sobre que el residuo total normalizado Z_t está determinado en mayor medida en función de Z_b , es decir, viene del modelamiento de la fuente sísmica y sus parámetros, y está determinado en menor medida en función de Z_w que viene del modelamiento del suelo, efectos de sitio y trayectoria, donde el valor de Z_t se centra torno a 0. Este cálculo podría realizarse en aquellos modelos como el Montalva et al. (2017)^[1] o el de Abrahamson et al. (2016)^[3] donde se entrega la desviación total σ_t y además, la desviación (*between-event*) σ_b y la desviación (*within-event*) σ_w .

6.7. Comentarios

El presente estudio ha permitido estimar la confiabilidad de distintos modelos de movimiento fuerte para el caso chileno. Se han considerado modelos desarrollados a partir de una base de datos global como los de Abrahamson et al. (2016)^[3] y Zhao et al. (2016)^[4], y también se han considerado modelos desarrollados a partir de una base de datos local y específicamente para el caso chileno como Montalva et al. (2017)^[1] y Contreras Boroschek (2012)^[2]. El estudio ha permitido concluir que los modelos desarrollados con una data local se ajustan mejor a la realidad chilena y presentan una mejor capacidad predictiva a lo largo del país. Sin embargo, en el contexto de desarrollo de estudios de peligro sísmico es importante complementar las estimaciones de distintos modelos. Por ejemplo, se ha observado que el modelo de Montalva et al. (2017)^[1] presenta la mejor capacidad predictiva, sin embargo, puede ser no conservador para ciertos casos. En este contexto una buena práctica profesional sería complementar y ponderar los resultados de este modelo con el de Zhao et al. (2016)^[4] por ejemplo, que presenta una tendencia más conservadora.

Por otro lado, se ha observado que el análisis residual puede ser sensible a la base de datos que se considere para estimar la validez de los modelos. Esto queda en evidencia al comparar los resultados del presente estudio con los resultados del artículo desarrollado por Herrera et al. (2020)^[6]. A partir de la comparación se han confirmado ciertas observaciones, como que en general el modelo de Montalva et al. (2017)^[1] puede presentar una mejor capacidad predictiva a lo largo del país, sin embargo, otras observaciones pueden indicar una tendencia conservadora o no conservadora para este modelo en ciertas zonas, dependiendo de la base de datos que sea aplicada. Lo anterior permite señalar que en la medida que haya un mayor número de registros de aceleraciones para sismos en Chile, junto con una basta red de acelerógrafos y estaciones bien caracterizadas a lo largo del país, será posible gestionar en un futuro una base de datos más completa y consistente. De esta forma se espera reducir la sensibilidad al evaluar la validez de modelos de movimiento fuerte para Chile así como también permitir el desarrollo de nuevos modelos, lo cual constituye una tarea dinámica que deber ser actualizada en la medida que nuevos eventos importantes tengan lugar en el Chile.

Bibliografía

- [1] Montalva, G. A., Bastías, N., Rodríguez-Marek, A. (2017). Ground-motion prediction equation for the Chilean subduction zone, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **107**, no. 2, 901–911, doi: [10.1785/0120160221](https://doi.org/10.1785/0120160221).
- [2] Contreras, V., R. Boroschek, R. (2012). Strong ground motion attenuation relations for Chilean subduction zone interface earthquakes, *15th World Conf. on Earthquake Engineering*, Lisbon, Portugal, 24–28 September 2012.
- [3] Abrahamson, N., N. Gregor, and K. Addo (2016). BC Hydro ground motion prediction equations for subduction earthquakes, *Earthq. Spectra* **32**, no. 1, 23–44, doi: [10.1193/051712EQS188MR](https://doi.org/10.1193/051712EQS188MR).
- [4] Zhao, J., Jiang, F., Shi, P., Xing, H., Huang, H., Hou, R., Zhang, Y., Yu, P., Lan, X., Rhoades, D. A., Somerville, P., Irikura, K., Fukushima, Y. (2016). Ground-Motion Prediction Equations for Subduction Slab Earthquakes in Japan Using Site Class and Simple Geometric Attenuation Functions, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **107**, doi: [10.1785/0120150056](https://doi.org/10.1785/0120150056)
- [5] Mazzoni S., Kishida T., Ahdi S.K., Contreras V., Darragh R.B., Chiou B.S.-J., Kuehn N., Bozorgnia Y., Stewart J.P. (2020). Chapter 2: Relational Database, in *Data Resources for NGA-Subduction Project*, *PEER Report No. 2020/02*, J.P. Stewart (editor), Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California (headquarters).
[PEER-Report202002-NGASub](#)
- [6] Centro Sismológico Nacional, Registros de movimiento fuerte. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.
<http://evtdb.csn.uchile.cl/>
- [7] Scherbaum, F., F. Cotton, and P. Smit (2004). On the use of response spectral-reference data for the selection and ranking of ground-motion models for seismic-hazard analysis in regions of moderate seismicity: The case of rock motion, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **94**, no. 6, 2164–2185, doi: [10.1785/0120030147](https://doi.org/10.1785/0120030147).
- [8] Scherbaum, F., E. Delavaud, and C. Riggelsen (2009). Model selection in seismic hazard analysis: An information-theoretic perspective, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **99**, no. 6, 3234–3247, doi: [10.1785/0120080347](https://doi.org/10.1785/0120080347).
- [9] Centro Sismológico Nacional. (1 de Junio de 2014). *Sismicidad y Terremotos en Chile*, [001_terremotos_y_sismicidad](#)
- [10] Centro Sismológico Nacional. (25 de Abril de 2016). *Tipos de Sismos en Chile*, <https://www.csn.uchile.cl/tipos-de-sismos-chile/>

- [11] Idini, B., Rojas, F., Ruiz, S. et al. Ground motion prediction equations for the Chilean subduction zone. *Bull Earthquake Eng* 15, 1853–1880 (2017).
doi: [10.1007/s10518-016-0050-1](https://doi.org/10.1007/s10518-016-0050-1)
- [12] Medina M. (1998): Análisis comparativo de métodos de regresión de atenuación de aceleración máxima. Memoria de Título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil.
- [13] Ruiz S. (2002): Fórmulas de atenuación para la subducción de Chile considerando los dos mecanismos principales de sismogénesis y los efectos del suelo y las asperezas. Memoria de Título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil.
- [14] Nuñez, I. 2014. Nuevo Peligro Sísmico para Chile. Memoria de Título, Universidad de Chile, Departamento Ingeniería Civil.
- [15] SUSA, D. 2004. Estimación del Peligro Sísmico Asociado a sismos del tipo interplaca en Chile y Sur del Perú utilizando distribución bi-paramétrica de Weibull. Memoria de Título, Universidad de Chile, Departamento Ingeniería Civil.
- [16] Herrera, C., Cassidy, J.F., Dosso, S.E., Bastías, N., Onur, T. (2020). Ground-motion evaluation of moderate and large interface earthquakes along the Chilean subduction zone, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **110**, 2693–2710, doi: [10.1785/0120190265](https://doi.org/10.1785/0120190265)
- [17] Poulous, A., Monsalve, M., Zamora, N., de la Llera, J. C. (2018). An Updated Recurrence Model for Chilean Subduction Seismicity and Statistical Validation of Its Poisson Nature. *Bulletin of the Seismological Society of America* 2018;; 109 (1): 66–74. doi: [10.1785/0120170160](https://doi.org/10.1785/0120170160)
- [18] Leyton, F., Leopold, A., Pastén, C., Ruiz, S., Montalva, G., Saéz, E. (2018). Geophysical characterization of the Chilean seismological stations: first results, *Seismological Research Letters Volume 89, Number 2A March/April 2018*, doi: [10.1785/0220170156](https://doi.org/10.1785/0220170156)
- [19] Castro, S., Benavente, R., Crempien, J., Candia, G., de la Llera, J.C. (2021). A Consistently Processed Strong Motion Database for Chilean Earthquakes. Submitted. The strong motion database was provided by the SIBER-RISK project: Simulation Based Earthquake Risk and Resilience of Interdependent Systems and Networks ANID/FONDECYT/1170836.
doi: https://doi.org/10.7764/datasetUC/ING-UC.1170836_1
- [20] Midorikawa, S., Yamanaka, H., Chimoto, K., Riddell, R., Miura, H., Saguchi, K. (2014). Evaluation of Site Effects on Strong-Motion Records in Concepcion during the 2010 Maule, Chile, Earthquake, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **104**, 2503-2511, doi: [10.1785/0120130249](https://doi.org/10.1785/0120130249).
- [21] Boroschek, R., Yañez, F., Bejarano, I., Molnar, S., Torres, A. (2012). Resumen Caracterización Geotécnica Estaciones de Acelerógrafos de la Universidad de Chile.
- [22] Centro Sismológico Nacional, Clasificación Empírica, Estación GO04 Observatorio Tololo, Vicuña. <http://evtdb.csn.uchile.cl/station/GO04>