

Evaluación de errores de datos sismológicos y sus efectos sobre los
parámetros y modelos derivados de éstos para una región determinada
cubierta por la red del Observatorio Sismológico del SurOccidente - OSSO

Beatriz Elena Vera Lizcano

Universidad del Valle
Facultad de Ingenierías
Escuela de Ingeniería Industrial y Estadística
Santiago de Cali
2003

Evaluación de errores de datos sismológicos y sus efectos sobre los
parámetros y modelos derivados de éstos para una región determinada
cubierta por la red del Observatorio Sismológico del SurOccidente - OSSO

Beatriz Elena Vera Lizcano

Trabajo de grado presentado como requisito parcial
para optar al título de Estadística

Director: Prof. HANSJÜRGEN MEYER
MSc. Geofísica

Asesor: Prof. JORGE MEJÍA MEJÍA
PhD. Geofísica

Universidad del Valle
Facultad de Ingenierías
Escuela de Ingeniería Industrial y Estadística
Santiago de Cali
2003

Nota de Aceptación:

Prof. Hansjürgen Meyer
Director

Prof. Roberto Behar
Jurado

Santiago de Cali, 21 de mayo de 2003

AGRADECIMIENTOS

Al prof. Hansjürgen Meyer, por su apoyo, sugerencias e interpretaciones para el desarrollo de este proyecto.

Al prof. Jorge Mejía, por su interés en aportar al conocimiento y avance de todo el grupo OSSO; por su tiempo dedicado a la revisión, corrección y discusión de todo el trabajo y por sus aportes e ideas para mejorarlo.

A Juan Benjumea, por su apoyo bibliográfico; su disponibilidad para el avance, la enseñanza y especialmente para el aprendizaje.

Al grupo de procesamiento e instrumentación del OSSO, quienes hacen posible el recurso mas importante de cualquier proyecto: los datos.

A los ingenieros del área de sistemas del OSSO, John Caicedo y Leonardo Bustamante.

En general a todo el grupo OSSO, quienes de una u otra forma aportan en el avance de la institución y a la conservación del grupo como tal.

Al grupo de profesores de la Escuela de Ingeniería Industrial y Estadística, quienes aportan sus conocimientos de la mejor manera posible para que los estudiantes logren sus metas. Especialmente al profesor Roberto Behar, quien no sólo enseña estadística sino que contagia su entusiasmo por esta área.

CONTENIDO

Resumen	1
Introducción	2
1. Objetivos	5
1.1. Objetivos Generales	5
1.2. Objetivos Específicos	5
2. Sismología: conceptos, instrumentación y observación sismológica	6
2.1. Principios de sismología	6
2.1.1. Reseña Histórica	6
2.1.2. La investigación sismológica	6
2.1.3. Mecánica de la Fuente sísmica	8
2.1.4. Foco Sísmico	9
2.2. Instrumentación sismológica	11
2.2.1. Instrumentos	11
2.2.2. Reseña Histórica	12
2.3. Sismicidad Regional	13
2.3.1. Observación sismológica en Colombia	15
2.3.1.1. <i>Observatorio Sismológico del Sur Occidente - OSSO</i> . . .	16
3. Análisis y Modelos Estadísticos	19

3.1. Inferencia estadística	19
3.1.1. Sistemas y modelos	19
3.1.1.1. <i>Sistemas</i>	19
3.1.1.2. <i>Modelos</i>	20
3.1.1.3. <i>Relación entre sistemas y modelos</i>	21
3.1.2. Estimaciones y estimadores	22
3.1.2.1. <i>Estimadores</i>	23
3.1.2.2. <i>Métodos de estimación puntual</i>	23
3.1.2.3. <i>Métodos de estimación por intervalo</i>	25
3.1.3. Validación de modelos y evaluación de resultados	26
3.1.3.1. <i>Pruebas de validación del modelo</i>	26
3.1.3.2. <i>Pruebas de bondad de ajuste</i>	27
3.2. Simulación Estadística	28
3.2.1. Simulación Monte Carlo	30
3.2.2. Determinación del número de muestras	32
3.2.3. Generación de números aleatorios	34
3.2.3.1. <i>Generación de números aleatorios con distribución normal</i>	35
3.2.3.2. <i>generación de números aleatorios con Matlab</i>	36
3.2.4. Análisis estadístico de datos simulados	37
3.3. Optimización global y local	37
3.3.1. Optimización no restringida	38
3.3.1.1. <i>Métodos directos</i>	38

3.3.1.2.	<i>Métodos indirectos</i>	39
3.3.2.	Optimización restringida	40
3.4.	Clasificación de errores	41
3.4.1.	Errores aleatorios	42
3.4.2.	Errores sistemáticos	42
3.4.3.	Errores en la determinación hipocentral	43
4.	Localización hipocentral	44
4.1.	Determinación de parámetros hipocentrales y tiempo de origen	45
4.1.1.	Mono estación - polarización de la onda P	45
4.1.2.	Método de los círculos - S-P	46
4.1.3.	Otros métodos de estimación para el problema de localización	47
4.1.3.1.	<i>Estimación no lineal, mediante Mínimos Cuadrados</i>	48
4.1.3.2.	<i>Localización probabilística</i>	51
4.1.4.	Determinación conjunta de hipocentros	52
4.2.	Estimación de tiempos de viaje	52
4.3.	Factores que influyen en errores de localización	53
4.3.1.	Optimización de la red de observación	54
4.3.2.	Evaluación del modelo de velocidades	56
4.3.3.	Errores en las observaciones	57
5.	Metodología y Análisis de resultados	59
5.1.	Errores debidos a la configuración de red	59

5.1.1.	Definición del problema	59
5.1.2.	Datos iniciales	60
5.1.3.	Establecimiento del modelo de simulación	60
5.1.4.	Ejecución de la simulación	61
5.1.5.	Ejecuciones de prueba y validación del modelo	65
5.1.6.	Diseño del experimento de simulación	67
5.1.7.	Pasos para ejecución de la simulación	68
5.1.8.	Análisis de los resultados de la simulación	69
5.1.8.1.	Simulación Monte Carlo para la Red Regional	69
	Sismos teóricos ocurridos a 5 km de profundidad	69
	Sismos teóricos ocurridos a 30 y 60 km de profundidad	71
5.1.8.2.	Simulación Monte Carlo para la Red local	75
	Sismos teóricos ocurridos a 5 km de Profundidad	76
	Sismos teóricos ocurridos a 10 km de Profundidad	77
5.1.9.	Simulación Monte Carlo para la determinación de la mejor ubicación de una nueva estación	79
5.1.9.1.	Red local	80
5.2.	Análisis de errores debidos al modelo de velocidades	81
5.2.1.	Remuestreo Jackknife	81
5.2.1.1.	Resultados en cuanto a dispersión de los sismos	83
5.2.1.2.	<i>Sesgo por estación en cada uno de los parámetros</i>	90

Conclusiones

93

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1. Ejemplo de vibraciones producidas por fenómenos internos y externos y registradas instrumentalmente (la escala de tiempo para cada vibración es diferente).	7
2.2. Estructura interna de la Tierra y dos procesos asociados a ella: subducción y corrientes de convección	8
2.3. Esquematización de la teoría de rebote elástico	9
2.4. Esfuerzos que producen fallamiento	10
2.5. Foco sísmico	11
2.6. Sismómetro de 3 componentes (izquierda) y de 1 componente (derecha) . . .	12
2.7. Placas tectónicas	14
2.8. Cinturón circumpacífico	15
2.9. Red Sismológica del SurOccidente	16
2.10. Componentes de una red sismológica	18
3.1. Relación entre sistemas y modelos	21
3.2. Esquematización de una simulación mediante el método Monte Carlo	32
3.3. Números aleatorios distribuidos uniformemente en (0,1), generados con la función <i>rand</i> de <i>Matlab</i>	35
3.4. Números aleatorios con distribución normal con media 0 y desviación estándar 0.1, generados con la función <i>normrnd</i> de <i>Matlab</i>	36
3.5. Minimización de la función <i>Rosenbrock</i> . a. Mínimos cuadrados mediante Gauss–Newton, b. Levenberg–Marquardt, c. Pasos Descendentes, d. Método Simplex	40
4.1. Comparición entre polarización mediante el método de covarianza (rojo) y el método de descomposición del valor singular (verde)	45

4.2.	Sismograma de tres componentes	46
4.3.	Determinación de los parámetros hipocentrales mediante el método de los círculos	47
4.4.	Identificación de tiempos de arribo de las ondas P y S en diferentes estaciones	49
4.5.	Ejemplo de localización iterativa. Número de iteraciones 6	50
4.6.	Modelo PREM de velocidad para las ondas P y S en función de la profundidad	53
5.1.	Malla para simulación de sismos y distribución de las estaciones, Red local .	62
5.2.	Malla para simulación de sismos y distribución de las estaciones, Red Regional	63
5.3.	Prueba de normalidad. Superior: función de distribución acumulada para la muestra generada aleatoriamente. Inferior: gráfica de probabilidad normal . .	64
5.4.	Red teórica para ejecución de prueba. Los puntos azules corresponden a las estaciones sismológicas	65
5.5.	Distribución del error en longitud-latitud (izq.) y profundidad (derecha) para las diferentes configuraciones de una red hipotética	66
5.6.	Distribución del error en la determinación de tiempo de origen (izquierda) y profundidad (derecha) para sismos teóricos ocurridos a 5 km de profundidad.	70
5.7.	Distribución del error en la determinación de latitud-longitud (izquierda) y desviación estándar de este error (derecha) para sismos teóricos ocurridos a 5 km de profundidad.	71
5.8.	Distribución del error en la determinación de tiempo de origen (izquierda) y profundidad (derecha) para sismos teóricos ocurridos a 30 km de profundidad.	72
5.9.	Distribución del error en la determinación de tiempo de origen (izquierda) y profundidad (derecha) para sismos teóricos ocurridos a 60 km de profundidad.	73
5.10.	Distribución del error en la determinación de latitud-longitud (izquierda) y desviación estándar de este error (derecha), para sismos teóricos ocurridos a 30 km de profundidad	74

5.11. Distribución del error en la determinación de latitud-longitud (izquierda) y desviación estándar de este error (derecha) para sismos teóricos ocurridos a 60 km de profundidad.	75
5.12. Distribución del error en la determinación de tiempo de origen (arriba) y profundidad (abajo), para sismos teóricos a 5 km de profundidad	76
5.13. Distribución del error en la determinación de latitud-longitud (arriba) y desviación estándar (abajo), para sismos teóricos a 5 km de profundidad.	77
5.14. Distribución del error en la determinación de tiempo de origen (arriba) y profundidad (abajo), para sismos teóricos ocurridos a 10 km de profundidad. .	78
5.15. Distribución del error en la determinación de latitud-longitud (arriba), y desviación estándar (abajo), para sismos teóricos ocurridos a 10 km de profundidad.	79
5.16. Area para selección de sitios para instalación de nuevas estaciones (recuadro azul) y área de interés para monitoreo de actividad sísmica (líneas rojas) . . .	80
5.17. Evaluación de sitios para ubicación de nuevas estaciones, red local. Los valores mas altos corresponden a la mejor ubicación.	81
5.18. Ubicación espacial de los sismos, a. sin observaciones de la estación LMM, b. sin observaciones de la estación LGG	84
5.19. Ubicación espacial de los sismos, a. sin observaciones de la estación LBB, b. sin observaciones de la estación LDD	85
5.20. Ubicación espacial de los sismos, a. sin observaciones de la estación LFF, b. sin observaciones de la estación LCC	86
5.21. Ubicación espacial de los sismos, a. sin observaciones de la estación LMM, b. sin observaciones de la estación LGG	88
5.22. Ubicación espacial de los sismos, a. sin observaciones de la estación LBB, b. sin observaciones de la estación LDD	89
5.23. Ubicación espacial de los sismos, a. sin observaciones de la estación LFF, b. sin observaciones de la estación LCC	90
5.24. Intervalos de confianza para el sesgo por estación y para cada uno de los parámetros hipocentrales	92