

TESIS DEFENDIDA POR
Ricardo Guzmán Antonio Carpio
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ



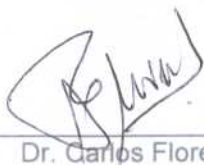
Dr. José Manuel Romo Jones

Co-Director del Comité



Dr. Enrique Gómez Treviño

Co-Director del Comité



Dr. Carlos Flores Luna

Miembro del Comité



Dr. Francisco Javier Esparza Hernández

Miembro del Comité



Dr. Jesús Arturo Martín Barajas

Miembro del Comité



Dr. Andrés Tejero Andrade

Miembro del Comité



Dr. Thomas Gunther Kretschmar Steinle

*Coordinador del programa de
posgrado en Ciencias de la Tierra*



Dr. David Hilario Covarrubias Rosales

Director de Estudios de Posgrado

30 de Enero de 2009

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR DE
ENSENADA**



**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS
EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**ANÁLISIS DE LA TRANSFORMACIÓN SERIE-PARALELO Y DESARROLLO
DE NUEVOS PROCESOS PARA LA INTERPRETACIÓN DE DATOS
MAGNETOTELÚRICOS**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
DOCTOR EN CIENCIAS

Presenta:

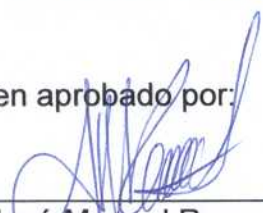
RICARDO GUZMÁN ANTONIO CARPIO

Ensenada, Baja California, México, Enero del 2009.


RESUMEN de la tesis de **Ricardo Guzmán Antonio Carpio**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de **DOCTOR EN CIENCIAS** en **Ciencias de la Tierra con orientación en Geofísica Aplicada**. Ensenada, Baja California. Enero de 2009.

**ANÁLISIS DE LA TRANSFORMACIÓN SERIE-PARALELO Y DESARROLLO
DE NUEVOS PROCESOS PARA LA INTERPRETACIÓN DE DATOS
MAGNETOTELÚRICOS**

Resumen aprobado por:



Dr. José Manuel Romo Jones
Co-Director de Tesis



Dr. Enrique Gómez Treviño
Co-Director de Tesis

En el método magnetotelúrico la función de respuesta del subsuelo es un tensor de segundo rango. Los cuatro elementos de este tensor son cantidades complejas que contienen la información de la resistividad y de la geometría del medio. La transformación serie-paralelo (s-p), transforma el tensor original en dos impedancias y dos funciones angulares. Las impedancias s-p son una especie de promedios particulares de los elementos del tensor original. Una propiedad de esta clase de promedios es que cuando se aplican de manera recursiva el resultado converge a una sola impedancia, la cual coincide con el determinante del tensor original. En esta tesis estudiamos esta convergencia y exploramos su utilidad para la construcción de modelos de la resistividad del subsuelo. Los experimentos realizados muestran que basta con un par de promedios para obtener curvas muy cercanas al determinante, de manera que los modelos resultantes no son muy diferentes de los obtenidos con el determinante.

Por otra parte, utilizando modelos sintéticos simples, se analizaron las funciones de sensibilidad para las impedancias tradicionales TE y TM, así como para las impedancias s-p, para los promedios sucesivos s-p y para el determinante del tensor. En general, en comparación con los modos TE y TM, las respuestas invariantes s-p y determinante son menos sensibles a efectos laterales lejanos y más sensibles a lo que se tiene debajo del sitio de medida. En lo que respecta a los promedios recursivos s-p, su respuesta y sensibilidad no es significativamente diferente de la del determinante.

La habilidad de las distintas respuestas para recuperar la resistividad del subsuelo se investigó utilizando la inversión 2-D de perfiles construidos con datos producidos por un modelo sintético en 3-D. La inversión conjunta s-p recupera el

modelo de buena forma, con resultados muy parecidos a la inversión conjunta de los modos TE-TM. El determinante del tensor es el que menos recupera el modelo. Los promedios s-p presentan resultados intermedios entre las impedancias s-p originales y el determinante.

Adicionalmente, se utilizaron dos conjuntos de datos reales, el primero de ellos consistente en un perfil a lo largo de la parte sur del Valle de Ojos Negros, al Este de la ciudad de Ensenada, el segundo es un perfil en British Columbia, al suroeste de Canadá, el cual se ha utilizado en la literatura para probar nuevas metodologías. El perfil en Ojos Negros atraviesa las principales fallas activas de la región y fue modelado utilizando respuestas serie-paralelo, así como los modos tradicionales TE-TM. El modelo de resistividad obtenido muestra una zona conductora por debajo del Valle de Ojos Negros, con su cima a 10 km y profundizando hacia el Este hasta alcanzar los 25 km aproximadamente. La actividad sísmica ocurre en una zona de resistividad intermedia (30 a 300 ohm-m) bordeando la anomalía conductora. Esta anomalía conductora la asociamos principalmente a rocas meta-sedimentarias pre-batolíticas. En cuanto a los modelos obtenidos para el perfil de British Columbia, podemos decir que contienen anomalías comparables con las reportadas por otros autores. Las principales son una anomalía resistiva asociada al batolito Nelson, así como la presencia de una falla que se muestra como un contraste conductor-resistivo.

Palabras Clave: Magnetoteluria, serie-paralelo, promedios, sensibilidad.

ABSTRACT of the thesis presented by **Ricardo Guzmán Antonio Carpio** as a partial requirement to obtain the **DOCTOR OF SCIENCE** degree in **Earth Science**, with orientation in **Applied Geophysics**. Ensenada, Baja California, México. January, 2009.

ANALYSIS OF THE SERIES AND PARALLEL TRANSFORMATION, AND DEVELOPMENT OF NEW PROCESSES FOR THE INTERPRETATION OF MAGNETOTELLURIC DATA

The response function in magnetotellurics is a rank two tensor. The four elements of the impedance tensor are complex quantities that contain the information about subsurface resistivity and geometry. The series-parallel transformation (s-p), transform the original tensor into two impedances and two angular functions. The s-p impedances are a particular kind of averages of the original tensor elements. A particular property of these averages is that if applied recursively they converge to a value which is the determinant of the tensor. In this thesis I explore the usefulness of this feature to construct subsurface resistivity models. The experiments conducted show that a couple of recursions are enough to reach curves close to the determinant. Thus, the resulting models are not significantly distinct from those obtained using the determinant.

The sensitivity functions of conventional TE-TM modes and that of invariant responses as s-p, recursive s-p and determinant impedances, was analyzed using simple synthetic models. In comparison with the TE-TM modes, the invariant responses are less sensitive to distant lateral effects and more sensitive to local effects beneath the observation site. The sensitivity of recursive s-p averages is not significantly different from that of the determinant.

The capability of different response functions to recover a given subsurface resistivity model was investigated using 2-D inversion of profiles produced with a synthetic 3-D model. The s-p inversion and the TE-TM inversion produce similar results; both recover the model reasonably well. The determinant response produces the worst results, while the recursive s-p responses produce results of intermediate quality between those from s-p and determinant.

In addition, two field data sets were analyzed: one of them consists of a profile along the Ojos Negros Valley, located to the east of Ensenada, and the other a profile in British Columbia, southwestern Canada, which has been used in the literature to test new processing techniques. The Ojos Negros profile runs across the main active faults in the region. It was modeled using both the s-p response functions as well as the traditional TE-TM modes. The resultant resistivity model shows a conductive zone beneath Ojos Negros valley, its top is 10-km deep and is dipping eastward to about 25 km deep. Seismic activity is concentrated in an

intermediate resistivity zone (30 to 300 ohm-m) surrounding the conductive anomaly. This anomaly is associated to pre-batholithic meta-sedimentary rocks. Regarding the British Columbia profile, it can be stated that the models obtained with the invariant responses are comparable with those obtained by others in the past using the conventional TE-TM modes. The main anomaly is a resistive zone associated with Nelson batholit, and a regional fault shown as a conductive-resistive contrast.

KEY WORDS: Magnetotelluric, serie-paralel, average, sensibility

DEDICATORIAS

A mi maravilloso hijo

EMILIO

A mi esposa.

Selene

“Gracias por alentarme y apoyarme a seguir adelante para terminar este compromiso”

A mis padres por todo su apoyo, han sido para mí un ejemplo de trabajo:

Sra. Eufemia Carpio Chávez
Sr. Rubén Antonio Salvador

A mi abuelita:

Juanita

A mis sobrinas y sobrino:

Yohali, Erandí, Noelia, Alix y Jose Luis Jr.

“Y a toda mi familia de Zimapán Hgo. y Guaymas Son. por su gran apoyo”

AGRADECIMIENTOS

Un profundo agradecimiento y gran respeto a mis directores de tesis:

Dr. José Manuel Romo Jones

Dr. Enrique Gómez Treviño

Por todo sus enseñanzas, tiempo, dedicación y paciencia hacia mí.

Mi agradecimiento y respeto a mis sinodales:

Dr. Carlos Flores Luna

Dr. Francisco J. Esparza Hernández

Dr. Arturo Martín Barajas

Especial agradecimiento a mi sinodal externo:

Dr. Andrés Tejero Andrade

A todos ellos por sus observaciones y comentarios a este trabajo.

Agradecimiento a todo el personal del departamento de Geofísica Aplicada que me aceptaron y compartieron sus conocimientos y amistad conmigo, desde mi llegada a CICESE.

Agradecimiento a todos mis compañeros contemporáneos del CICESE: *Juan Carlos, Isaac, Martín Pacheco, Almendra, Adriana Miranda, Alejandro y Gema, Víctor y Juliana, Mathías, Uriel.* Por su gran amistad.

Sincero agradecimiento a las secretarías del departamento de Geofísica: *Bárbara y Lupita* por su valioso apoyo.

Agradecimiento al personal técnico de Geofísica Aplicada: *Jaime, Daniel, y Alejandro*, por su ayuda en las diversas campañas de campo, que sin importar las incomodidades presentes siempre estuvieron dispuestos a seguir, y por su gran dedicación.

Un sincero agradecimiento y respeto a mis amigos y colegas externos en especial al *Ing. David Camargo Guzmán* y a todos sus pupilos de EPYESA, al Ing. Andrés Benton Cuellar, Ing. José Luis Vázquez, de BENTON y Asociados. Al Ing. Rafael Hernández de Investigaciones Geofísicas de México. A los Oceanólogos Roberto Quero y Carlos Peynador, de LORAX Consultores.

Agradecimiento a *CICESE* y al *CONACYT* por otorgarme los medios económicos y materiales hasta el término de esta tesis.

CONTENIDO

RESUMEN EN ESPAÑOL	i
RESUMEN EN INGLÉS	iii
DEDICATORIAS	v
AGRADECIMIENTOS	vi
CONTENIDO	viii
LISTA DE FIGURAS	x
I INTRODUCCIÓN	1
I.1 Fundamentos teóricos del método magnetotelúrico	1
I.2 Las impedancias serie y paralelo	4
I.3 Interpretación de las impedancias serie y paralelo	6
I.4 Motivación	8
I.5 Objetivos	9
II METODOLOGÍA DESARROLLADA	10
II.1 Aplicación recursiva de la equivalencia SP	10
II.2 Estimación de incertidumbres	17
II.2.1 Propagación de errores en las impedancias S-P	17
II.2.2 Propagación de errores en el cálculo de la resistividad y fase	19
II.2.3 Propagación de errores en los promedios	21
II.2.4 Propagación de errores en el determinante	22
III RESPUESTA Y SENSIBILIDAD DE MODELOS SIMPLES.....	24
III.1 Funciones de sensibilidad en un medio homogéneo.....	25
III.1.1 Sensibilidad TE-TM	25
III.1.2 Sensibilidad S-P y determinante	26
III.2 Modelo contacto vertical.....	29
III.2.1 Respuesta TE-TM	30
III.2.2 Matriz de sensibilidad TE-TM.....	32
III.2.3 Respuestas S-P y determinante.....	35
III.2.4 Matriz de sensibilidad S-P y determinante.....	38
III.2.5 Respuesta de los promedios S-P.....	42
III.2.6 Matriz de sensibilidad promedios S-P	44
III.2.7 Conclusiones para el modelo de un contacto lateral conductor-resistivo	49
III.3 Modelo conductor horizontal	50
III.3.1 Respuesta TE-TM	51
III.3.2 Matriz de sensibilidad TE-TM.....	52
III.3.3 Respuesta S-P y determinante	55
III.3.4 Matriz de sensibilidad S-P y determinante.....	57
III.3.5 Respuesta promedios S-P	60
III.3.6 Matriz de sensibilidad promedios S-P	61
III.3.7 Conclusiones para el modelo de un cuerpo conductor horizontal	66
III.4 Modelo conductor vertical.....	67
III.4.1 Respuesta TE-TM	68
III.4.2 Matriz de sensibilidad TE-TM.....	69
III.4.3 Respuesta S-P y determinante	71
III.4.4 Matriz de sensibilidad S-P y determinante.....	73
III.4.5 Respuesta promedios S-P	75
III.4.6 Matriz de sensibilidad Promedios S-P	77

CONTENIDO (Continuación)

III.4.7 Conclusiones para el modelo de un cuerpo conductor vertical.	80
IV INVERSIÓN 2-D DE DATOS SITÉTICOS 3-D.....	81
IV.1 Inversión 2D modo TE	86
IV.2 Inversión 2D modo TM.....	88
IV.5 Inversión 2D modo paralelo	94
IV.6 Inversión conjunta 2D SP.....	96
IV.7 Inversión 2D utilizando el determinante.....	98
IV.8 Inversión 2D con promedios SP	100
V DATOS DE CAMPO	103
V.1 Perfil Ojos Negros	103
V.1.1 Antecedentes	103
V.1.2 Datos	107
V.1.3 Análisis de la dimensionalidad de los datos	110
V.1.3.1 Efectos 3-D.....	110
V.1.3.2 Rumbo de la impedancia	113
V.1.3.3 Vectores de inducción	116
V.1.4. Estimación del factor de estática	117
V.1.5 Datos de Sismicidad local	118
V.1.6 Modelo Serie-Paralelo	121
V.1.6.1 Interpretación del modelo	122
V.1.7 Modelo TE-TM	124
V.1.7.1 Interpretación del modelo	124
V.1.8 Discusión de los resultados del modelo	130
V.2 Perfil magnetotelúrico BC-87	134
V.2.1 Antecedentes	134
V.2.2 Modelo Serie-Paralelo	137
V.2.3 Modelo con promedios recursivos	138
VI CONCLUSIONES	141
VII LITERATURA CITADA.....	145

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Figura que muestra que al realizar los promediados iterativos por frecuencia, se tiende al determinante del tensor original.	13
Figura 2. Ejemplo de realizar promedios iterativos por frecuencias, sitio 9 de BC87. Se observa los datos originales y los datos producto de los promedios sucesivos.....	15
Figura 3. Matriz de sensibilidad para un medio homogéneo, a) amplitud de la matriz de sensibilidad en función de la profundidad por periodo, debajo del sitio, b) modo TE y c) modo TM. Un sitio a seis periodos distintos.	27
Figura 4. Matriz de sensibilidad para un medio homogéneo, a) amplitud de la matriz de sensibilidad en función de la profundidad por periodo, debajo del sitio b) modo Serie, b) modo Paralelo y d) determinante. Un sitio a seis periodos distintos.....	28
Figura 5. Modelo contacto vertical.	29
Figura 6. Respuesta TE-TM para el modelo de un contacto vertical.....	31
Figura 7. Matriz de sensibilidad para el modelo del contacto vertical, a) amplitud de la función de sensibilidad en función de la profundidad por periodo, debajo del sitio, b) modo TE y c) modo TM. Sitio 4 (lado conductor) a seis periodos distintos.....	33
Figura 8 Matriz de sensibilidad para el modelo del contacto vertical, a) amplitud de la función de sensibilidad en función de la profundidad por periodo, debajo del sitio, b) modo TE y c) modo TM. Sitio 9 (lado resistivo) a seis periodos distintos.	34
Figura 9. Respuesta S-P para modelo de un contacto vertical.	36
Figura 10. Respuesta determinante para modelo de un contacto vertical.	37
Figura 11. Matriz de sensibilidad para el modelo del contacto vertical, a) amplitud de la matriz de sensibilidad en función de la profundidad por periodo, debajo del sitio, b) modo Serie, c) modo Paralelo y d) Determinante. Sitio 4 (lado conductor) a seis periodos distintos.....	40
Figura 12. Matriz de sensibilidad para el modelo del contacto vertical, a) amplitud de la matriz de sensibilidad en función de la profundidad por periodo, debajo del sitio, b) modo Serie, c) modo Paralelo y d) Determinante. Sitio 9 (lado resistivo) a seis periodos distintos.	41
Figura 13. Respuesta S-P, dos promedios por frecuencia para modelo de un contacto vertical.....	42
Figura 14. Respuesta S-P, cuatro promedios por frecuencia para modelo de un contacto vertical.	43
Figura 15. Matriz de sensibilidad dos promedios serie-paralelo, modelo contacto vertical. a) Amplitud de la matriz de sensibilidad en función de la profundidad por periodo, debajo del sitio, b) modo Serie y c) modo Paralelo. Sitio 4 (lado conductor) a seis periodos distintos. ...	45
Figura 16. Matriz de sensibilidad cuatro promedios serie-paralelo, modelo contacto vertical. a) Amplitud de la matriz de sensibilidad en función de la profundidad por periodo, debajo del sitio, b) modo Serie y c) modo Paralelo. Sitio 4 (lado conductor) a seis periodos distintos. ...	46

LISTA DE FIGURAS (Continuación)

Figura 17. Matriz de sensibilidad dos promedios serie-paralelo, modelo contacto vertical. a) Amplitud de la matriz de sensibilidad en función de la profundidad por periodo, debajo del sitio, b) modo Serie y c) modo Paralelo. Sitio 9 (lado resistivo) a seis periodos distintos.	47
Figura 18. Matriz de sensibilidad cuatro promedios serie-paralelo, modelo contacto vertical. a) Amplitud de la matriz de sensibilidad en función de la profundidad por periodo, debajo del sitio, b) modo Serie y c) modo Paralelo. Sitio 9 (lado resistivo) a seis periodos distintos.	48
Figura 19. Modelo cuerpo conductor horizontal.....	50
Figura 20. Respuesta TE-TM para modelo de un cuerpo conductor horizontal.....	51
Figura 21. Matriz de sensibilidad modo TE y TM, modelo cuerpo conductor horizontal. a) Amplitud de la matriz de sensibilidad en función de la profundidad por periodo, debajo del sitio, b) modo TE y c) modo TM. Sitio 4 a seis periodos distintos.	53
Figura 22. Matriz de sensibilidad modo TE y TM, modelo cuerpo conductor horizontal. a) Amplitud de la matriz de sensibilidad en función de la profundidad por periodo, debajo del sitio, b) modo TE y c) modo TM. Sitio 9 a seis periodos distintos.	54
Figura 23. Respuesta S-P para modelo de un cuerpo conductor horizontal.....	55
Figura 24. Respuesta determinante para modelo de un cuerpo conductor horizontal.....	56
Figura 25. Matriz de sensibilidad modos serie, paralelo y determinante, modelo cuerpo conductor horizontal. a) Amplitud de la matriz de sensibilidad en función de la profundidad por periodo, debajo del sitio, b) modo Serie, c) modo Paralelo y d) Determinante. Sitio 4 a seis periodos distintos.....	58
Figura 26. Matriz de sensibilidad, serie, paralelo y determinante, modelo cuerpo conductor horizontal. a) Amplitud de la matriz de sensibilidad en función de la profundidad por periodo, debajo del sitio, b) modo Serie, c) modo Paralelo y d) Determinante. Sitio 9 a seis periodos distintos.....	59
Figura 27. Respuesta S-P, dos promedios por frecuencia para el modelo de un cuerpo conductor horizontal.	60
Figura 28. Respuesta S-P, cuatro promedios por frecuencia para modelo de un cuerpo conductor horizontal.	61
Figura 29. Matriz de sensibilidad dos promedios serie-paralelo, modelo cuerpo conductor horizontal. a) Amplitud de la matriz de sensibilidad en función de la profundidad por periodo, debajo del sitio, b) modo Serie y c) modo Paralelo. Sitio 4 a seis periodos distintos.	62
Figura 30. Matriz de sensibilidad cuatro promedios serie-paralelo, modelo cuerpo conductor horizontal. a) Amplitud de la matriz de sensibilidad en función de la profundidad por periodo, debajo del sitio, b) modo Serie y c) modo Paralelo Sitio 4 a seis periodos distintos.	63

LISTA DE FIGURAS (Continuación)

Figura 31. Matriz de sensibilidad dos promedios serie-paralelo, modelo cuerpo conductor horizontal. a) Amplitud de la matriz de sensibilidad en función de la profundidad por periodo, debajo del sitio, b) modo Serie y c) modo Paralelo. Sitio 9 a seis periodos distintos.	64
Figura 32. Matriz de sensibilidad cuatro promedios serie-paralelo, modelo cuerpo conductor horizontal. a) Amplitud de la matriz de sensibilidad en función de la profundidad por periodo, debajo del sitio, b) modo Serie y c) modo Paralelo. Sitio 9 a seis periodos distintos.	65
Figura 33. Modelo cuerpo conductor vertical.	67
Figura 34. Respuesta TE-TM para modelo de un cuerpo conductor vertical.	68
Figura 35. Matriz de sensibilidad modo TE y TM, modelo cuerpo conductor vertical. a) Amplitud de la matriz de sensibilidad en función de la profundidad por periodo, debajo del sitio, b) modo TE y c) modo TM. Sitio 4 a seis periodos distintos.	70
Figura 36. Respuesta S-P para modelo de un cuerpo conductor vertical.	71
Figura 37. Respuesta determinante para modelo de un cuerpo conductor vertical.	72
Figura 38. Matriz de sensibilidad modo serie, paralelo y determinante, modelo cuerpo conductor vertical. a) Amplitud de la matriz de sensibilidad en función de la profundidad por periodo, debajo del sitio, b) modo Serie, c) modo Paralelo y d) Determinante. Sitio 4 a seis periodos distintos.	74
Figura 39. Respuesta S-P, dos promedios para modelo de un cuerpo conductor vertical.	75
Figura 40. Respuesta S-P, cuatro promedios para modelo de un cuerpo conductor vertical.	76
Figura 41. Matriz de sensibilidad dos promedios serie-paralelo, modelo cuerpo conductor vertical. a) Amplitud de la matriz de sensibilidad en función de la profundidad por periodo, debajo del sitio, b) modo Serie y c) modo Paralelo. Sitio 4 a seis periodos distintos.	78
Figura 42. Matriz de sensibilidad cuatro promedios serie-paralelo, modelo cuerpo conductor vertical. a) Amplitud de la matriz de sensibilidad en función de la profundidad por periodo, debajo del sitio, b) modo Serie y c) modo Paralelo. Sitio 9 a seis periodos distintos.	79
Figura 43. Modelo sintético 3-D, y perfiles elegidos para inversión 2D. El cuerpo de la izquierda tiene una resistividad de 500 Ohm-m; el de la derecha 2 Ohm-m y el semiespacio encajonante tiene una resistividad de 100 Ohm-m.	85
Figura 44. Modelo 2D, perfil A, inversión modo TE.	87
Figura 45. Modelo 2D, perfil D, inversión modo TE.	87
Figura 46. Modelo 2D, perfil A, inversión modo TM.	89
Figura 47. Modelo 2D, perfil D, inversión modo TM.	89
Figura 48. Modelo 2D, perfil A, inversión conjunta TE-TM.	91
Figura 49. Modelo 2D, perfil D inversión conjunta TE-TM.	91
Figura 50. Modelo 2D, perfil A, inversión modo serie.	92
Figura 51. Modelo 2D, perfil D, inversión modo serie.	93

LISTA DE FIGURAS (Continuación)

Figura 52. Modelo 2D, perfil A, inversión modo paralelo.....	94
Figura 53. Modelo 2D, perfil D, inversión modo-paralelo.....	95
Figura 54. Modelo 2D, perfil A, inversión conjunta serie-paralelo.	96
Figura 55. Modelo 2D, perfil D inversión conjunta serie-paralelo.....	97
Figura 56. Modelo 2D, perfil A, inversión utilizando el determinante del tensor.....	98
Figura 57. Modelo 2D, perfil D, inversión utilizando el determinante del tensor.	99
Figura 58. Modelo 2D, perfil A, dos promedios por frecuencia inversión conjunta serie-paralelo.	101
Figura 59. Modelo 2D, perfil D, dos promedios por frecuencia inversión conjunta serie-paralelo.	101
Figura 60. Modelo 2D, perfil A, cuatro promedios por frecuencia inversión conjunta serie-paralelo.	102
Figura 61. Modelo 2D, perfil D, cuatro promedios por frecuencia inversión conjunta serie-paralelo.	102
Figura 62. Localización del área de estudio (recuadro azul) y marco tectónico regional.....	105
Figura 63. Plano geológico regional y localización de estaciones magnetotelúricas, (Gastil <i>et al.</i> , 1975).....	109
Figura 64. a) Distribución del Skew de la impedancia estimada de la parte real de la diferencia angular $\Delta\theta$. Valores mayores a $\pm 15^\circ$ indican efectos 3-D significativos. b) Ajuste normalizado entre las respuestas de la impedancia calculada y observada del proceso de descomposición de Groom-Bailey. Ajustes mayores que 1.0 son indicativos de efectos 3-D.	112
Figura 65. Diagrama de rosas que muestra el rumbo de la impedancia o azimut estimado del promedio angular $\bar{\theta}$ en cada uno de los sitios. El color gris es usado para periodos cortos menor a 1 segundo; para periodos largos mayores a 1 segundo se muestran en color negro. El mapa muestra la localización y rumbo de las Fallas principales y la ubicación de los sitios MT.....	114
Figura 66. Diagrama de rosas mostrando el rumbo de la impedancia o azimut estimado del proceso de descomposición de Groom-Bailey. El color gris es usado para periodos cortos menores a 1 segundo, para periodos largos mayores a 1 segundo se muestran en color negro. El mapa muestra la localización y rumbo de las Fallas principales y la ubicación de los sitios MT.	115
Figura 67. Vectores de inducción estimados en cada uno de los sitios en un rango de periodos entre 1 a 1000 segundos. Mostrándonos la convención de que las flechas apuntan hacia las zonas conductoras	117
Figura 68. a) Mapa de localización de los sismos ($0.2 \leq M \leq 4.0$) registrados por una red sísmica local en un periodo de un mes. Los triángulos negros representas los sitios MT y los círculos rojos son los epicentros localizados en una banda de 10 Km a lo largo del perfil MT; los círculos abiertos son los epicentros localizados fuera de la banda de 10 km. b) Distribución en	

LISTA DE FIGURAS (Continuación)

- profundidad de los hipocentros, para los eventos mostrados en las Figuras 72 y 73. El histograma muestra que la mayoría de los sismos están entre 14 y 15 km de profundidad con un pequeño grupo alrededor de 4-5 km de profundidad. 120
- Figura 69. Modelo de resistividad resultante de la inversión 2-D con la impedancias s-p. Los triángulos pequeños representan la localización de los sitios MT medidos. En la parte superior del modelo de resistividad se muestra el ajuste entre los datos observados y calculados en cada uno de los sitios, en unidades de desviación estándar (1 sd = 5% error). La localización de hipocentros se muestra también en el modelo. Los círculos rellenos y negros corresponden a los hipocentros localizados en una banda de 10 km alrededor del perfil MT. Se indican también los planos de falla inferidos de las Fallas San Miguel (FSM) y Ojos Negros (FON). 126
- Figura 70. Modelo de resistividad resultante de la inversión 2-D con la impedancias usando los modos TE y TM previo descomposición de Groom y Bailey. Los triángulos pequeños representan la localización de los sitios MT medidos. En la parte superior del modelo de resistividad se muestra el ajuste entre los datos observados y calculados en cada uno de los sitios, en unidades de desviación estándar (1 sd = 5% error). La localización de hipocentros se muestra también en el modelo. Los círculos rellenos y negros corresponden a los hipocentros localizados en una banda de 10 km alrededor del perfil MT. 127
- Figura 71. Comparación entre las curvas de resistividad y fase observadas y calculadas. Los símbolos corresponden a la resistividad y fase aparentes s-p observadas. Las líneas continuas es la respuesta del modelo de resistividad de contra profundidad de la Figura 69. 128
- Figura 72. Comparación entre las curvas de resistividad y fase observadas y calculadas. Los símbolos corresponden a la resistividad y fase aparentes de Groom-Bailey observadas. Las líneas continuas es la respuesta del modelo de resistividad contra profundidad de la Figura 70. 129
- Figura 73. Localización de sitios MT BC87, con síntesis geológica regional, tomada de (Jones, 1993). 136
- Figura 74. Interpretación 2-D que representa mejor las propiedades del subsuelo en base a información geológica y el ajuste con las mediciones realizadas mediante el programa Occam2, tomado de (Jones y Groom, 1993). 136
- Figura 75. Modelo de resistividades obtenido por (Ledo y Jones, 2001), usando el algoritmo de inversión RRI (Smith y Booker, 1991) y los modos TE y TM. Los primeros 100 km del modelo son los correspondientes con los nuestros. SLF corresponde al trazo inferido de la Falla Slocan. 137

LISTA DE FIGURAS (Continuación)

Figura 76. Modelo de resistividades del perfil MT BC87, utilizando la transformación serie-paralelo original.	139
Figura 77. Modelo de resistividades del perfil MT BC87 utilizando dos promedios recursivos.....	139
Figura 78. Modelo de resistividades del perfil MT BC87 utilizando cuatro promedios recursivos..	140
Figura 79. Modelo de resistividades del perfil MT BC87 utilizando seis promedios recursivos.	140

I INTRODUCCIÓN

I.1 Fundamentos teóricos del método magnetotelúrico

Los métodos geofísicos de prospección se basan en la medición indirecta en la superficie del terreno, de alguna propiedad física e infieren su distribución espacial en el subsuelo. Su clasificación depende del tipo de propiedad que miden, y pueden ser de campo natural o artificial. Dentro de los métodos geofísicos de exploración del subsuelo de campo natural podemos mencionar los métodos potenciales (gravimetría y magnetometría) y electromagnéticos de campos telúricos (magnetoteluria) aunque este último puede ser también de campo artificial (magnetotelúrico de altas frecuencias o audiomagnetotelúrico con fuente artificial).

El método magnetotelúrico utiliza el campo electromagnético natural que incide en la superficie terrestre para investigar la conductividad eléctrica del subsuelo, midiendo en la superficie del terreno la variación temporal de los campos eléctrico y magnético en sus componentes ortogonales (x, y, z). Este método se originó a mediados del siglo pasado en la antigua Unión Soviética (1950) y en Francia (Cagniard, 1953), casi simultáneamente. Las ondas electromagnéticas que se generan en las partes altas de la atmósfera (ionósfera) y las que se producen por tormentas eléctricas alrededor del planeta, inducen corrientes eléctricas en el subsuelo, conocidas como corrientes telúricas. Las corrientes telúricas producen a su vez, campos eléctricos y magnéticos secundarios que pueden medirse en la superficie y que contienen información acerca de la conductividad eléctrica del subsuelo.

El campo electromagnético incidente contiene una amplia gama de frecuencias. Las frecuencias altas se atenúan cerca de la superficie, pero las más bajas pueden penetrar decenas de kilómetros, dependiendo de la conductividad del subsuelo.

Las componentes horizontales del campo electromagnético, medidas en la superficie de la tierra, pueden relacionarse linealmente mediante un tensor de segundo orden, denominado tensor de impedancia (Vozoff, 1991), es decir:

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} \quad (1)$$

Dicho tensor contiene la información de la distribución de conductividades o resistividades del subsuelo. Los elementos del tensor de impedancia son cantidades complejas cuya magnitud y fase depende de la distribución de la resistividad en el subsuelo.

En un medio homogéneo, puede demostrarse que $Z_{xx} = Z_{yy} = 0$, y $Z_{xy} = Z_{yx} = Z$ *constante*. Además, la fase se mantiene también constante $\phi = 45^\circ$ y la amplitud $|Z|$ es proporcional a la resistividad ρ del medio homogéneo,

$$\rho = \frac{1}{\omega\mu} |Z|^2 \quad (2)$$

Donde μ es la permeabilidad magnética, que para nuestros propósitos puede considerarse igual a la del vacío $\mu = 4\pi \times 10^{-7}$ (H/m), y $\omega = 2\pi f$ es la frecuencia angular.

En el caso general, el medio no es homogéneo y la ecuación (3) se utiliza para calcular una resistividad “aparente”, la cual varía con la frecuencia y es distinta para cada elemento del tensor de impedancia. De manera que en cada sitio de medición se obtienen ocho funciones de respuesta: cuatro de ellas son resistividades aparentes que se calculan según la ecuación (3) y cuatro son fases que se expresan como se muestra en la ecuación (4); todas ellas relacionadas con la distribución espacial de la conductividad eléctrica en el subsuelo.

$$\rho_a = \frac{1}{\omega\mu} |Z|^2 \quad (3)$$

$$\phi = \text{atan} \left(\frac{\text{Im}(Z)}{\text{Re}(Z)} \right) \quad (4)$$

Cuando la resistividad del subsuelo varía únicamente con la profundidad (caso 1D), la diagonal del tensor es nula, $Z_{xx} = Z_{yy} = 0$, los elementos de la antidiagonal son iguales y funciones de la frecuencia $Z_{xy}(\omega) = -Z_{yx}(\omega)$. En el caso 2D los cuatro elementos del tensor son distintos, pero si el sistema de medición se alinea perpendicular o paralelo a la geometría 2D, entonces la diagonal se anula, $Z_{xx} = Z_{yy} = 0$ y las impedancias en la antidiagonal corresponden a los modos de polarización TE y TM $Z_{TE}(\omega) \neq Z_{TM}(\omega)$. En el caso general (3D) todos los elementos del tensor son distintos de cero independientemente de la orientación del sistema de medición.

I.2 Las impedancias serie y paralelo

Existen varias formas de tratar el tensor de impedancias con la finalidad de obtener la distribución de conductividades en el subsuelo. Dependiendo de la complejidad del medio, podemos estimar la distribución de resistividades en una, dos o tres dimensiones. Los algoritmos de inversión y modelado en 2D son los más desarrollados y difundidos para interpretación de datos en la práctica.

Como los datos medidos en la práctica son esencialmente 3D, por muchos años se han hecho esfuerzos para tratar de reducir los cuatro elementos del tensor observado, y poder compararlo con los modos TE y TM que se obtienen de modelos 2D.

Una de las primeras fue propuesta por Swift (1967) y una de las más recientes se debe a Lilley (1993; 1998). Otro grupo de investigadores ha tratado de explorar las ventajas de utilizar algunas cantidades invariantes ante rotación que pueden encontrarse combinando los elementos del tensor (e. g. Fischer y Masero, 1994; Szarka y Menvielle, 1997; Weaver *et al.*, 2000).

Una línea de investigación que ha resultado particularmente exitosa, consiste en suponer que la impedancia medida está compuesta de una parte estrictamente 2-D, de origen regional, que ha sido distorsionada por efectos locales 3-D. Considerando este modelo particular, se han propuesto varias maneras de descomponer el tensor medido en sus partes originales e. g. Bahr (1988; 1991) o Groom y Bailey (1989; 1991). La descomposición de Groom-Bailey; ha sido muy usada en la última década y ha probado su efectividad en muchas situaciones prácticas, en donde el modelo supuesto (geología regional 2-D con heterogeneidades 3-D locales), se acerca a la realidad.

Una nueva propuesta de invariantes, para obtener la distribución de resistividades en dos y tres dimensiones en el subsuelo fue desarrollada por Romo et al. (2005) y consiste en una transformación que lleva los cuatro elementos del tensor original a cuatro nuevas funciones con propiedades particulares, dos de ellas son

impedancias denominadas serie y paralelo (Z_s y Z_p) y las otras dos son funciones angulares ($\bar{\theta}$ y $\Delta\theta$).

$$\{Z_{xx}, Z_{xy}, Z_{yx}, Z_{yy}\} \Leftrightarrow \{Z_s, Z_p, \Delta\theta, \bar{\theta}\} \quad (5)$$

Las nuevas impedancias y las funciones angulares que resultan de la transformación se pueden calcular fácilmente a partir de los cuatros elementos del tensor original de la siguiente manera:

$$Z_s = \left(\frac{Z_{xx}^2 + Z_{xy}^2 + Z_{yy}^2 + Z_{yx}^2}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$Z_p = \sqrt{2} \frac{Z_{yx}Z_{xy} - Z_{xx}Z_{yy}}{(Z_{xx}^2 + Z_{xy}^2 + Z_{yy}^2 + Z_{yx}^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (7)$$

$$\bar{\theta} = \text{atan} \left(\frac{Z_{yy} - Z_{xx}}{Z_{xy} - Z_{yx}} \right) \quad (8)$$

$$\Delta\theta = \text{atan} \left(\frac{Z_{yy} + Z_{xx}}{Z_{xy} - Z_{yx}} \right) \quad (9)$$

Como se verá más adelante, las impedancias Z_s y Z_p tienen algunas ventajas sobre los modos TE y TM y se pueden utilizar en algoritmos de inversión para obtener modelos 2D y 3D.

I.3 Interpretación de las impedancias serie y paralelo

En una situación 2-D es posible predecir el comportamiento de las respuestas serie y paralelo sobre la base de nuestra experiencia con los modos TE y TM. Es claro que la mayor impedancia dominará la respuesta serie y que la menor lo hará con la respuesta paralelo. Por otro lado, sabemos que las anomalías TE son únicamente de naturaleza inductiva, mientras que las anomalías TM se deben a efectos tanto galvánicos como inductivos. En un ejemplo incluido en (Romo *et al.*, 2005), se muestra que la impedancia paralelo, como la TE, es más sensible a un cuerpo conductor, mientras que la impedancia serie, al igual que la TM, se ve afectada tanto por el cuerpo conductor como por el resistivo. En cierta manera las impedancias serie y paralelo se complementan una a la otra, similarmente a como lo hacen los modos TE y TM. En el ejemplo mencionado también se destaca la simetría y la relativa suavidad de las anomalías serie y paralelo respecto a las que producen los modos TE y TM. Esto se debe al efecto de promediado que está implícito en la formulación. Sin embargo debe reiterarse que en el caso 2-D, ambos conjuntos contienen exactamente la misma información, como lo garantiza la transformación inversa (Romo *et al.*, 2005). En 3-D no hay verdaderos modos TE y TM, puesto que las direcciones de corriente no pueden desacoplarse geoméricamente. Los cuatro elementos del tensor son distintos de cero. Los elementos angulares de la transformación serie-paralelo también son distintos de cero. En los ejemplos 3-D mostrados en (Romo *et al.*, 2005) se hace evidente que la intensidad de las anomalías en el dominio x-y depende del grado de acoplamiento entre el campo inductor y el cuerpo conductor o resistivo. Cuando el campo eléctrico se orienta con una interfase, produce una anomalía tipo-TE, y cuando se hace perpendicular a una interfase produce una anomalía tipo-TM. Los ejemplos citados muestran que la anomalía paralelo es más sensible a los efectos locales tipo-TE; por su parte, la anomalía serie es sensible a los efectos locales tipo-TM. De manera que la respuesta paralelo está relacionada con campos eléctricos a lo largo de las interfaces, mientras que la respuesta serie responde mejor a campos eléctricos perpendiculares a las interfaces. Los resultados de los

ejemplos 3-D de (Romo *et al.*, 2005) confirman que la impedancia serie es de tipo-TM, que la impedancia paralelo es su complemento tipo-TE, y que esto no depende del grado de acoplamiento direccional, sino solamente de la forma y conductividad del cuerpo causante de la anomalía. Berdichevsky *et al.* (1998) encuentran que los efectos producidos por cuerpos conductores son mejor percibidos por la impedancia longitudinal (TE local). También demuestran que los efectos producidos por cuerpos resistivos solamente se detectan por la impedancia transversal (TM local). Nuestros resultados confirman este resultado y lo extienden a las impedancias serie y paralelo.

I.4 Motivación

La transformación serie-paralelo se ha utilizado con buenos resultados para interpretar varios conjuntos de datos sintéticos y de campo (Lujan, 2006; Oliver, 2004; Romo, 2002; Villela-Mendoza, 2004). La idea de sumar o promediar “en serie” y “en paralelo” las respuestas magnetotelúricas abre una serie de posibilidades que vale la pena estudiar.

Una propiedad de esta clase de promedios es que cuando se aplican de manera recursiva el resultado converge al promedio geométrico de las partes. En el caso de las impedancias s-p este promedio geométrico coincide con el determinante del tensor original. En este trabajo analizamos esta propiedad utilizando modelos sintéticos simples.

Las impedancias serie-paralelo se calculan a partir de los cuatro elementos del tensor, por lo tanto la incertidumbre en las impedancias s-p deben estimarse a partir de las incertidumbres en los cuatro elementos del tensor. Hasta ahora la propagación del error era una tarea pendiente. Para la inversión de datos se estaba asignando arbitrariamente una incertidumbre de 5% en todos los datos de resistividad aparente y de 2.5° en las fases. En el capítulo II desarrollamos las ecuaciones de propagación de errores, primeramente en la estimación de las impedancias serie-paralelo, para la resistividad aparente y la fase, así como para el determinante del tensor y para los promedios recursivos s-p.

Por otra parte, nos planteamos como objetivo analizar las funciones de sensibilidad de las nuevas funciones de respuesta. Estas funciones representan la manera en que los datos observados se ven afectados por variaciones en las resistividades del subsuelo. Nos permiten saber cuáles zonas del modelo son más importantes para ajustar a los datos observados. Por esta razón vale la pena analizarlas para entender cómo es que la resistividad del subsuelo afecta a las nuevas funciones de respuesta. Para el análisis utilizamos modelos sintéticos simples en 2D.

I.5 Objetivos

En este trabajo se plantean los objetivos que se enlistan a continuación:

- 1.- Desarrollar y analizar la aplicación recursiva de las impedancias serie y paralelo (promedios por frecuencia).
- 2.- Estimar las incertidumbres al aplicar la transformación serie y paralelo así como su forma recursiva.
- 3.- Analizar la respuesta serie y paralelo a modelos simples, comparando con los tradicionales modos TE y TM.
- 4.- Analizar las funciones de sensibilidad para la transformación serie y paralelo así como para los tradicionales modos TE y TM, utilizando modelos sintéticos simples.
- 5.- Hacer inversión bidimensional de datos utilizando modelos sintéticos 3D y datos de campo.

II METODOLOGÍA DESARROLLADA

II.1 Aplicación recursiva de la equivalencia SP

Como puede observarse en las ecuaciones (6) y (7) las impedancias serie-paralelo son una especie de promedios particulares de los elementos del tensor original. Una propiedad interesante de estos promedios, resulta cuando se aplican de manera recursiva, ya que el resultado de hacer esto converge a una sola impedancia, la cual coincide con el determinante del tensor original.

Esto puede probarse de la siguiente manera (Esparza, 2008):

Denominemos S_0 y P_0 los valores originales para ρ_s y ρ_p respectivamente. Si sumamos en serie y en paralelo, tenemos las que:

$$\begin{aligned} S_1 &= \left(\frac{S_0 + P_0}{2} \right), \\ P_1^{-1} &= \frac{S_0^{-1} + P_0^{-1}}{2}, \end{aligned} \quad (10)$$

Una segunda iteración o segundo promedio s-p sería

$$\begin{aligned} S_2 &= \left(\frac{S_1 + P_1}{2} \right) = \frac{S_1}{2} + \frac{P_1}{2}, \\ P_2^{-1} &= \frac{S_1^{-1} + P_1^{-1}}{2} = \frac{1}{2S_1} + \frac{1}{2P_1}, \end{aligned} \quad (11)$$

En la tercera iteración o tercer promedio tenemos que, en términos de S_1 y P_1

$$\begin{aligned} S_3 &= \frac{S_1}{4} + \frac{P_1}{4} + \frac{1}{\frac{1}{S_1} + \frac{1}{P_1}}; \\ P_3^{-1} &= \frac{1}{4S_1} + \frac{1}{4P_1} + \frac{1}{S_1 + P_1}; \end{aligned} \quad (12)$$

Necesitamos demostrar que las secuencias de sumas o promedios en serie $\{S_0, S_1, S_2, \dots\}$ y en paralelo $\{P_0, P_1, P_2, \dots\}$ convergen a la media geométrica de (S_0, P_0) ,

la cual se define como $D = \sqrt{S_0 P_0}$. Puede notarse que en cualquier iteración k , la media geométrica de las partes es la misma, es decir

$$\sqrt{S_1 P_1} = \sqrt{\frac{1}{2}(S_0 + P_0) \frac{2S_0 P_0}{S_0 + P_0}} = \sqrt{S_0 P_0} = \sqrt{S_k P_k} \quad (13)$$

Usando una propiedad de la aritmética; las medias geométrica y armónica cumplen que: $S_1 \geq D \geq P_1$ y podemos escribir P_1 en términos de S_1 como sigue:

$$P_1 = S_1 + \Delta \quad (14)$$

Usando esta relación en la ecuación (13) y desarrollando la raíz cuadrada de $S_1 P_1$, tenemos:

$$D = S_1 \left(1 + \frac{\Delta}{S_1}\right)^{\frac{1}{2}} = S_1 + \frac{1}{2}\Delta - \frac{1}{8S_1}\Delta^2 + \frac{1}{16}\frac{\Delta^3}{S_1^2} - \dots \quad (15)$$

Para la primera iteración tenemos valores S_1 y $P_1 = S_1 + \Delta$, por lo que ambas secuencias representan la aproximación de orden cero a D .

Sustituyendo (14) en la ecuación (11) para la segunda iteración, resulta:

$$S_2 = \frac{1}{2}(S_1 + P_1) = \frac{1}{2}(S_1 + S_1 + \Delta) = S_1 + \frac{1}{2}\Delta \quad (16)$$

y:

$$P_2 = \frac{2S_1 P_1}{S_1 + P_1} = \frac{2S_1(S_1 + \Delta)}{2S_1 + \Delta} = (S_1 + \Delta) \left(1 + \frac{\Delta}{2S_1}\right)^{-1}$$

o:

$$P_2 = S_1 + \frac{1}{2}\Delta - \frac{1}{4S_1}\Delta^2 + \dots \quad (17)$$

Vemos que S_2 y P_2 , representan la aproximación de primer orden a D. Para la tercera iteración tenemos

$$S_3 = S_1 + \frac{1}{2}\Delta - \frac{1}{8S_1}\Delta^2 + \dots \quad (18)$$

$$P_3 = P_1 + \frac{1}{2}\Delta - \frac{1}{8P_1}\Delta^2 + \dots \quad (19)$$

Observamos que S_3 y P_3 representan la aproximación de segundo orden a D y en general podemos decir que S_k y P_k son aproximaciones de orden k-1 a D.

En la Figura 1 se ilustra de manera gráfica esta convergencia mostrando curvas de resistividad aparente y fase. Puede observarse por un lado, que el promedio geométrico D de cada par S_k P_k es siempre el mismo, y por otro lado que al aumentar las iteraciones s-p ambas curvas tienden al promedio geométrico, tal como se acaba de demostrar algebraicamente.

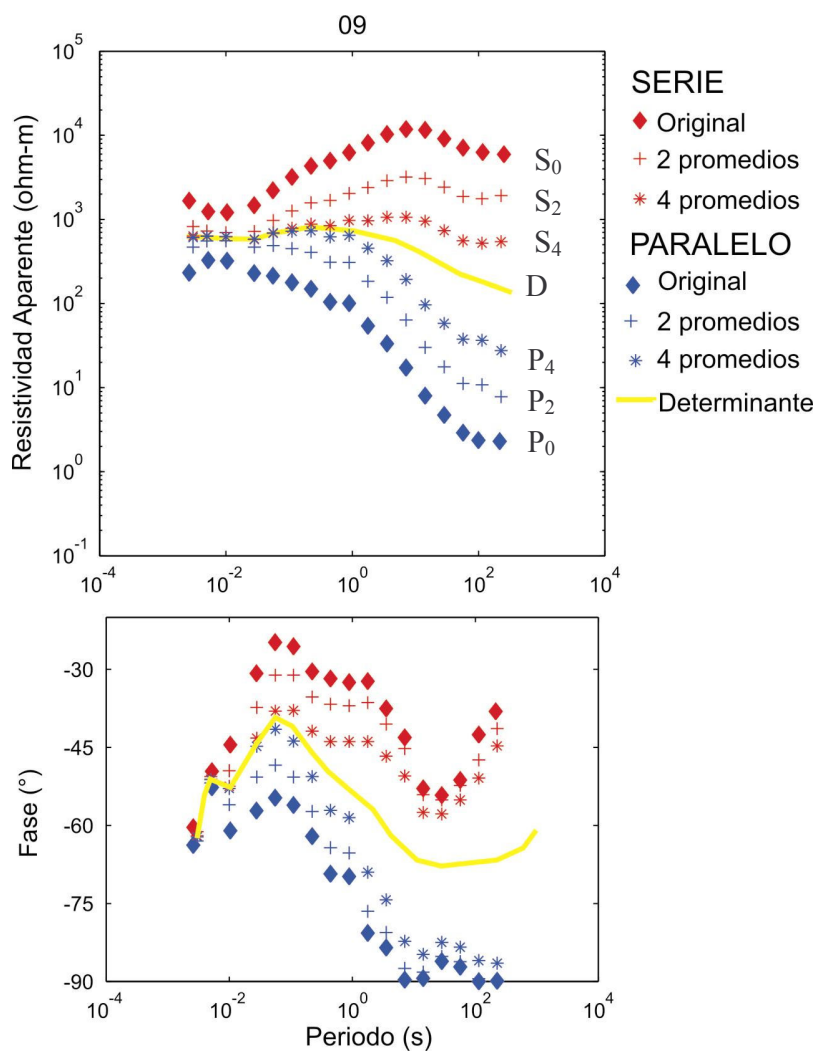


Figura 1. Figura que muestra que al realizar los promediados iterativos por frecuencia, se tiende al determinante del tensor original.

Las sumas o promedios iterativos de impedancias s-p se pueden expresar como:

$$\begin{aligned} Z_{S(i+1)} &= \left(\frac{Z_{S(i)}^2 + Z_{P(i)}^2}{2} \right)^{1/2}, \\ Z_{P(i+1)} &= \frac{\sqrt{2} Z_{S(i)} Z_{P(i)}}{\left(Z_{S(i)}^2 + Z_{P(i)}^2 \right)^{1/2}}, \quad i = 0, \dots \end{aligned} \quad (20)$$

a partir de las estimaciones originales Z_{S_0}, Z_{P_0} dadas por (6) y (7).

Como se acaba de demostrar, después de varios promedios iterativos ambas impedancias tenderán al promedio geométrico. Utilizando las ecuaciones (6) y (7) se puede ver fácilmente que $Z_S Z_P = Z_{xx} Z_{yy} - Z_{xy} Z_{yx}$ es decir el determinante del tensor original. Entonces el promedio geométrico $\sqrt{Z_S Z_P}$ es equivalente a la raíz cuadrada del determinante del tensor de impedancia. En la Figura 2 se muestra el resultado de realizar de una a seis iteraciones de la ecuación (20) con datos reales de un sitio del conjunto de datos BC87 (Jones, 1993). El sitio lit009 fue elegido del conjunto de datos por su diferencia significativa en las curvas de resistividad aparente de ambos modos, las curvas de los extremos son los datos originales serie-paralelo y las siguientes hacia el centro de refieren a los seis promedios sucesivos.

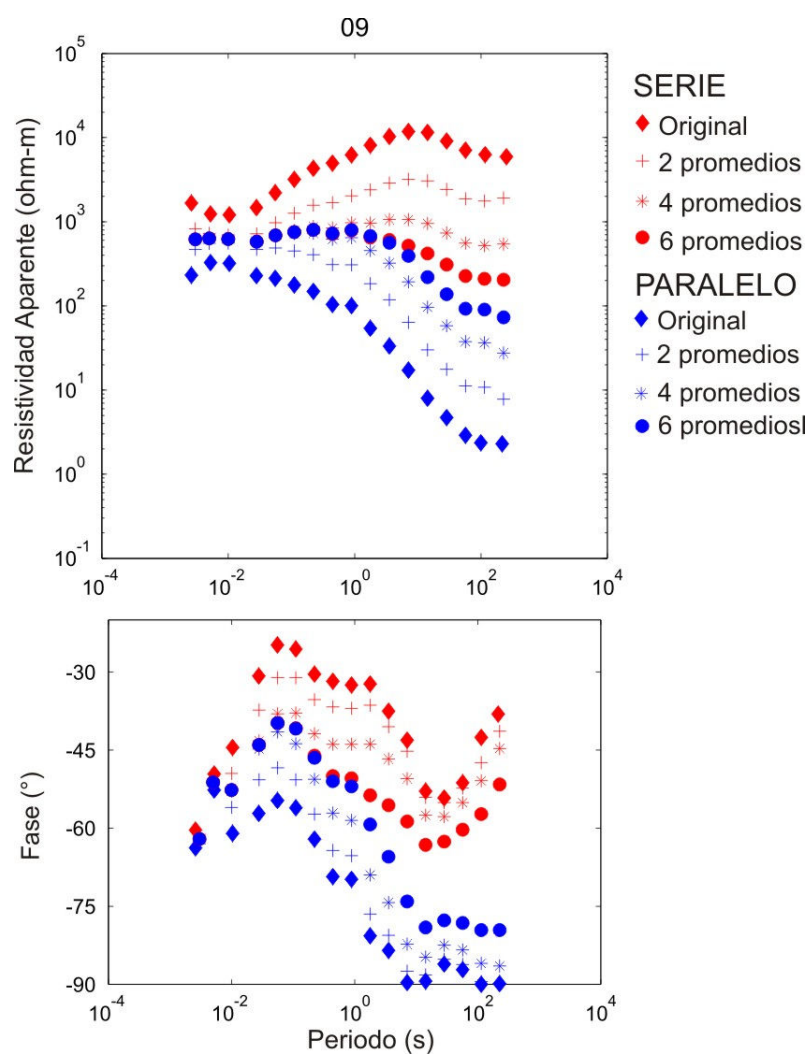


Figura 2. Ejemplo de realizar promedios iterativos por frecuencias, sitio 9 de BC87. Se observa los datos originales y los datos producto de los promedios sucesivos.

Sabemos que mientras más fuertes sean los contrastes laterales de resistividad en el subsuelo mayor será la apertura entre las curvas s y p. Por el contrario, mientras más homogéneo o unidimensional sea el subsuelo más parecidas serán ambas curvas. El hecho de que los promedios s-p sucesivos vayan reduciendo la apertura entre las curvas s y p puede utilizarse como una herramienta para obtener modelos del subsuelo cada vez más homogéneos o unidimensionales. Es sabido que las observaciones MT en un sitio son generalmente más sensibles a los cambios laterales de resistividad que a las variaciones con la profundidad. ¿Será posible que los promedios sucesivos s-p nos permitan enfocar la sensibilidad de los datos hacia profundidad y minimizar las influencias laterales? Vale la pena investigar esto probando con modelos obtenidos a partir de la inversión 2-D de curvas promediadas sucesivamente. En el capítulo III analizaremos esto con datos sintéticos así como con datos reales.

II.2 Estimación de incertidumbres

En el trabajo de Romo et al. (2005) se proponen las ecuaciones para calcular las impedancias s-p a partir de los cuatro elementos del tensor de impedancia original, pero no se trata el tema de la estimación de la incertidumbre de estas nuevas funciones de respuesta. En este capítulo derivamos las ecuaciones necesarias para la estimación de incertidumbre tanto de las impedancias s-p como de sus promedios recursivos.

II.2.1 Propagación de errores en las impedancias S-P

Si tenemos una cantidad $q(x,y,...)$ que es función de varias variables, su incertidumbre δq se puede estimar a partir de las incertidumbres $\delta x, \delta y, ...$ de cada una de las variables (Taylor, 1997), mediante

$$\delta q = \sqrt{\left(\left|\frac{\partial q}{\partial x}\right| \delta x\right)^2 + \dots + \left(\left|\frac{\partial q}{\partial z}\right| \delta z\right)^2} \quad (21)$$

en donde se supone que las incertidumbres $\delta x, \delta y, ...$ son independientes y aleatorias.

La ecuación (6) describe a la impedancia serie Z_s como función de los cuatro elementos del tensor $Z_{xx}, Z_{xy}, Z_{yx}, Z_{yy}$, por lo que conociendo las incertidumbres $\delta Z_{xx}, \delta Z_{xy}, \delta Z_{yx}, \delta Z_{yy}$ en cada una de ellos, podemos estimar la incertidumbre en Z_s utilizando (21)

$$\delta Z_s = \sqrt{\left(\left|\frac{\partial Z_s}{\partial Z_{xx}}\right| \delta Z_{xx}\right)^2 + \left(\left|\frac{\partial Z_s}{\partial Z_{xy}}\right| \delta Z_{xy}\right)^2 + \left(\left|\frac{\partial Z_s}{\partial Z_{yx}}\right| \delta Z_{yx}\right)^2 + \left(\left|\frac{\partial Z_s}{\partial Z_{yy}}\right| \delta Z_{yy}\right)^2} \quad (22)$$

Utilizando (6), Las derivadas parciales de la ecuación (22) se expresan como:

$$\frac{\partial Z_s}{\partial Z_{xx}} = \frac{Z_{xx}}{\sqrt{2(Z_{xx}^2 + Z_{xy}^2 + Z_{yx}^2 + Z_{yy}^2)}} \quad (23)$$

$$\frac{\partial Z_S}{\partial Z_{xy}} = \frac{Z_{xy}}{\sqrt{2(Z_{xx}^2 + Z_{xy}^2 + Z_{yx}^2 + Z_{yy}^2)}} \quad (24)$$

$$\frac{\partial Z_S}{\partial Z_{yx}} = \frac{Z_{yx}}{\sqrt{2(Z_{xx}^2 + Z_{xy}^2 + Z_{yx}^2 + Z_{yy}^2)}} \quad (25)$$

$$\frac{\partial Z_S}{\partial Z_{yy}} = \frac{Z_{yy}}{\sqrt{2(Z_{xx}^2 + Z_{xy}^2 + Z_{yx}^2 + Z_{yy}^2)}} \quad (26)$$

Sustituyendo las ecuaciones: (23), (24), (25) y (26) en (22) tenemos la incertidumbre en la impedancia serie.

Similarmente, la incertidumbre en la impedancia paralelo es

$$\delta Z_P = \sqrt{\left(\left|\frac{\partial Z_P}{\partial Z_{xx}}\right| \delta Z_{xx}\right)^2 + \left(\left|\frac{\partial Z_P}{\partial Z_{xy}}\right| \delta Z_{xy}\right)^2 + \left(\left|\frac{\partial Z_P}{\partial Z_{yx}}\right| \delta Z_{yx}\right)^2 + \left(\left|\frac{\partial Z_P}{\partial Z_{yy}}\right| \delta Z_{yy}\right)^2} \quad (27)$$

Utilizando (7) las derivadas parciales en (27) se expresan como:

$$\frac{\partial Z_P}{\partial Z_{xx}} = -\sqrt{2} \left[\frac{1}{\sqrt{Z_{xx}^2 + Z_{xy}^2 + Z_{yx}^2 + Z_{yy}^2}} \left(Z_{yy} + \frac{Z_{xx}(Z_{yx}Z_{xy} - Z_{xx}Z_{yy})}{Z_{xx}^2 + Z_{xy}^2 + Z_{yx}^2 + Z_{yy}^2} \right) \right] \quad (28)$$

$$\frac{\partial Z_P}{\partial Z_{xy}} = \sqrt{2} \left[\frac{1}{\sqrt{Z_{xx}^2 + Z_{xy}^2 + Z_{yx}^2 + Z_{yy}^2}} \left(Z_{yx} - \frac{Z_{xy}(Z_{yx}Z_{xy} - Z_{xx}Z_{yy})}{Z_{xx}^2 + Z_{xy}^2 + Z_{yx}^2 + Z_{yy}^2} \right) \right] \quad (29)$$

$$\frac{\partial Z_P}{\partial Z_{yx}} = \sqrt{2} \left[\frac{1}{\sqrt{Z_{xx}^2 + Z_{xy}^2 + Z_{yx}^2 + Z_{yy}^2}} \left(Z_{xy} - \frac{Z_{yx}(Z_{yx}Z_{xy} - Z_{xx}Z_{yy})}{Z_{xx}^2 + Z_{xy}^2 + Z_{yx}^2 + Z_{yy}^2} \right) \right] \quad (30)$$

$$\frac{\partial Z_P}{\partial Z_{yy}} = -\sqrt{2} \left[\frac{1}{\sqrt{Z_{xx}^2 + Z_{xy}^2 + Z_{yx}^2 + Z_{yy}^2}} \left(Z_{xx} + \frac{Z_{yy}(Z_{yx}Z_{xy} - Z_{xx}Z_{yy})}{Z_{xx}^2 + Z_{xy}^2 + Z_{yx}^2 + Z_{yy}^2} \right) \right] \quad (31)$$

Sustituyendo las ecuaciones (28), (29), (30), y (31), en (27), tenemos la incertidumbre en la impedancia paralelo.

II.2.2 Propagación de errores en el cálculo de la resistividad y fase

a) Resistividad aparente

La ecuación que expresa el cálculo de la resistividad aparente en función de la impedancia se define como:

$$\rho_a = \frac{1}{\omega\mu} |Z|^2 \quad (32)$$

Para propagar el error conviene expresar (32) en términos de la parte real e imaginaria de la impedancia, i.e. $Z = x + iy$

$$\rho_a = \frac{x^2 + y^2}{\omega\mu} \quad (33)$$

Utilizando la ecuación general de propagación del error, la incertidumbre en la resistividad aparente será

$$\delta\rho_a = \frac{1}{\omega\mu} \sqrt{(|2x|\delta x)^2 + (|2y|\delta y)^2} \quad (34)$$

Si consideramos $\delta x = \delta y$ y consecuentemente $\delta Z = \sqrt{2} \delta x$ nos queda

$$\delta\rho_a = \frac{2\delta x}{\omega\mu} \sqrt{x^2 + y^2} = \frac{\sqrt{2}}{\omega\mu} |Z| \delta Z \quad (35)$$

Con la que podemos calcular la incertidumbre en la resistividad aparente a partir de la incertidumbre en la impedancia.

b) Fase

La fase de la impedancia se define como:

$$\varphi = \text{atan}\left(\frac{y}{x}\right) \quad (36)$$

en donde $Z = x + iy$ la incertidumbre en la fase se puede determinar utilizando

$$\delta\varphi = \sqrt{\left(\left|\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right|\delta x\right)^2 + \left(\left|\frac{\partial\varphi}{\partial y}\right|\delta y\right)^2} \quad (37)$$

Las derivadas parciales se pueden calcular sabiendo que

$$\frac{\partial}{\partial x} \text{atan}(u) = \frac{1}{1+u^2} \frac{\partial u}{\partial x} \quad (38)$$

en donde $u = \frac{y}{x}$. Por lo que

$$\begin{aligned} \frac{\partial\varphi}{\partial x} &= -\frac{y}{x^2 + y^2} = -\frac{y}{|Z|^2} \\ \frac{\partial\varphi}{\partial y} &= \frac{x}{x^2 + y^2} = \frac{x}{|Z|^2} \end{aligned} \quad (39)$$

Sustituyendo las ecuaciones (39) en (37) y considerando nuevamente que $\delta x = \delta y$ tenemos la ecuación para calcular la incertidumbre en la fase a partir de la incertidumbre en la impedancia.

$$\delta\varphi = \sqrt{\left(\frac{y}{|Z|^2}\delta x\right)^2 + \left(\frac{x}{|Z|^2}\delta y\right)^2} = \frac{\delta x}{|Z|^2} \sqrt{x^2 + y^2} = \frac{\delta Z}{\sqrt{2}|Z|} \quad (40)$$

II.2.3 Propagación de errores en los promedios

Conociendo la incertidumbre en las impedancias Z_S y Z_P es posible calcular la incertidumbre en cualquiera de sus promedios recursivos, dados por

$$Z_{S_i} = \left(\frac{Z_{S_{i-1}}^2 + Z_{P_{i-1}}^2}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (41)$$

y

$$Z_{P_i} = \sqrt{2} \left(\frac{Z_{S_{i-1}} Z_{P_{i-1}}}{(Z_{S_{i-1}}^2 + Z_{P_{i-1}}^2)^{\frac{1}{2}}} \right) \quad (42)$$

En este caso conviene considerar que las incertidumbres $\delta Z_{S_{i-1}}$ y $\delta Z_{P_{i-1}}$ no son independientes, por lo que utilizaremos la ecuación

$$\delta Z_{S_i} = \sqrt{\left(\left| \frac{\partial Z_{S_i}}{\partial Z_{S_{i-1}}} \right| \delta Z_{S_{i-1}} \right)^2 + \left(\left| \frac{\partial Z_{S_i}}{\partial Z_{P_{i-1}}} \right| \delta Z_{P_{i-1}} \right)^2 + 2 \left| \frac{\partial Z_{S_i}}{\partial Z_{S_{i-1}}} \frac{\partial Z_{S_i}}{\partial Z_{P_{i-1}}} \right| \delta Z_{S_{i-1}} \delta Z_{P_{i-1}}} \quad (43)$$

Utilizando (41) las derivadas parciales quedan como

$$\frac{\partial Z_{S_i}}{\partial Z_{S_{i-1}}} = \frac{Z_{S_{i-1}}}{\sqrt{2(Z_{S_{i-1}}^2 + Z_{P_{i-1}}^2)}} \quad (44)$$

$$\frac{\partial Z_{S_i}}{\partial Z_{P_{i-1}}} = \frac{Z_{P_{i-1}}}{\sqrt{2(Z_{S_{i-1}}^2 + Z_{P_{i-1}}^2)}} \quad (45)$$

Sustituyendo las ecuaciones (44) y (45) en (43) obtenemos la incertidumbre de Z_S en una iteración a partir de las incertidumbres de la iteración anterior.

Similarmente, para la impedancia en paralelo tendremos:

$$\delta Z_{P_i} = \sqrt{\left(\left| \frac{\partial Z_{P_i}}{\partial Z_{S_{i-1}}} \right| \delta Z_{S_{i-1}} \right)^2 + \left(\left| \frac{\partial Z_{P_i}}{\partial Z_{P_{i-1}}} \right| \delta Z_{P_{i-1}} \right)^2 + 2 \left| \frac{\partial Z_{P_i}}{\partial Z_{S_{i-1}}} \frac{\partial Z_{P_i}}{\partial Z_{P_{i-1}}} \right| \delta Z_{S_{i-1}} \delta Z_{P_{i-1}}} \quad (46)$$

Utilizando la ecuación (45), las derivadas parciales quedan como:

$$\frac{\partial Z_{P_i}}{\partial Z_{S_{i-1}}} = \frac{\sqrt{2} Z_{P_{i-1}}}{\sqrt{Z_{S_{i-1}}^2 + Z_{P_{i-1}}^2}} \left(1 - \frac{Z_{S_{i-1}}^2}{(Z_{S_{i-1}}^2 + Z_{P_{i-1}}^2)} \right) \quad (47)$$

$$\frac{\partial Z_{P_i}}{\partial Z_{P_{i-1}}} = \frac{\sqrt{2} Z_{S_{i-1}}}{\sqrt{Z_{S_{i-1}}^2 + Z_{P_{i-1}}^2}} \left(1 - \frac{Z_{P_{i-1}}^2}{(Z_{S_{i-1}}^2 + Z_{P_{i-1}}^2)} \right) \quad (48)$$

Sustituyendo las ecuaciones (47) y (48) en (46) obtenemos la incertidumbre en Z_p , en una iteración a partir de las incertidumbres de la iteración anterior.

II.2.4 Propagación de errores en el determinante

El determinante del tensor de impedancias se expresa como

$$\det(Z) = Z_{xx}Z_{yy} - Z_{xy}Z_{yx} \quad (49)$$

La incertidumbre en Z_{\det} puede calcularse utilizando

$$\delta Z_{\det} = \sqrt{\left(\left| \frac{\partial Z_{\det}}{\partial Z_{xx}} \right| \delta Z_{xx} \right)^2 + \left(\left| \frac{\partial Z_{\det}}{\partial Z_{xy}} \right| \delta Z_{xy} \right)^2 + \left(\left| \frac{\partial Z_{\det}}{\partial Z_{yx}} \right| \delta Z_{yx} \right)^2 + \left(\left| \frac{\partial Z_{\det}}{\partial Z_{yy}} \right| \delta Z_{yy} \right)^2} \quad (50)$$

Con las derivadas parciales dadas por

$$\frac{\partial Z_{\text{det}}}{\partial Z_{xx}} = Z_{yy}, \quad \frac{\partial Z_{\text{det}}}{\partial Z_{yy}} = Z_{xx}, \quad \frac{\partial Z_{\text{det}}}{\partial Z_{xy}} = -Z_{yx}, \quad \frac{\partial Z_{\text{det}}}{\partial Z_{yx}} = -Z_{xy} \quad (51)$$

Sustituyendo (51) en la ecuación (50) la incertidumbre en el determinante queda como

$$\delta Z_{\text{det}} = \sqrt{\left(|Z_{yy}| \delta Z_{xx}\right)^2 + \left(|Z_{yx}| \delta Z_{xy}\right)^2 + \left(|Z_{xy}| \delta Z_{yx}\right)^2 + \left(|Z_{xx}| \delta Z_{yy}\right)^2} \quad (52)$$

III RESPUESTA Y SENSIBILIDAD DE MODELOS SIMPLES

En este capítulo se hace un análisis de las respuestas y las funciones de sensibilidad de modelos sintéticos simples. Los resultados obtenidos al utilizar los modos TE, TM, se comparan con el resultado de utilizar las respuestas invariantes: serie, paralelo, y determinante, así como los promedios recursivos S-P. Probamos tres modelos simples: un contacto lateral, un cuerpo conductor horizontal y un cuerpo conductor vertical. Para realizar el modelado directo se utilizó el programa desarrollado por (Rodi y Mackie, 2001) para invertir datos magnetotelúricos en dos dimensiones.

Las funciones de sensibilidad se obtienen de la matriz de derivadas parciales que relaciona las variaciones de las funciones de respuesta en cada sitio de observación respecto a las variaciones en el modelo. Son útiles para analizar las virtudes o defectos de las distintas funciones de respuesta que estamos probando.

III.1 Funciones de sensibilidad en un medio homogéneo

III.1.1 Sensibilidad TE-TM

En la Figura 3 se muestran las imágenes de la matriz de sensibilidad para un medio homogéneo, en un sitio de observación a seis periodos distintos entre 0.01 y 1000 s. La forma e intensidad de la sensibilidad da una idea de la región del modelo que más influye en la observación a una frecuencia dada. Se puede observar que al aumentar el periodo aumenta la zona de influencia del modelo. Observamos que la forma característica de la sensibilidad es diferente para el modo TE y para el modo TM, sobre todo al aumentar el periodo. El modo TE va perdiendo sensibilidad lateral en la superficie, mientras que el modo TM mantiene su sensibilidad alrededor del sitio de observación a medida que aumenta el período. Podemos decir que ambos modos "ven" el medio homogéneo de distinta manera, debido a que las funciones de sensibilidad son distintas.

III.1.2 Sensibilidad S-P y determinante

La Figura 4 muestra las imágenes de la matriz de sensibilidad en un medio homogéneo, para la impedancia serie, paralelo y el determinante, en un sitio a distintos periodos. Podemos observar que en los tres casos la sensibilidad es igual. Esto indica que las tres respuestas invariantes (serie, paralelo y determinante) “ven” el medio homogéneo de igual manera, lo que no ocurre con los modos TE y TM. La sensibilidad de las respuestas invariantes reflejan el hecho de que son “promedios” particulares de los modos TE y TM.

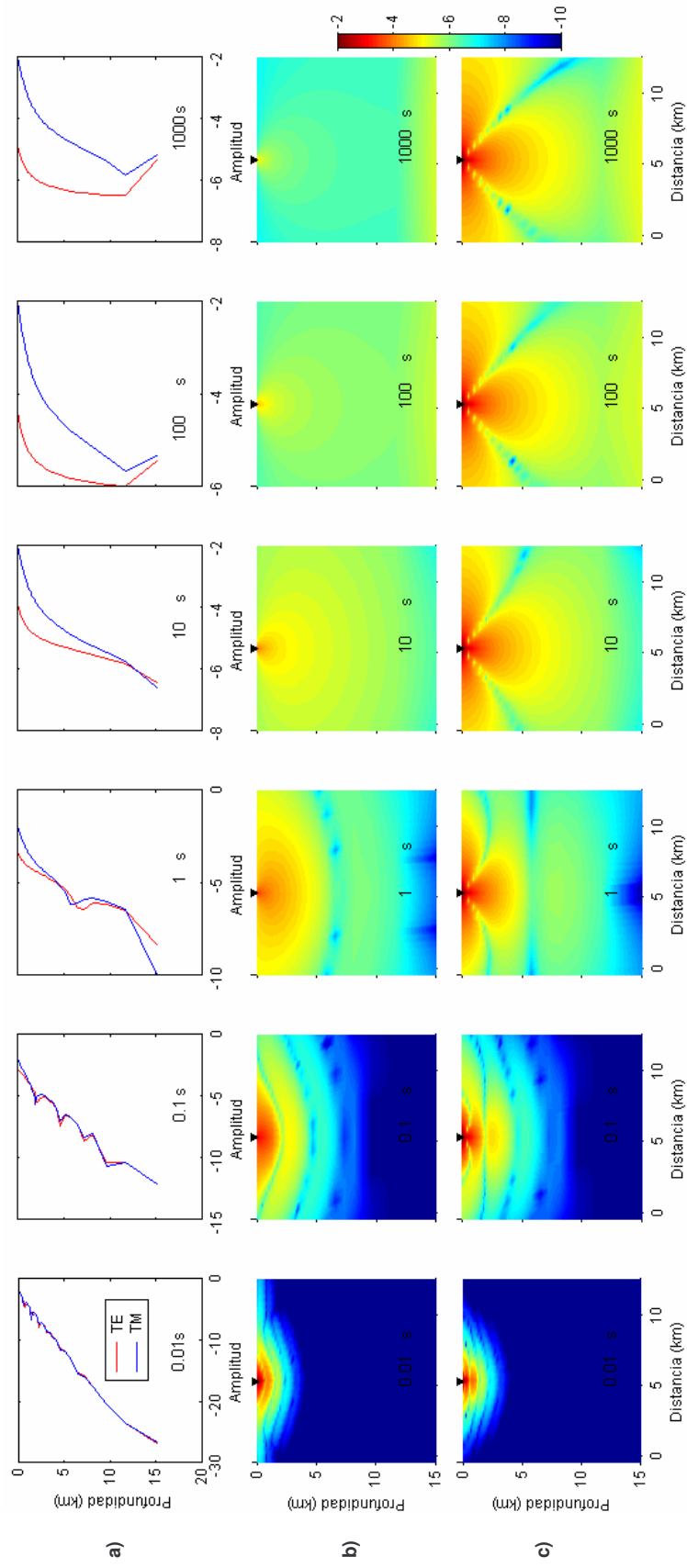


Figura 3. Matriz de sensibilidad para un medio homogéneo, a) amplitud de la matriz de sensibilidad en función de la profundidad por periodo, debajo del sitio, b) modo TE y c) modo TM. Un sitio a seis periodos distintos.

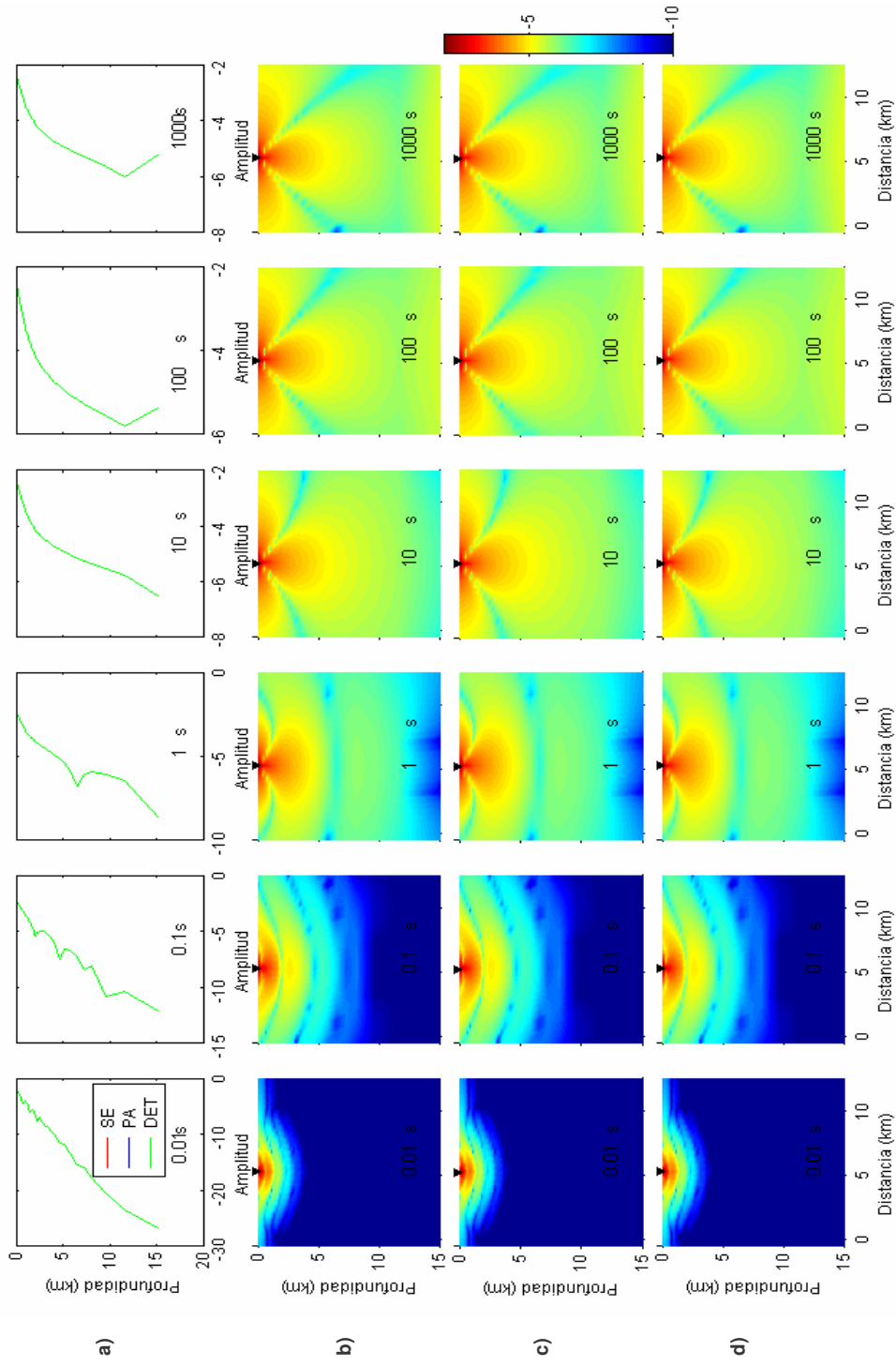


Figura 4. Matriz de sensibilidad para un medio homogéneo, a) amplitud de la matriz de sensibilidad en función de la profundidad por periodo, debajo del sitio b) modo Serie, b) modo Paralelo y d) determinante. Un sitio a seis periodos distintos.

III.2 Modelo contacto vertical

El modelo consiste de un contacto vertical entre dos semiespacios: un conductor de 1 ohm-m y un resistivo de 100 ohm-m, como se muestra en la Figura 5. La discretización utilizada fue de 34 x 54 celdas de 500 metros de largo, y espesor variable incrementando conforme aumenta la profundidad. Las respuestas se calculan en 12 sitios separados 1 km entre sí, como se muestra con triángulos en la superficie del modelo. En cada sitio se calculan para 11 periodos distribuidos entre 0.01 y 1000 s.

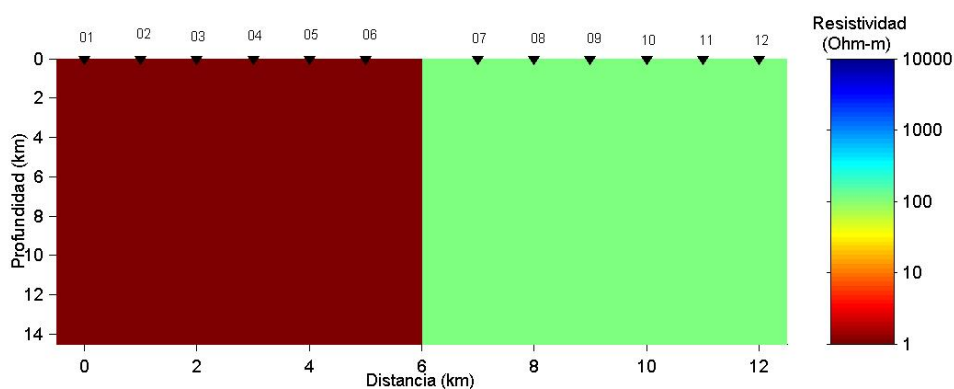


Figura 5. Modelo contacto vertical.

III.2.1 Respuesta TE-TM

La Figura 6 muestra en pseudosecciones (distancia vs. período), la respuesta TE y TM para la resistividad aparente y la fase. El modo TM detecta el contraste lateral solamente en los sitios más cercanos al contacto, mientras que el modo TE es muy afectado aún a distancias grandes. En los sitios que se encuentran del lado del bloque resistivo la resistividad aparente disminuye debido a la presencia lateral del bloque conductor, mientras que en los sitios que se localizan del lado del bloque conductor la resistividad aparente aumenta por la presencia lateral del bloque resistivo. Así mismo la fase es también afectada, alejándose del valor de 45° esperado en los bloques homogéneos. Estos efectos se hacen más evidentes a medida que el período aumenta, como se espera debido al aumento en la profundidad de penetración (Skin Depth).

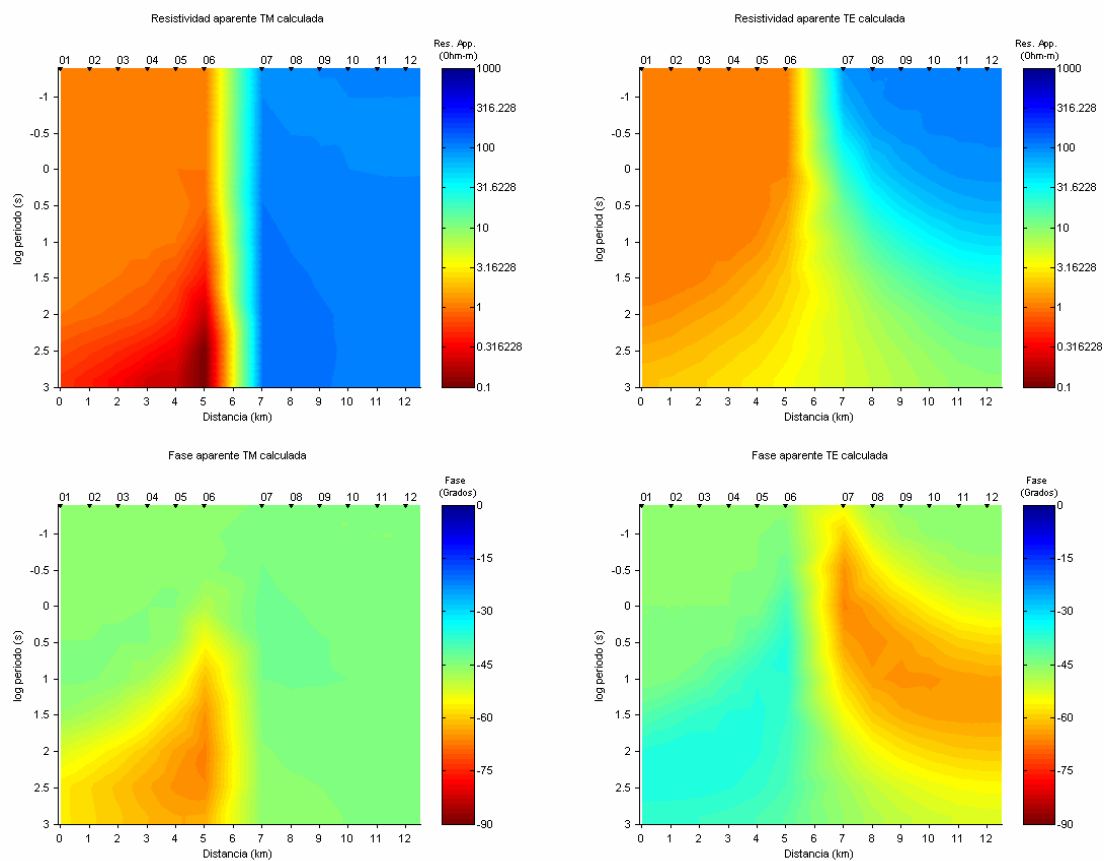


Figura 6. Respuesta TE-TM para el modelo de un contacto vertical.

III.2.2 Matriz de sensibilidad TE-TM

Las Figura 7 y Figura 8 muestran las imágenes de la matriz de sensibilidad del modelo de un contacto vertical para los modos TE y TM, en dos sitios distintos, uno del lado conductor y otro del lado resistivo, a seis periodos diferentes.

A periodos menores a un segundo las funciones son similares a las mostradas para un modelo homogéneo, el efecto del contacto vertical aún no se observa. Al incrementarse el periodo el efecto lateral del contacto se hace presente.

Cuando el sitio está en el lado conductor (Figura 7) la sensibilidad en el bloque resistivo es mínima, para ambos modos de polarización, pero sobre todo para el TE. En cambio, cuando el sitio está en el bloque resistivo (Figura 8) la sensibilidad del modo TE es mayor en el bloque conductor a pesar de que el sitio se localiza sobre el cuerpo resistivo. Podemos decir que el modo TE es fuertemente afectado por efectos laterales. Para el modo TM la situación es diferente, es afectado principalmente por lo que se localiza debajo del sitio y poco por efectos laterales, independientemente de su ubicación.

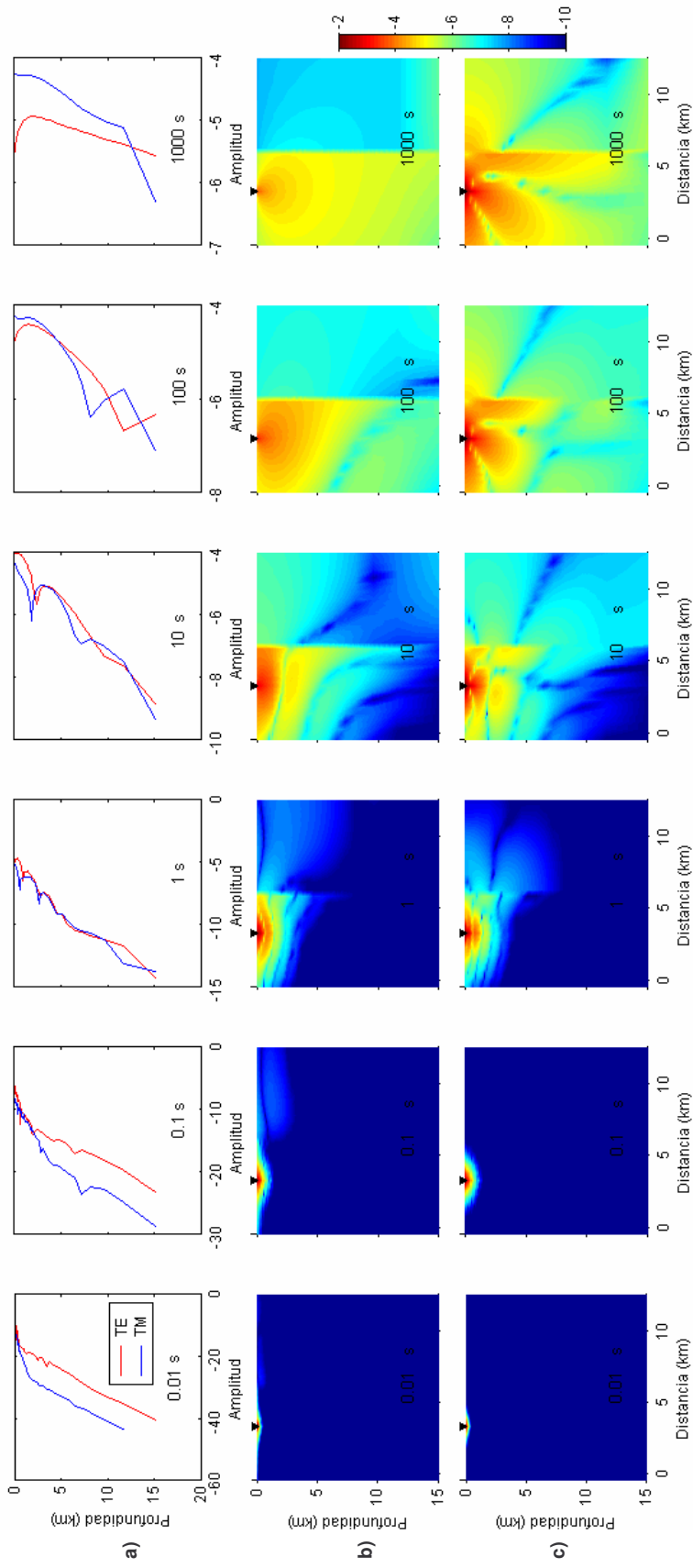


Figura 7. Matriz de sensibilidad para el modelo del contacto vertical, a) amplitud de la función de sensibilidad en función de la profundidad por periodo, debajo del sitio, b) modo TE y c) modo TM. Sitio 4 (lado conductor) a seis periodos distintos.

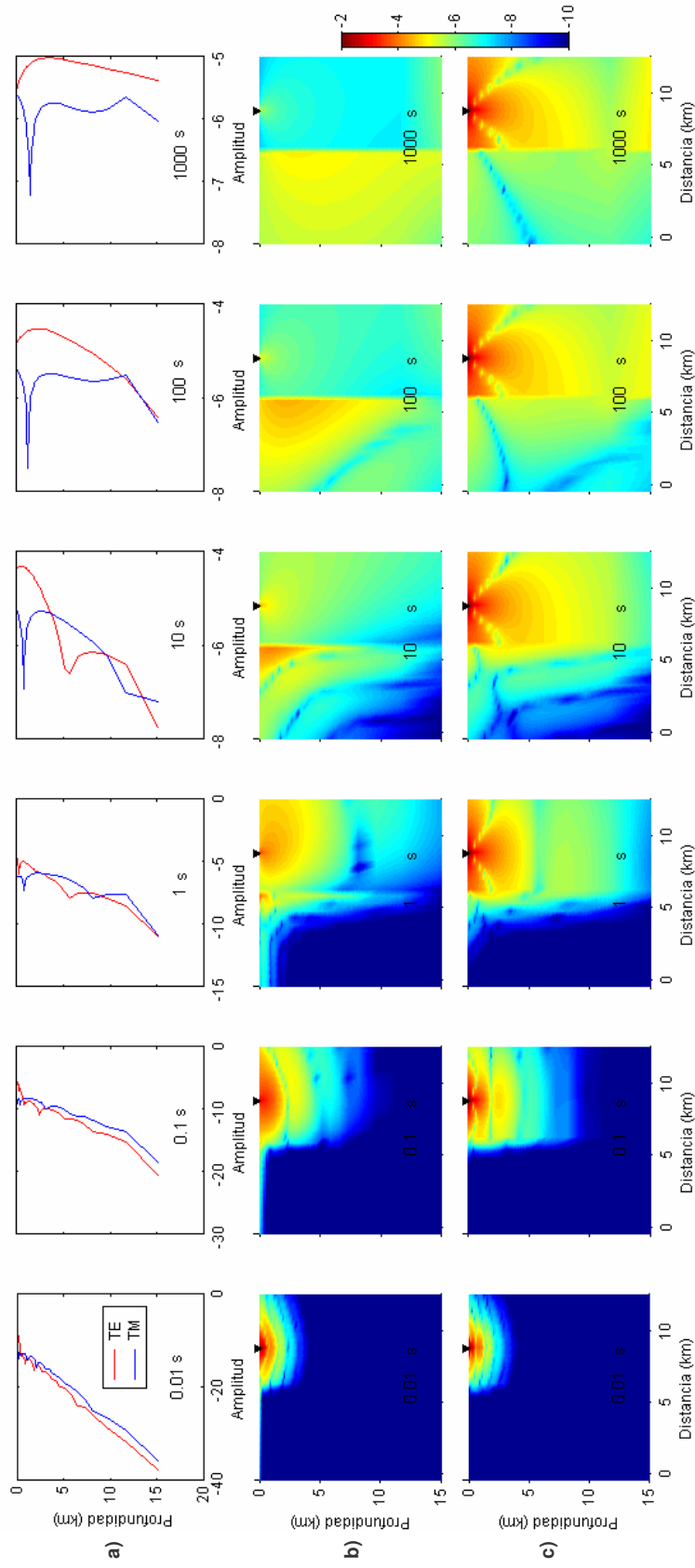


Figura 8 Matriz de sensibilidad para el modelo del contacto vertical, a) amplitud de la función de sensibilidad en función de la profundidad por periodo, debajo del sitio, b) modo TE y c) modo TM. Sitio 9 (lado resistivo) a seis periodos distintos.

III.2.3 Respuestas S-P y determinante

En la Figura 9 se muestra las pseudosecciones correspondientes a la respuesta serie y paralelo. En sitios localizados encima del bloque resistivo la respuesta paralelo se encuentra afectada por el bloque conductor, presentando una disminución de la resistividad aparente y un aumento de la fase correspondiente. En contraparte observamos que la respuesta serie casi no se afecta.

Por otro lado, el efecto lateral es menor para las respuestas S-P que para los modos TE-TM del la Figura 6. En los sitios que se localizan del lado del bloque conductor, la respuesta del modo serie es similar al modo TE, mientras que la respuesta paralelo se parece más al modo TM. En contraparte, para sitios que se localizan del lado del bloque resistivo, la correspondencia es serie con TM y paralelo con TE.

La Figura 10 muestra la respuesta del determinante para el mismo modelo de un contacto vertical. A periodos largos los sitios que se localizan por encima del bloque resistivo disminuyen su valor de resistividad aparente, aunque el efecto es menor que para la respuesta paralelo, Los sitios que se localizan encima del bloque conductor son poco afectados por efecto lateral y solo a periodos mayores a 10 s se nota un efecto similar al de la respuesta paralelo.

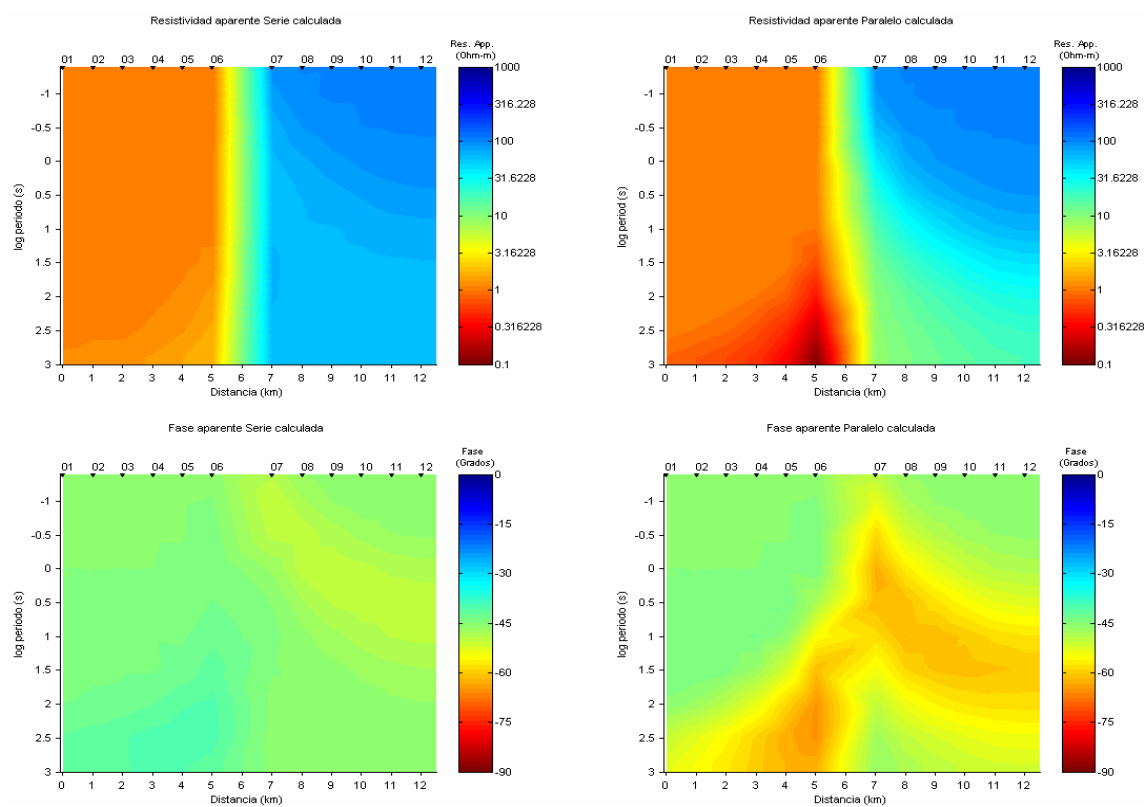


Figura 9. Respuesta S-P para modelo de un contacto vertical.

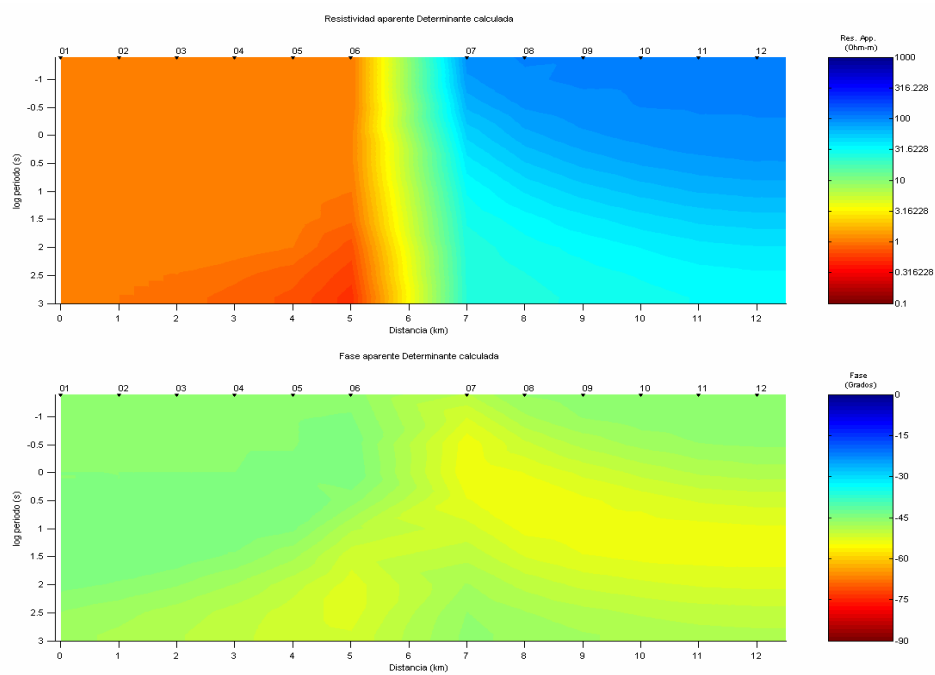


Figura 10. Respuesta determinante para modelo de un contacto vertical.

III.2.4 Matriz de sensibilidad S-P y determinante

La Figura 11 y Figura 12 muestran las imágenes de la matriz de sensibilidad del modelo de un contacto vertical para los modos: serie paralelo y determinante en dos sitios distintos (lado conductor del contacto y lado resistivo) a seis periodos diferentes.

El modo serie es el menos afectado por la influencia del contacto lateral, la mayor sensibilidad proviene de lo que existe debajo del sitio, independientemente de si el sitio se encuentra en el bloque resistivo o en el conductor. El modo paralelo se comporta diferente, cuando el sitio está en el bloque conductor (Figura 11), la sensibilidad grande se mantiene en el área debajo del sitio y es mínima en el bloque resistivo, en cambio cuando el sitio se encuentra en el bloque resistivo (Figura 12) la sensibilidad lateral al bloque conductor es mayor que debajo del sitio.

Haciendo una comparación con los modos TE y TM, en sitios que localizan del lado del bloque conductor, el modo serie se comporta de forma similar que el modo TE y el paralelo como el modo TM (Figura 7 y Figura 11). En sitios que localizan sobre el bloque resistivo el modo TE es similar al paralelo y el modo TM a la serie (Figura 8 y Figura 12). Si comparamos la magnitud de la sensibilidad, es menor para el modo paralelo que para el TE.

En la Figura 11 y Figura 12 se observa que el determinante del tensor se encuentra menos afectado por efectos laterales y más por lo que se encuentra debajo del sitio de observación. Aunque en el caso del sitio en el bloque resistivo,

la influencia del bloque conductor es más notable. Se nota también que la sensibilidad del determinante es un promedio de las sensibilidades serie y paralelo, como era de esperarse.

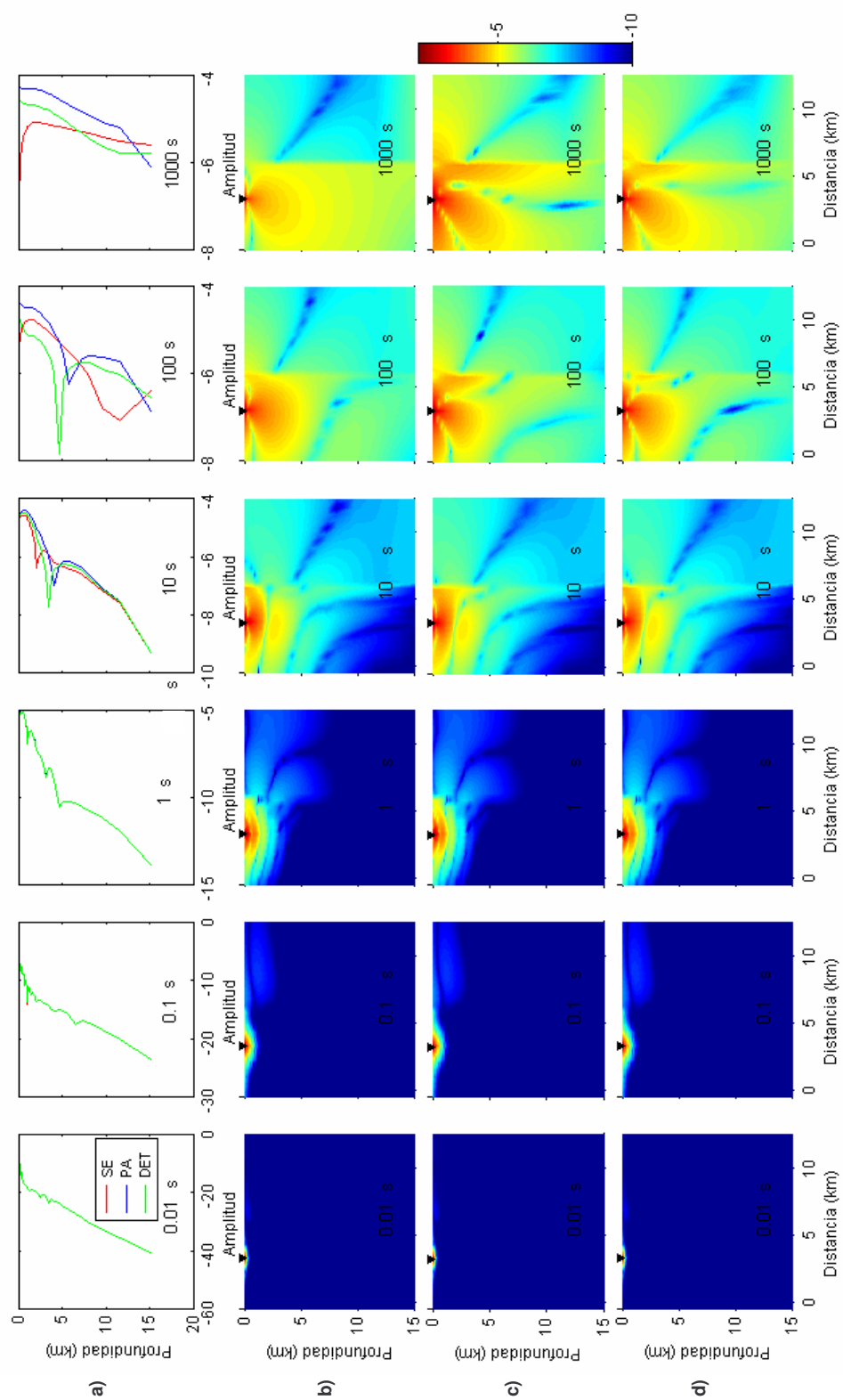


Figura 11. Matriz de sensibilidad para el modelo del contacto vertical, a) amplitud de la matriz de sensibilidad en función de la profundidad por periodo, debajo del sitio, b) modo Serie, c) modo Paralelo y d) Determinante. Sitio 4 (lado conductor) a seis periodos distintos.

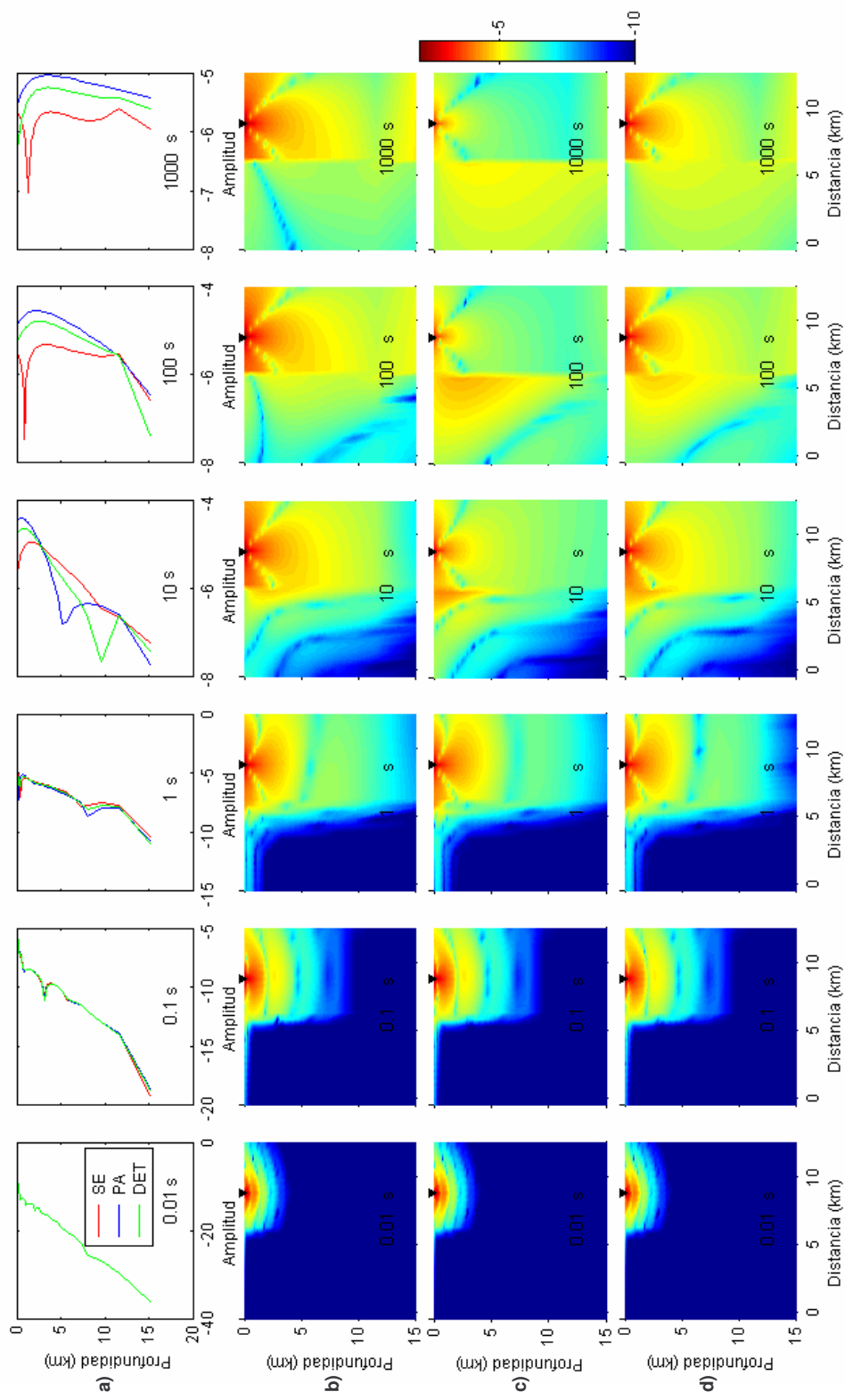


Figura 12. Matriz de sensibilidad para el modelo del contacto vertical, a) amplitud de la matriz de sensibilidad en función de la profundidad por periodo, debajo del sitio, b) modo Serie, c) modo Paralelo y d) Determinante. Sitio 9 (lado resistivo) a seis periodos distintos.

III.2.5 Respuesta de los promedios S-P

En la Figura 13 y Figura 14 se muestra en pseudosecciones la respuesta serie y paralelo, con dos y cuatro promedios recursivos, para el modelo de un contacto vertical. Como es de esperarse al aumentar el número de promedios las respuestas serie y paralelo se parecen más entre si y su parecido a la respuesta del determinante también es mayor (Figura 10).

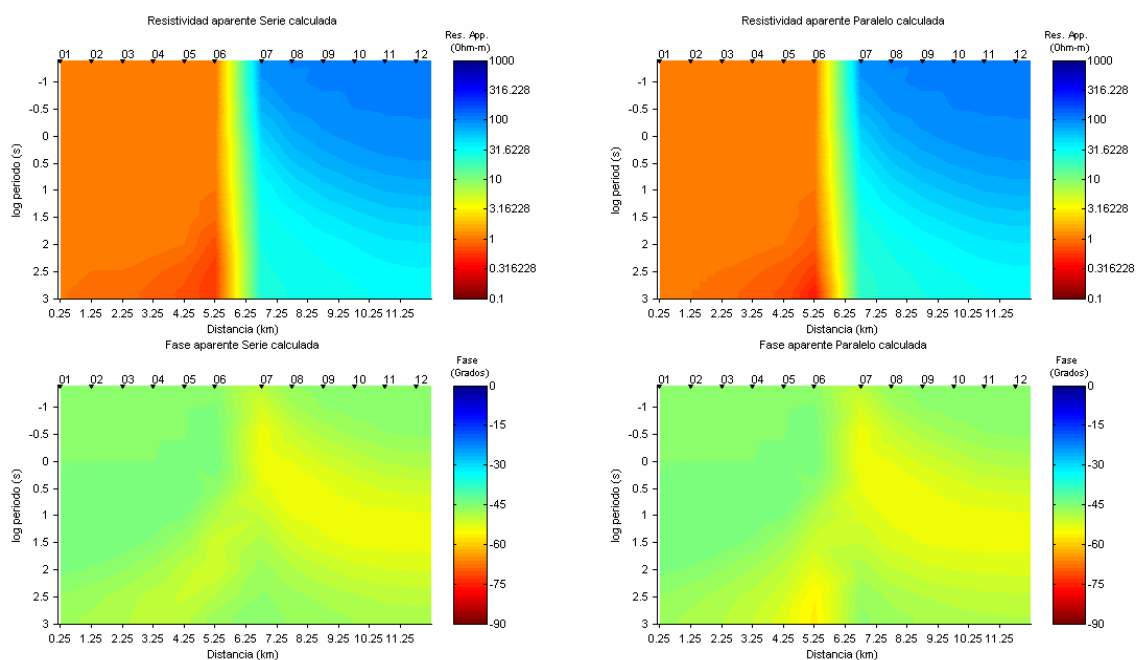


Figura 13. Respuesta S-P, dos promedios por frecuencia para modelo de un contacto vertical.

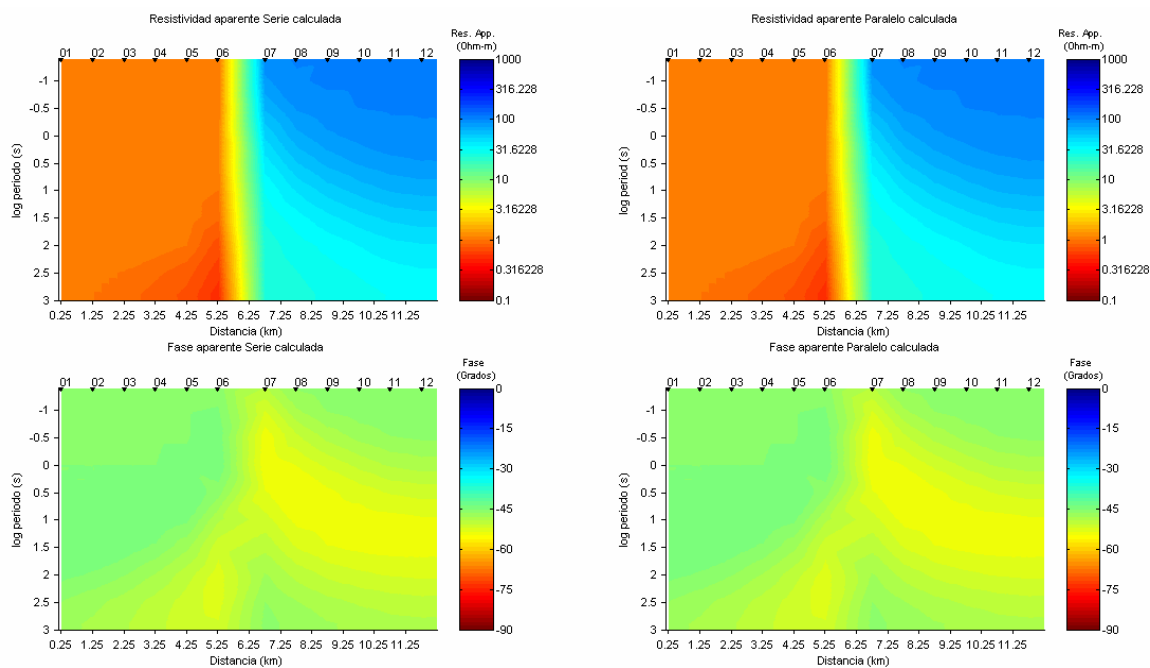


Figura 14. Respuesta S-P, cuatro promedios por frecuencia para modelo de un contacto vertical.

III.2.6 Matriz de sensibilidad promedios S-P

La Figura 15 y Figura 16 muestran las imágenes de la sensibilidad para las respuestas con dos y cuatro promedios para un sitio localizado sobre el bloque conductor del modelo. La Figura 17 y Figura 18 lo hacen para un sitio localizado sobre el bloque resistivo. Podemos observar que la diferencia entre las sensibilidades con dos y cuatro promedios no es significativa. La distribución de sensibilidad es muy parecida a la del determinante.

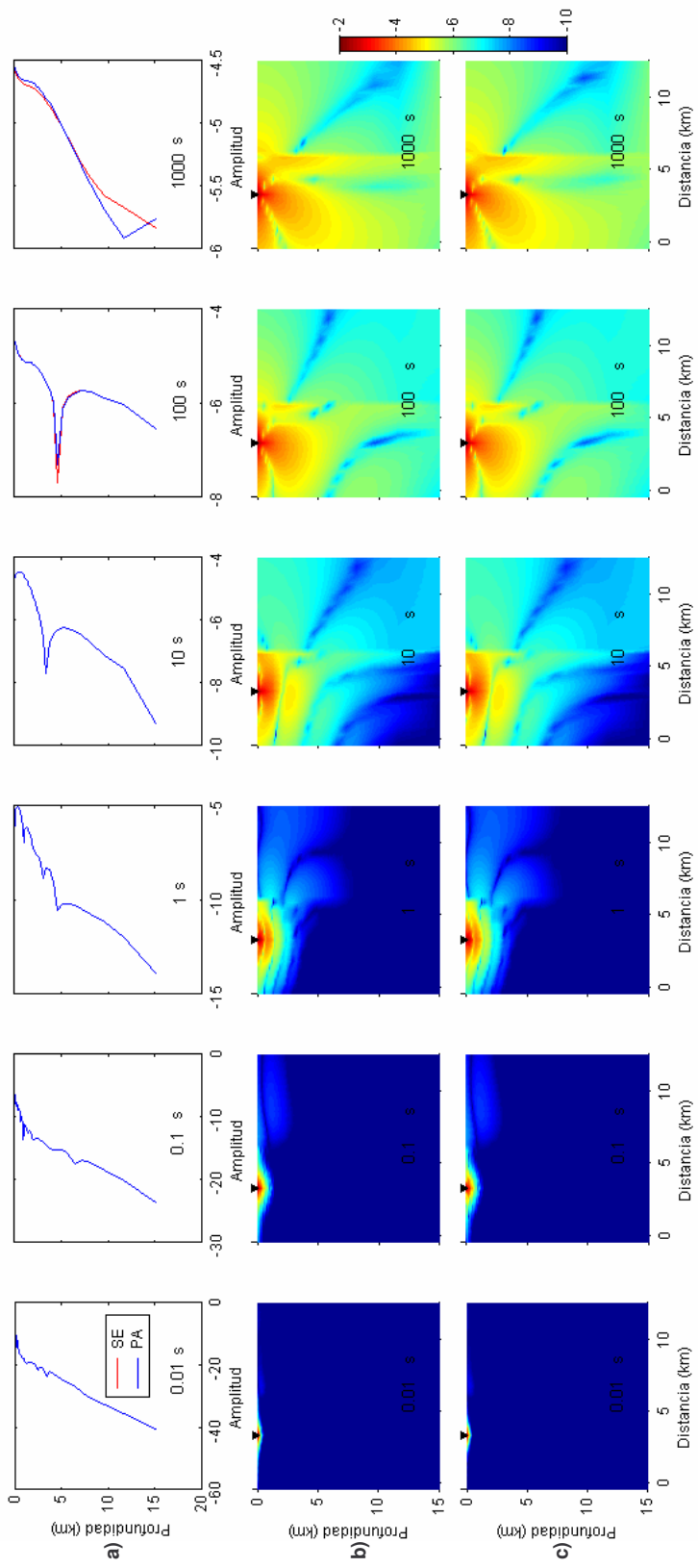


Figura 15. Matriz de sensibilidad dos promedios serie-paralelo, modelo contacto vertical. a) Amplitud de la matriz de sensibilidad en función de la profundidad por periodo, debajo del sitio, b) modo Serie y c) modo Paralelo. Sitio 4 (lado conductor) a seis periodos distintos.

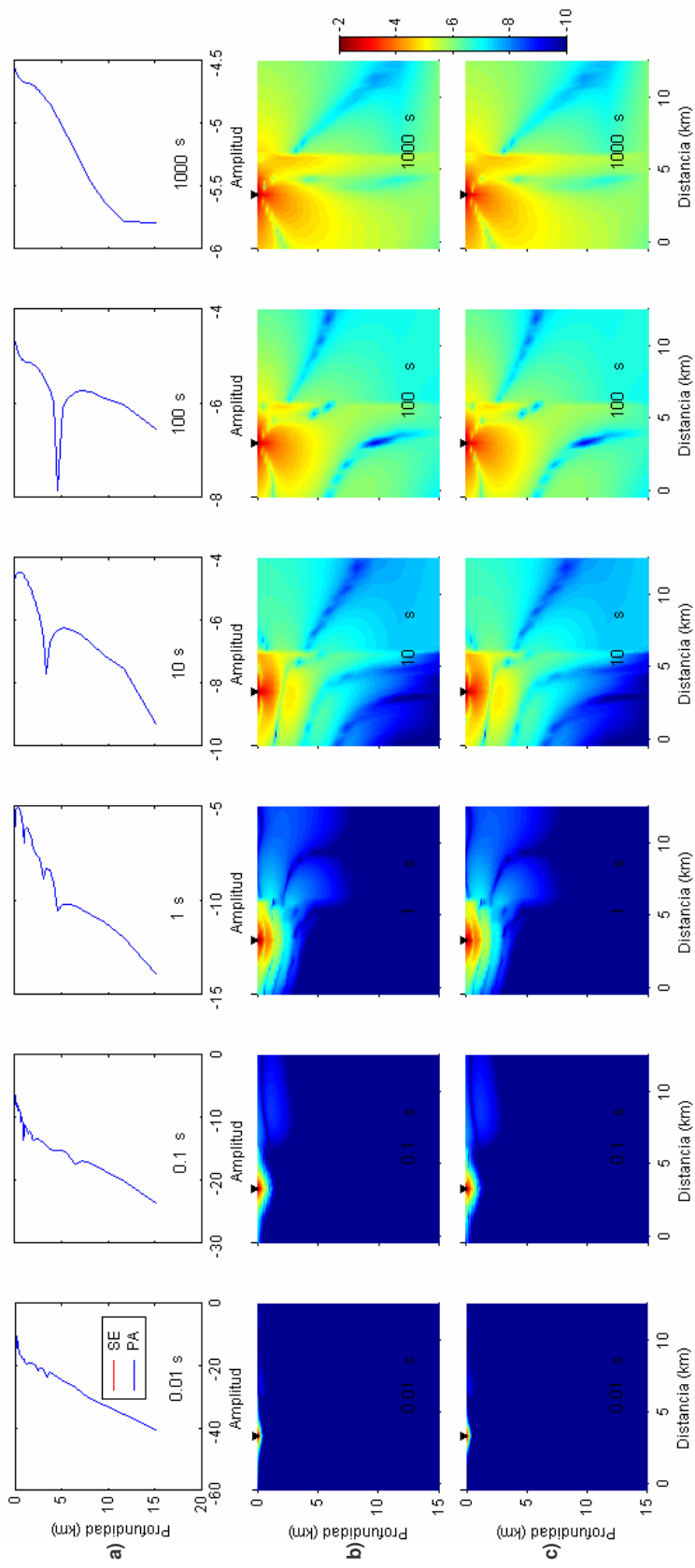


Figura 16. Matriz de sensibilidad cuatro promedios serie-paralelo, modelo contacto vertical. a) Amplitud de la matriz de sensibilidad en función de la profundidad por periodo, debajo Serie y c) modo Paralelo. Sitio 4 (lado conductor) a seis periodos distintos.

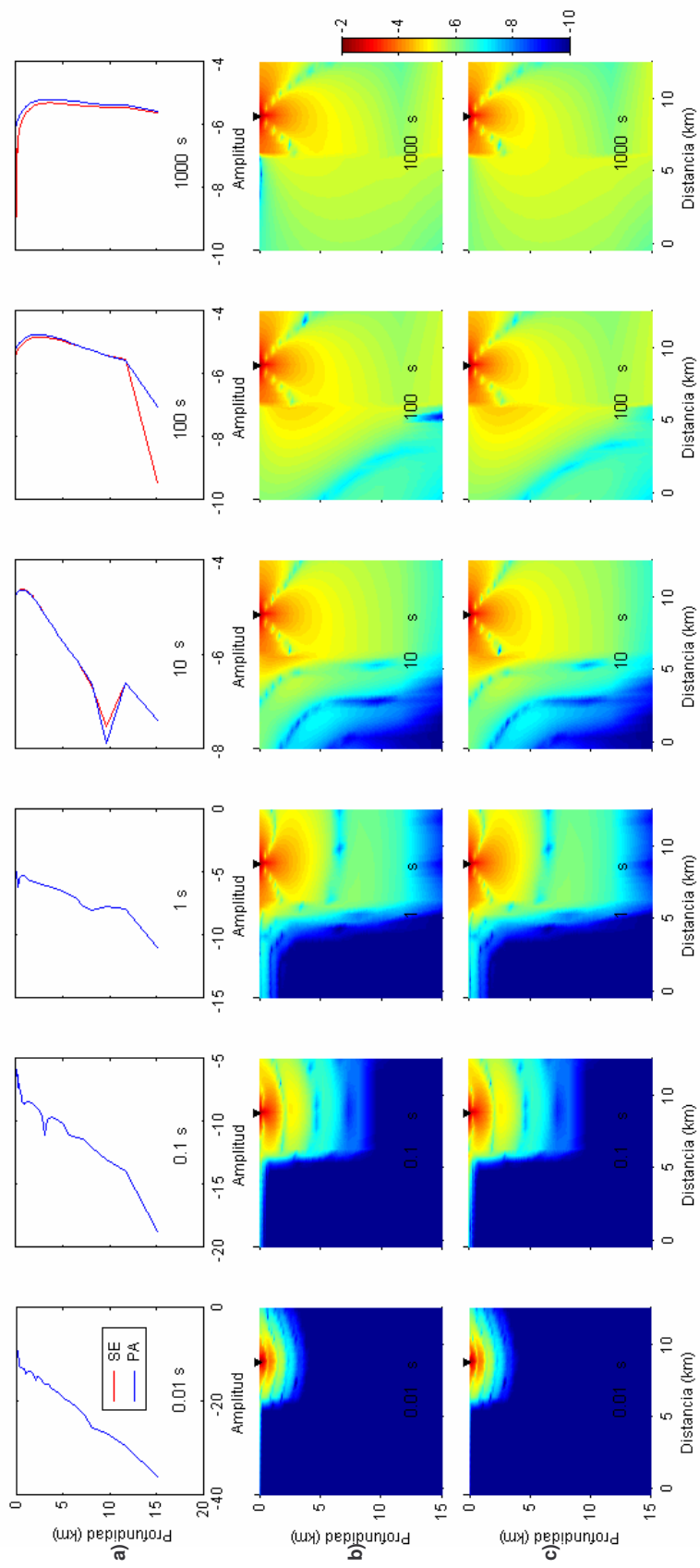


Figura 17. Matriz de sensibilidad dos promedios serie-paralelo, modelo contacto vertical. a) Amplitud de la matriz de sensibilidad en función de la profundidad por periodo, debajo del sitio, b) modo Serie y c) modo Paralelo. Sitio 9 (lado resistivo) a seis periodos distintos.

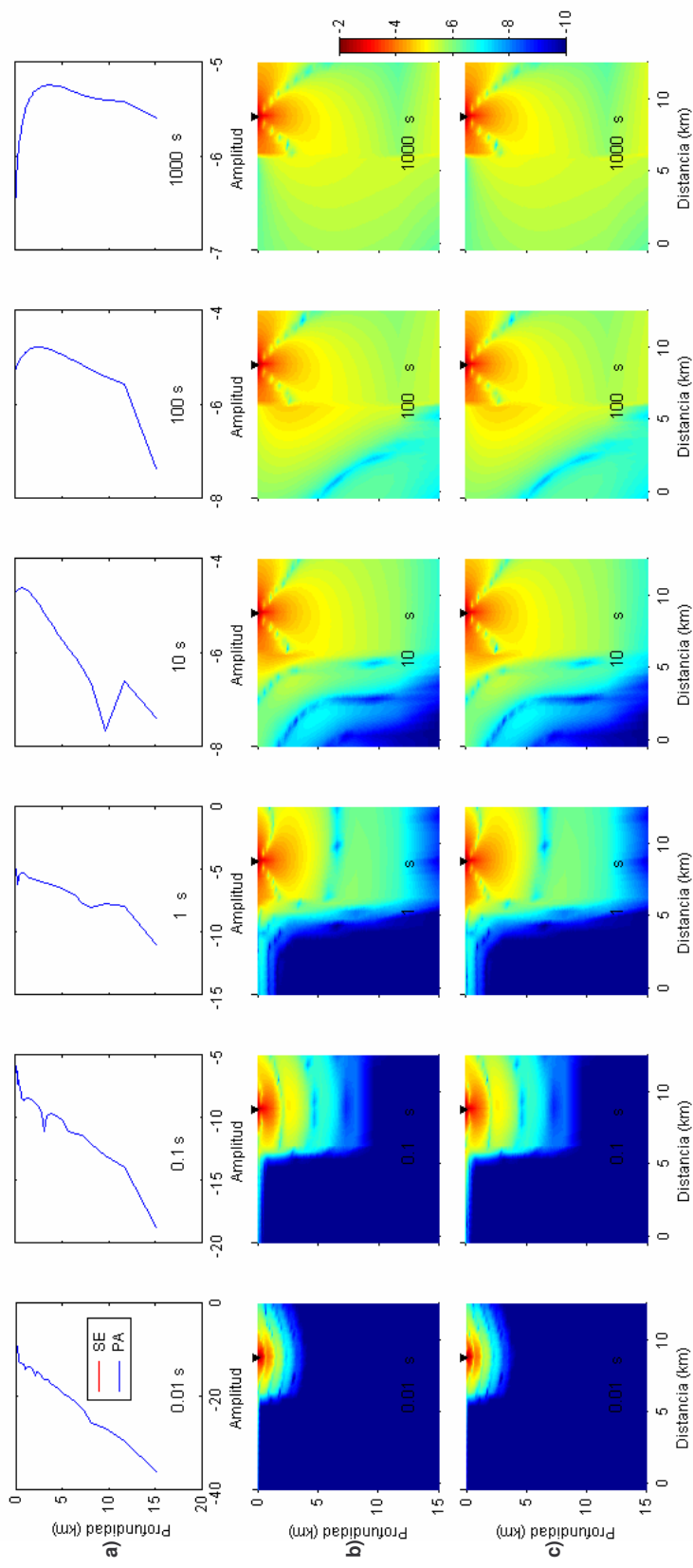


Figura 18. Matriz de sensibilidad cuatro promedios serie-paralelo, modelo contacto vertical. a) Amplitud de la matriz de sensibilidad en función de la profundidad por periodo, debajo Serie y c) modo Paralelo. Sitio 9 (lado resistivo) a seis periodos distintos.

III.2.7 Conclusiones para el modelo de un contacto lateral conductor-resistivo

Para el modelo de un contacto lateral conductor-resistivo podemos concluir lo siguiente:

Para sitios que se localizan del lado conductor la respuesta y la sensibilidad TE y serie son similares, mientras que la respuesta y sensibilidad TM es similar a paralelo.

En contraste, para sitios que se localizan en el lado resistivo la respuesta y la sensibilidad TM y serie son similares, mientras que TE se parece más al paralelo.

En sitios localizados en el bloque resistivo, el efecto del conductor lateral es muy significativo para el modo TE y un poco menos para el paralelo. El modo TM y el serie son menos sensibles a este efecto lateral y más a lo que se encuadra debajo del sitio de medida.

En general, en comparación con los modos TE y TM, las respuestas invariantes; serie, paralelo y determinante son menos sensibles a efectos laterales lejanos y más sensibles a lo que se tiene debajo del sitio de medida.

Por lo que respecta a los promedios recursivos S-P, su respuesta y sensibilidad no es significativamente diferente a la del determinante.

III.3 Modelo conductor horizontal

El modelo consiste de un cuerpo conductor horizontal de 1 ohm-m, con 1 km de espesor, dentro de un semiespacio de 100 ohm-m. El conductor se encuentra localizado a 4.4 km de profundidad, como se muestra en la Figura 19. La discretización utilizada es de 34 por 54 celdas, 12 sitios separados un kilómetro entre ellos y 11 periodos distribuidos entre 0.01 a 1000 s.

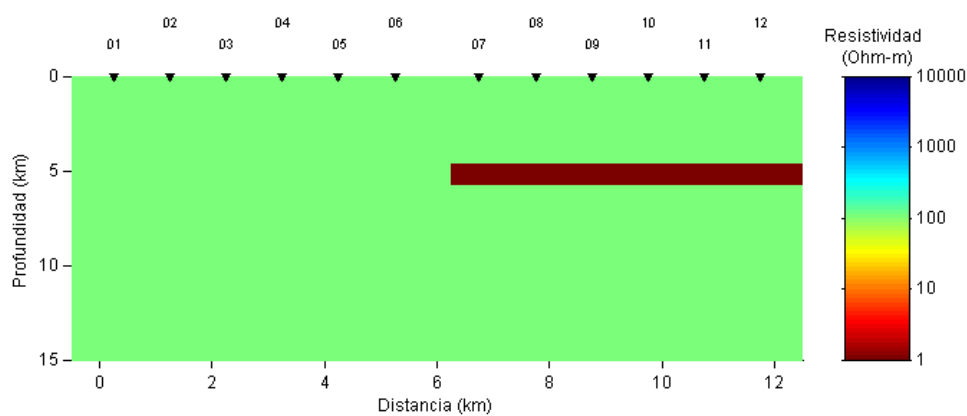


Figura 19. Modelo cuerpo conductor horizontal.

III.3.1 Respuesta TE-TM

La Figura 20 muestra en pseudosecciones la respuesta TE y TM para el modelo de un cuerpo conductor horizontal. El modo TE es mayormente afectado por la presencia del cuerpo conductor a periodos mayores a un segundo, en la resistividad aparente pero sobre todo en la fase. Para el modo TM la anomalía se presenta en los sitios que se encuentran sobre el conductor, en el extremo del perfil.

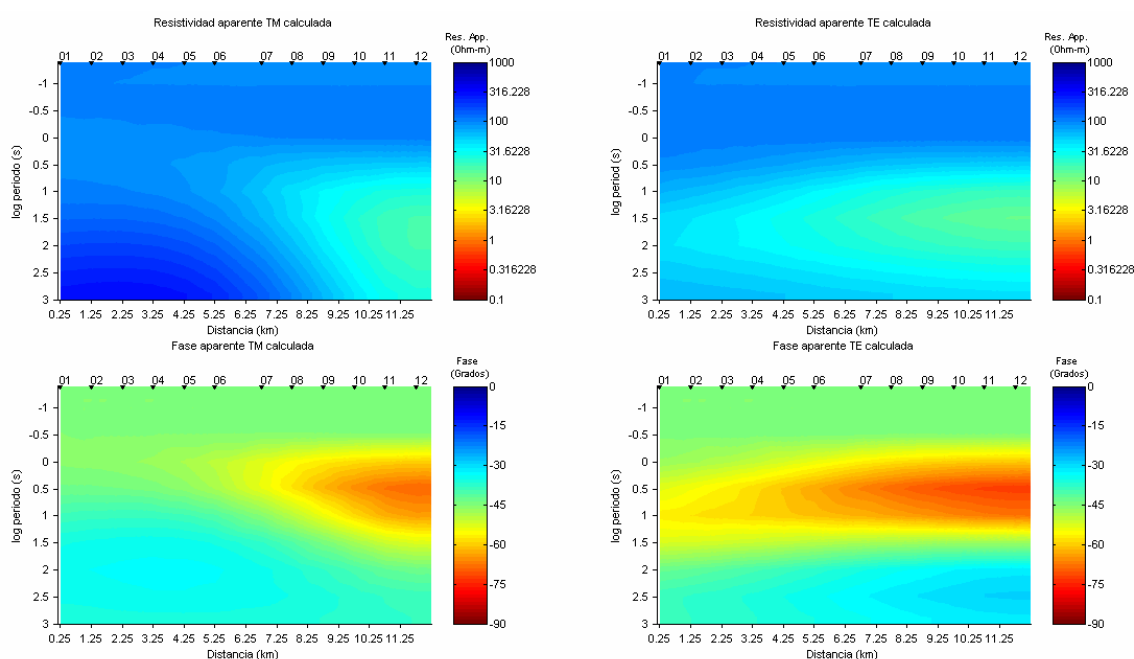


Figura 20. Respuesta TE-TM para modelo de un cuerpo conductor horizontal.

III.3.2 Matriz de sensibilidad TE-TM

La Figura 21 y Figura 22, muestran las imágenes de la matriz de sensibilidad del modelo de un cuerpo conductor horizontal para los modos TE y TM, en dos sitios distintos, uno en la parte homogénea del modelo (sitio 4) y otro sobre el cuerpo conductor horizontal (sitio 9), a seis periodos diferentes. A periodos menores a un segundo las funciones son similares a las mostradas para un modelo homogéneo. Al incrementarse el periodo la sensibilidad al conductor empieza a manifestarse sobre todo en el modo TE, tanto para un sitio encima del conductor como cuando el sitio se encuentra sobre el medio homogéneo alejado de él. Podemos decir que el modo TE es fuertemente afectado por la presencia del conductor horizontal. El modo TM se comporta de manera diferente, la sensibilidad en el cuerpo conductor solo es significativa cuando el sitio de observación se encuentra arriba de él.

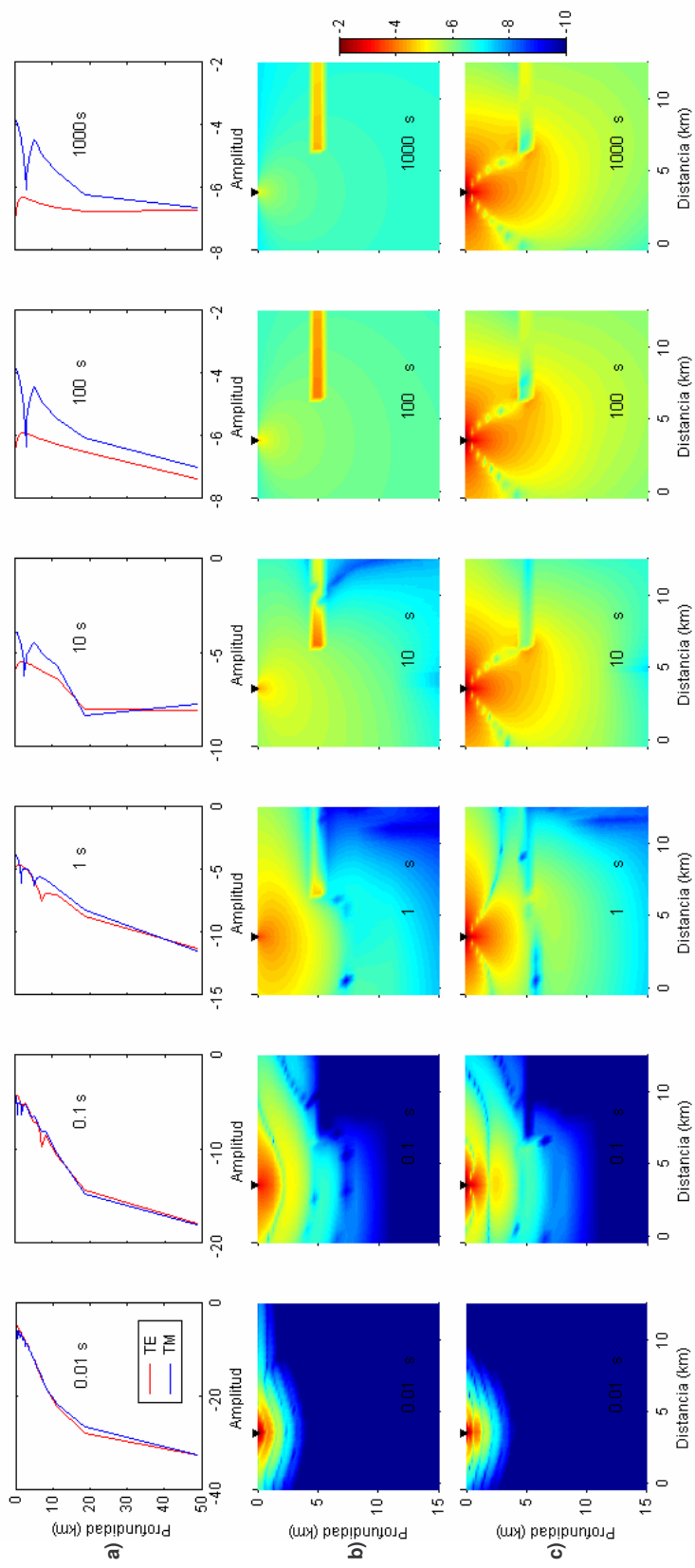


Figura 21. Matriz de sensibilidad modo TE y TM, modelo cuerpo conductor horizontal. a) Amplitud de la matriz de sensibilidad en función de la profundidad por periodo, debajo del sitio, b) modo TE y c) modo TM. Sitio 4 a seis periodos distintos.

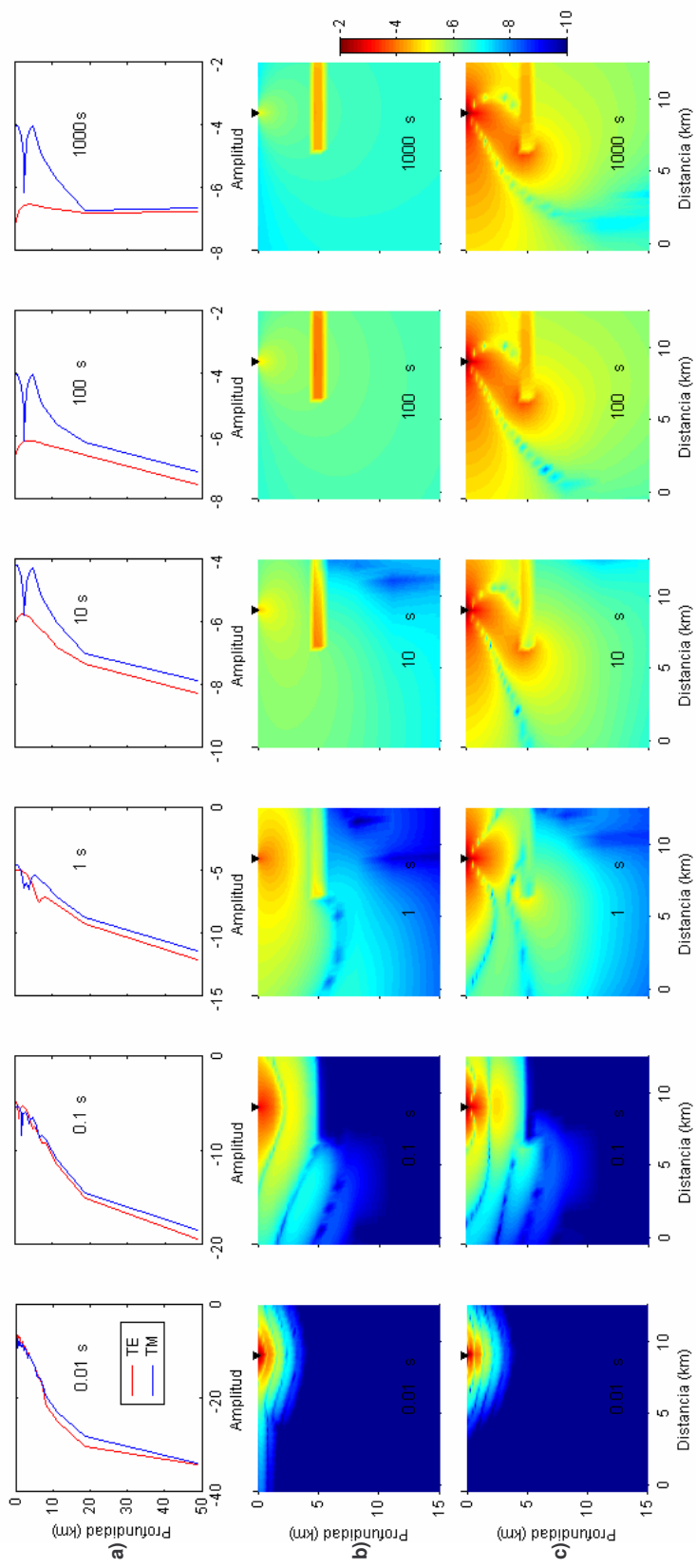


Figura 22. Matriz de sensibilidad modo TE y TM, modelo cuerpo conductor horizontal. a) Amplitud de la matriz de sensibilidad en función de la profundidad por periodo, debajo del sitio, b) modo TE y c) modo TM. Sitio 9 a seis periodos distintos.

III.3.3 Respuesta S-P y determinante

La Figura 23 muestra en pseudosecciones la respuesta serie y paralelo para el modelo de un cuerpo conductor horizontal. Observamos que ambas respuestas son afectados de manera muy similar. Las anomalías en resistividad aparente y fase para la respuesta paralelo están un poco más extendidas hacia la izquierda dentro del medio homogéneo.

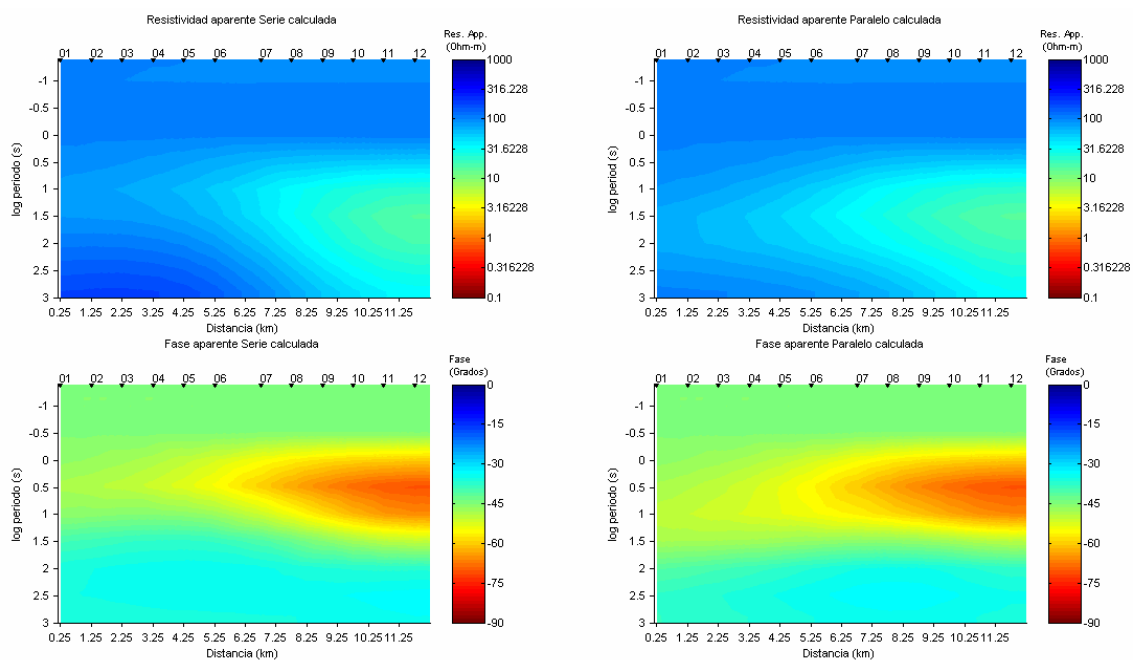


Figura 23. Respuesta S-P para modelo de un cuerpo conductor horizontal.

La Figura 24 muestra en pseudosección la respuesta del determinante, en la que observamos una anomalía de resistividad aparente similar a la de la respuesta paralelo y una anomalía en la fase un poco más parecida a la de la respuesta serie. Las respuestas del determinante son congruentes con la idea de que la resistividad aparente es promedio geométrico de las resistividades aparentes s-p y la fase un promedio aritmético de las fases s-p.

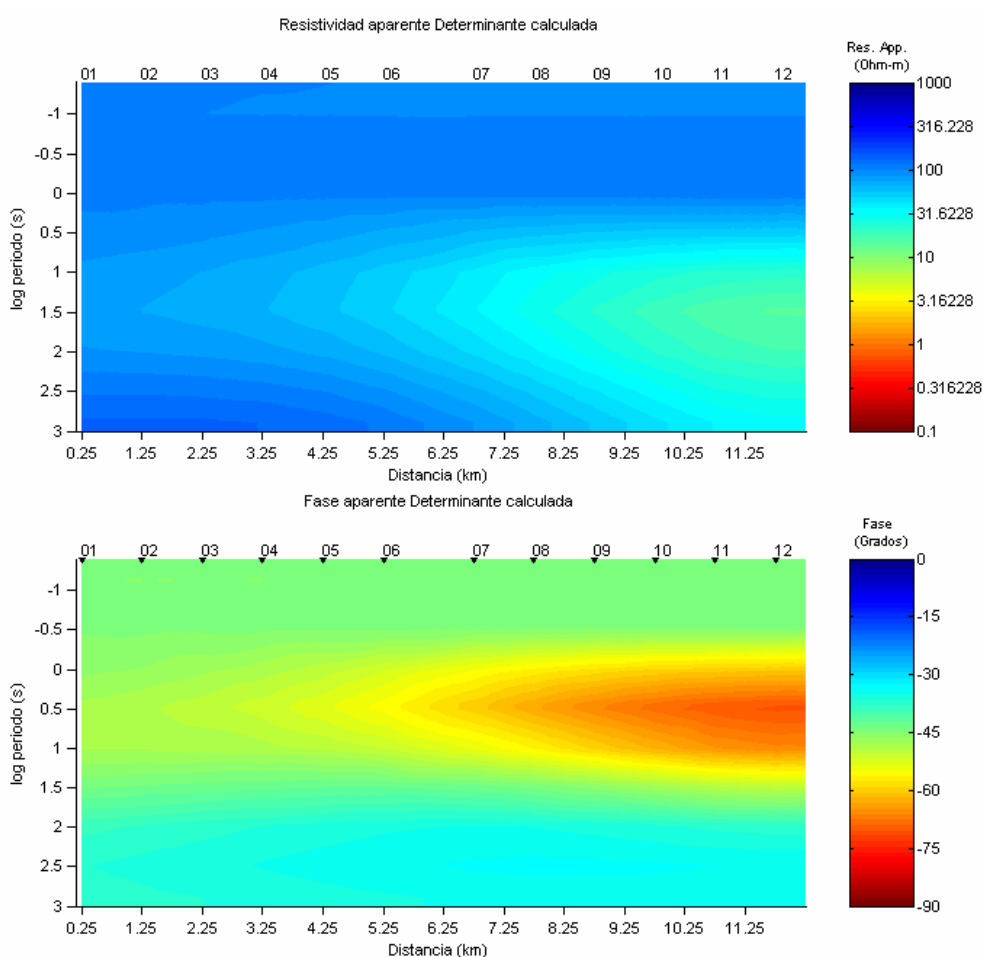


Figura 24. Respuesta determinante para modelo de un cuerpo conductor horizontal.

III.3.4 Matriz de sensibilidad S-P y determinante

La Figura 25 y Figura 26, muestran las imágenes de la matriz de sensibilidad del modelo de un cuerpo conductor horizontal para los modos serie, paralelo y determinante, en dos sitios distintos, uno en la parte homogénea del modelo (sitio 4) y otro sobre el cuerpo conductor horizontal (sitio 9), a seis periodos diferentes. A periodos menores a un segundo las funciones son similares a las mostradas para un modelo homogéneo. Al aumentar el periodo la sensibilidad en el cuerpo conductor aumenta. La respuesta paralelo es más sensible al cuerpo conductor, independientemente de la ubicación del sitio de medida. En cambio la respuesta serie es sensible al conductor principalmente cuando el sitio se encuentra encima de él. Podemos decir que el modo paralelo es fuertemente afectado tanto por lo que se encuentra localmente debajo del sitio como por el cuerpo conductor a profundidad. En contraste, el modo TE ve afectado solamente por el conductor profundo y muy poco por el efecto local. La respuesta serie, al igual que el modo TM, son mayormente afectados por el conductor profundo cuando el sitio de medida se encuentra encima de él.

La sensibilidad del determinante al cuerpo conductor es nuevamente un promedio de las sensibilidades s-p, es parecida a la sensibilidad paralelo y mejor que la sensibilidad serie cuando el sitio de medida se encuentra sobre el medio homogéneo alejado del conductor profundo.

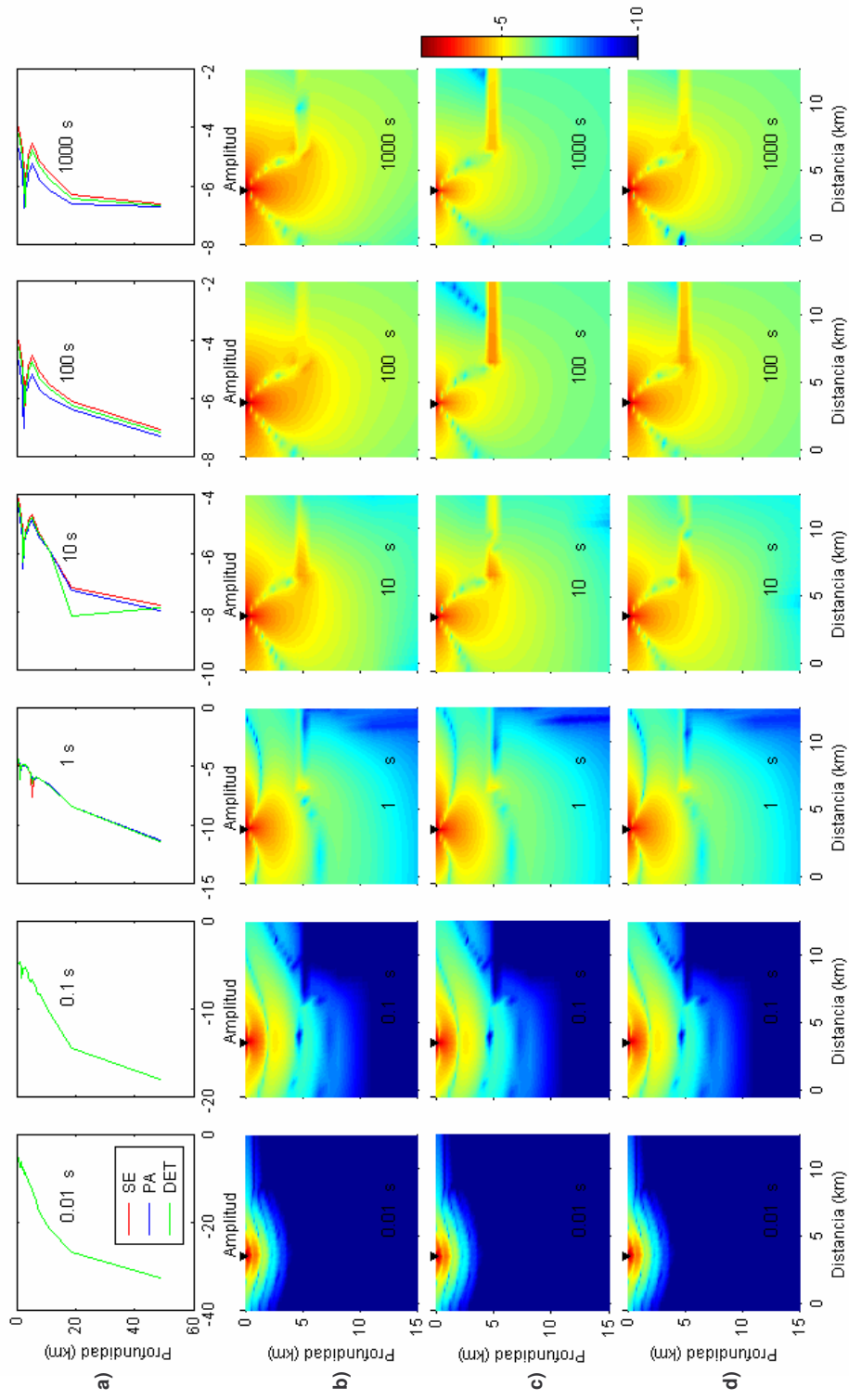


Figura 25. Matriz de sensibilidad modos serie, paralelo y determinante, modelo cuerpo conductor horizontal. a) Amplitud de la matriz de sensibilidad en función de la profundidad por periodo, debajo del sitio, b) modo Serie, c) modo Paralelo y d) Determinante. Sitio 4 a seis periodos distintos.

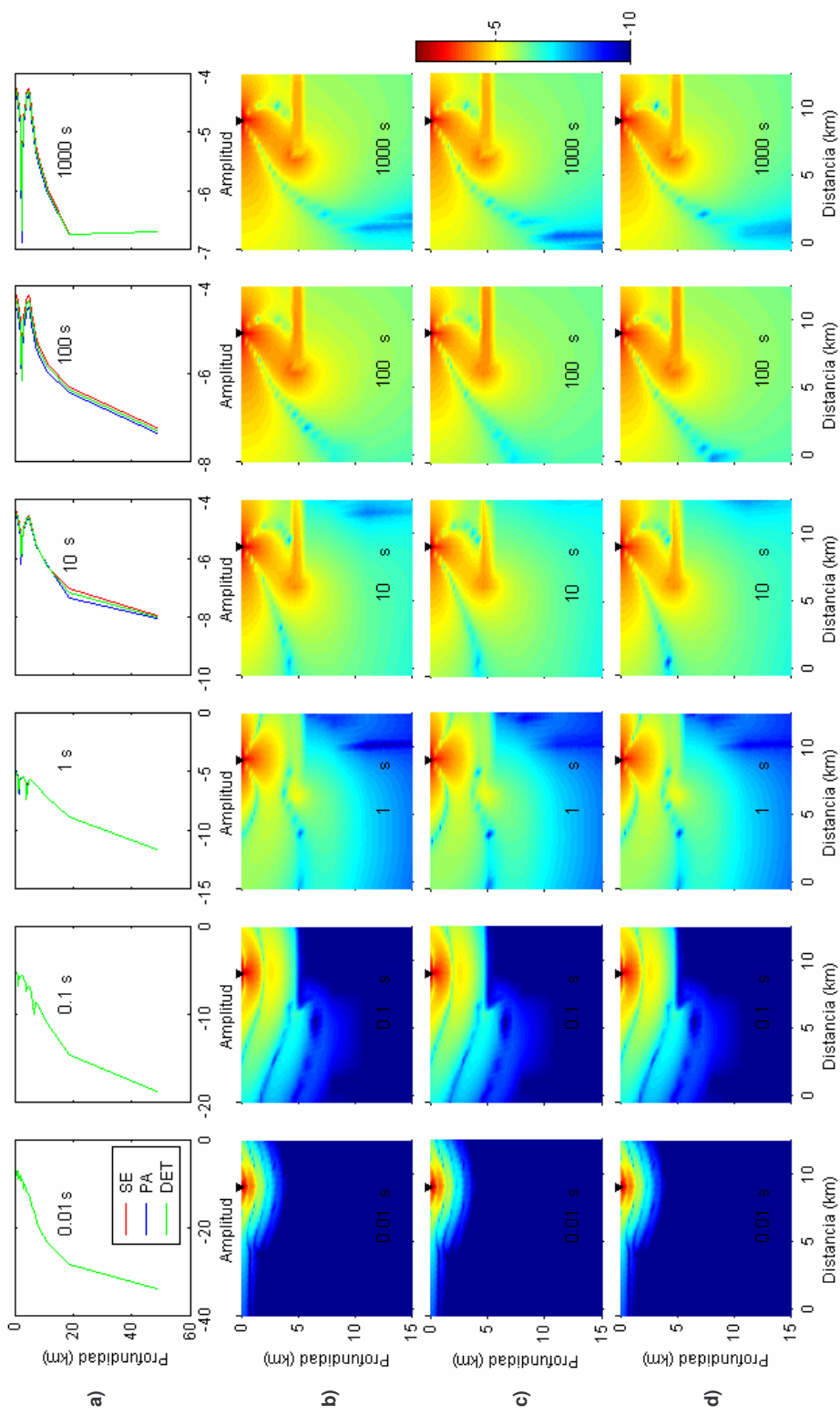


Figura 26. Matriz de sensibilidad, serie, paralelo y determinante, modelo cuerpo conductor horizontal. a) Amplitud de la matriz de sensibilidad en función de la profundidad por periodo, debajo del sitio, b) modo Serie, c) modo Paralelo y d) Determinante. Sitio 9 a seis periodos distintos.

III.3.5 Respuesta promedios S-P

La Figura 27 y Figura 28 muestran en pseudosecciones la respuesta serie y paralelo, con dos y cuatro promedios recursivos para el modelo de un cuerpo conductor horizontal. Observamos la anomalía debida al cuerpo conductor horizontal a periodos mayores a un segundo. Las respuestas son muy parecidas entre si y no tienen diferencias significativas respecto a las respuestas del determinante.

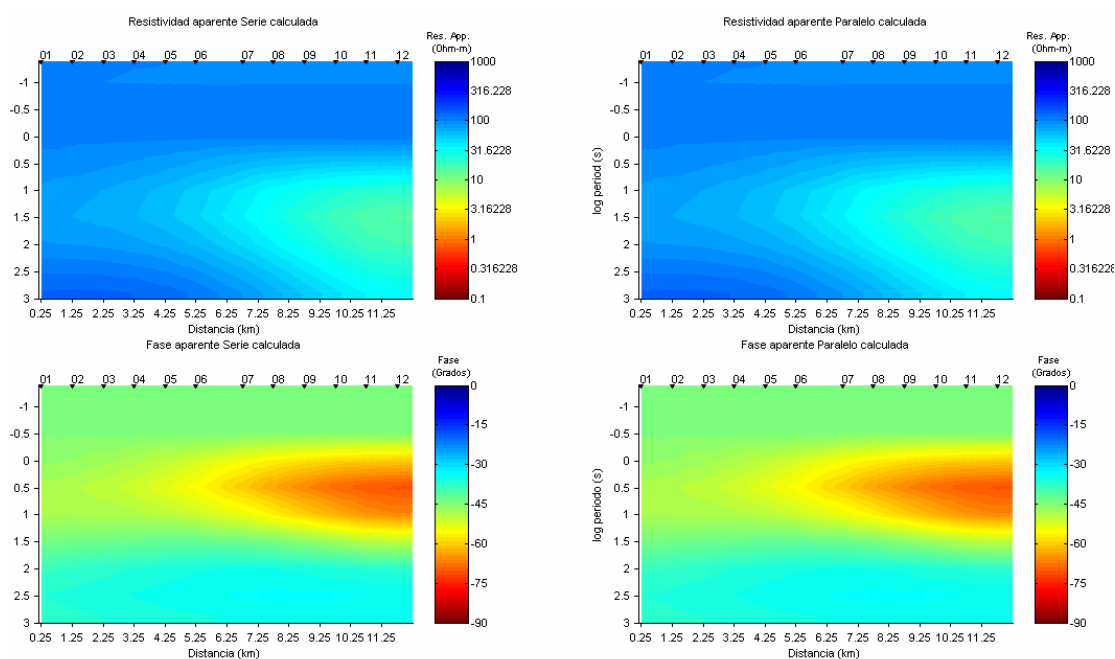


Figura 27. Respuesta S-P, dos promedios por frecuencia para el modelo de un cuerpo conductor horizontal.

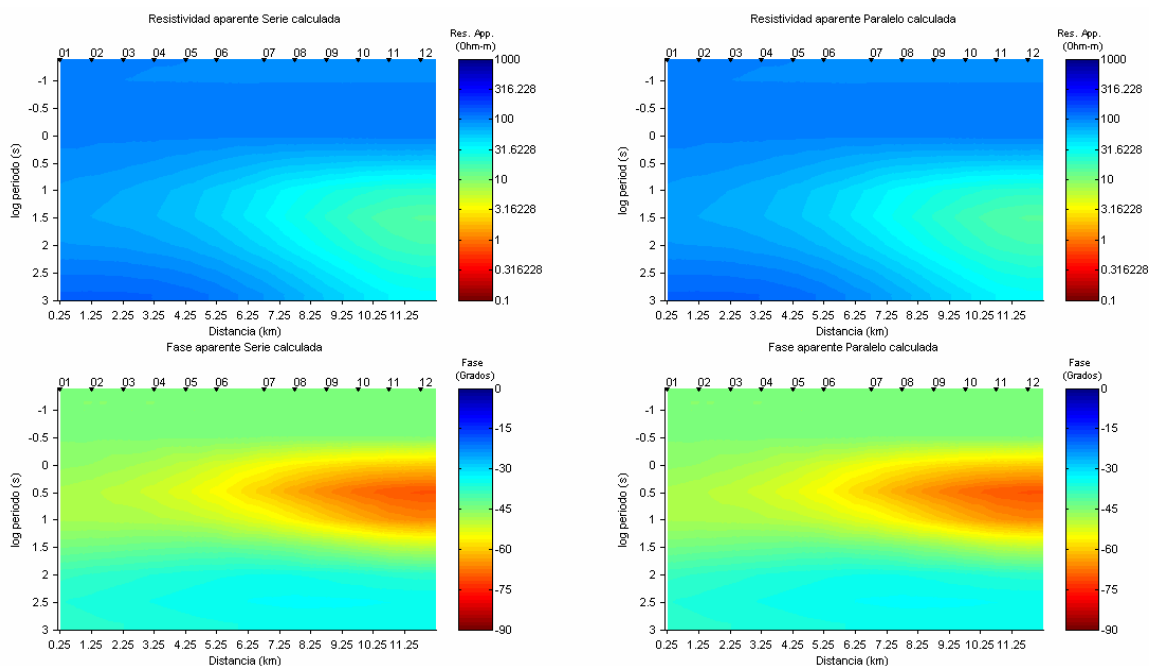


Figura 28. Respuesta S-P, cuatro promedios por frecuencia para modelo de un cuerpo conductor horizontal.

III.3.6 Matriz de sensibilidad promedios S-P

La Figura 29 a Figura 32 muestran las imágenes de la sensibilidad para dos y cuatro promedios, para un sitio localizado sobre la parte homogénea y para un sitio localizado sobre el cuerpo conductor horizontal. Podemos observar que el efecto de realizar los promedios recursivos no produce resultados significativamente distintos a los obtenidos con el determinante.

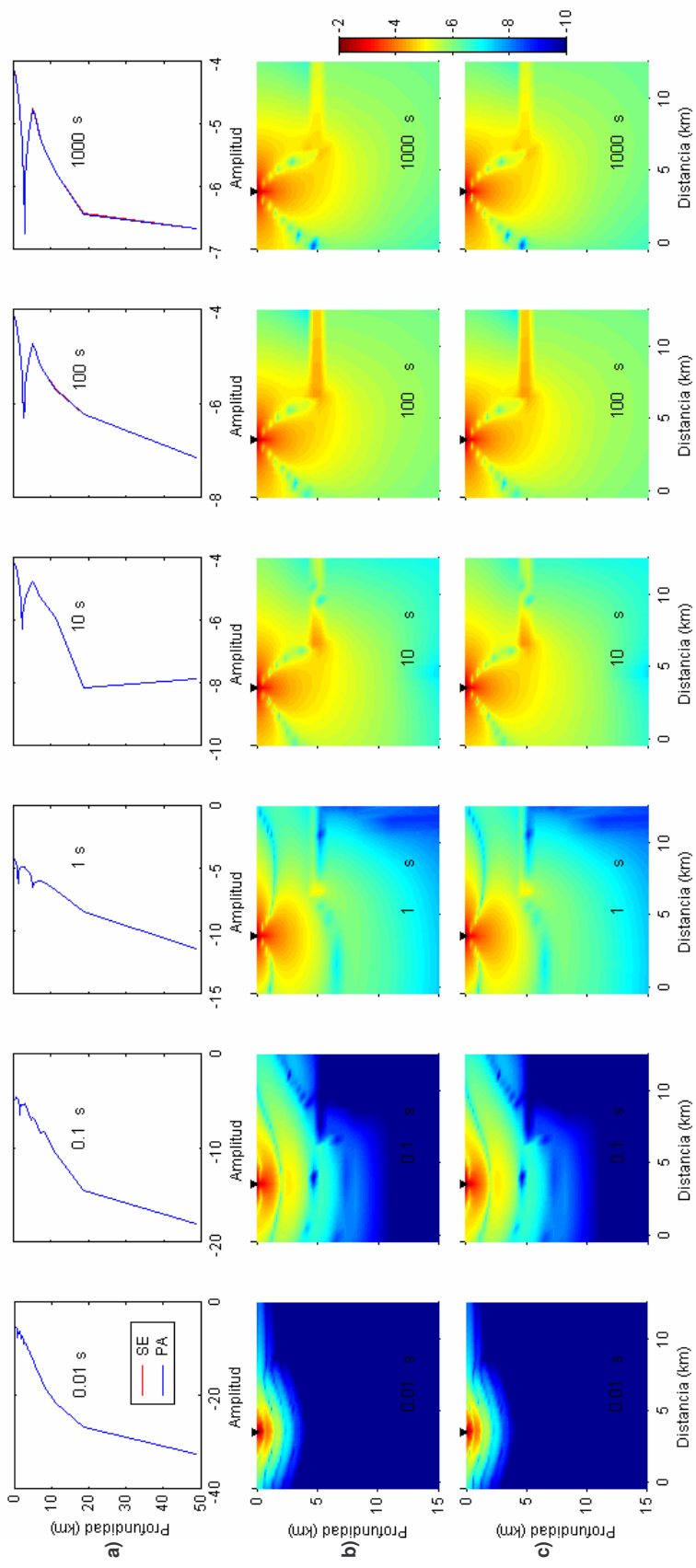


Figura 29. Matriz de sensibilidad dos promedios serie-paralelo, modelo cuerpo conductor horizontal. a) Amplitud de la matriz de sensibilidad en función de la profundidad por periodo, debajo del sitio, b) modo Serie y c) modo Paralelo. Sitio 4 a seis periodos distintos.

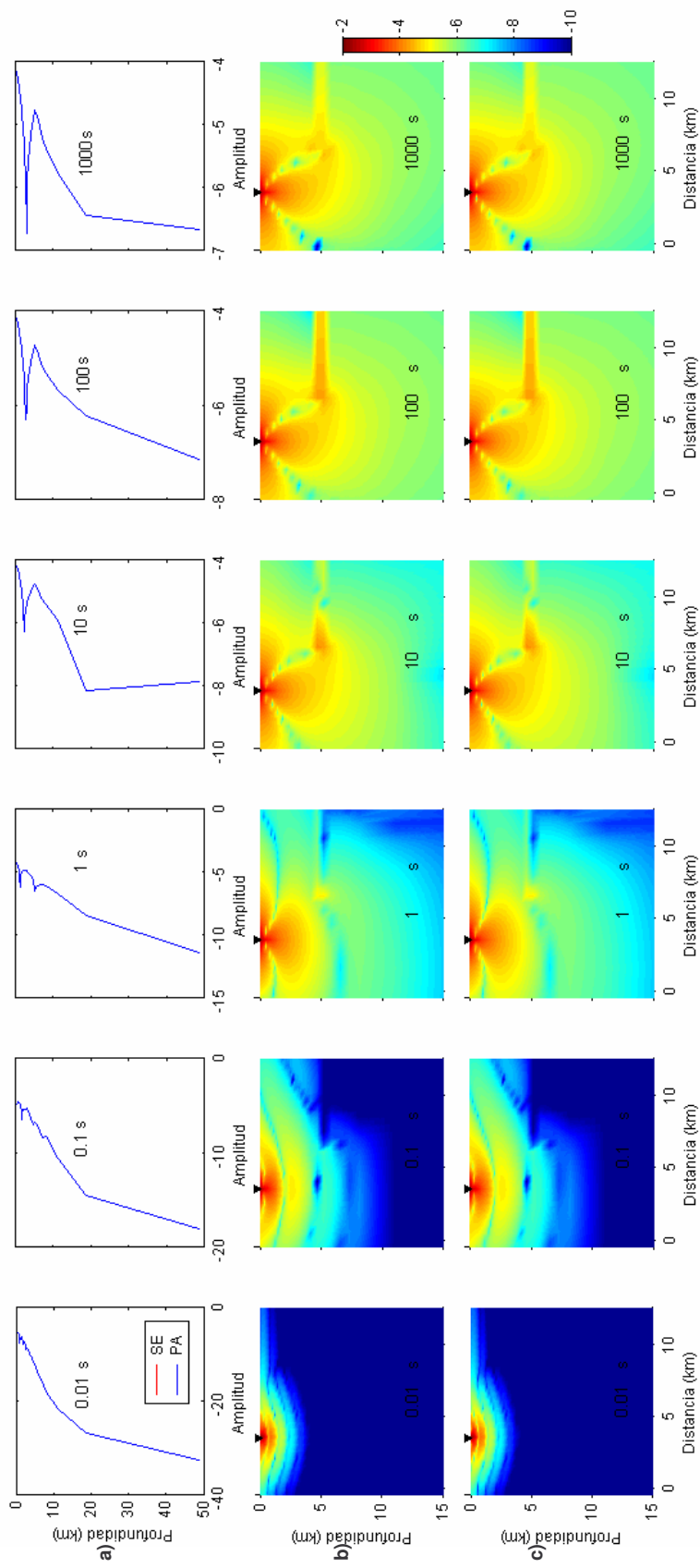


Figura 30. Matriz de sensibilidad cuatro promedios serie-paralelo, modelo cuerpo conductor horizontal. a) Amplitud de la matriz de sensibilidad en función de la profundidad por periodo, debajo del sitio, b) modo Serie y c) modo Paralelo Sitio 4 a seis periodos distintos.

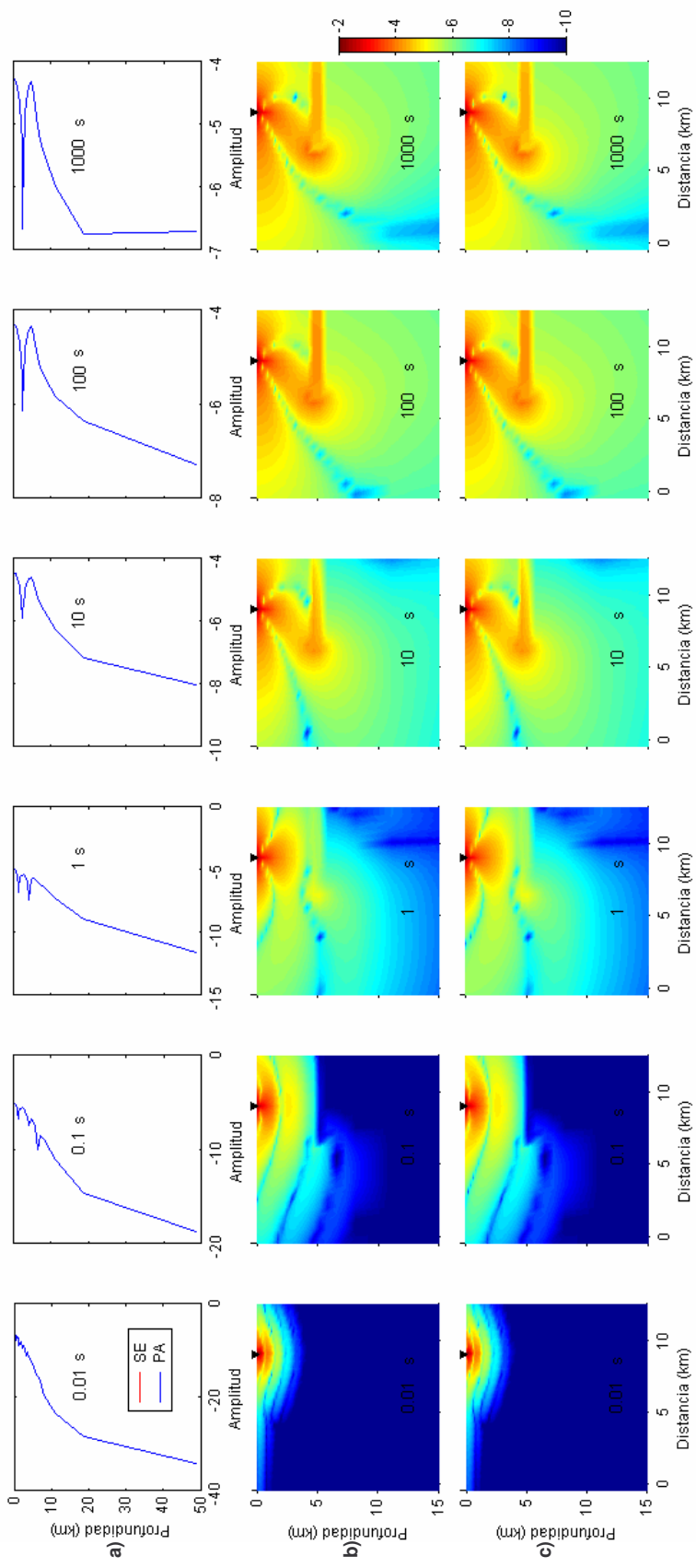


Figura 31. Matriz de sensibilidad dos promedios serie-paralelo, modelo cuerpo conductor horizontal. a) Amplitud de la matriz de sensibilidad en función de la profundidad por periodo, debajo del sitio, b) modo Serie y c) modo Paralelo. Sitio 9 a seis periodos distintos.

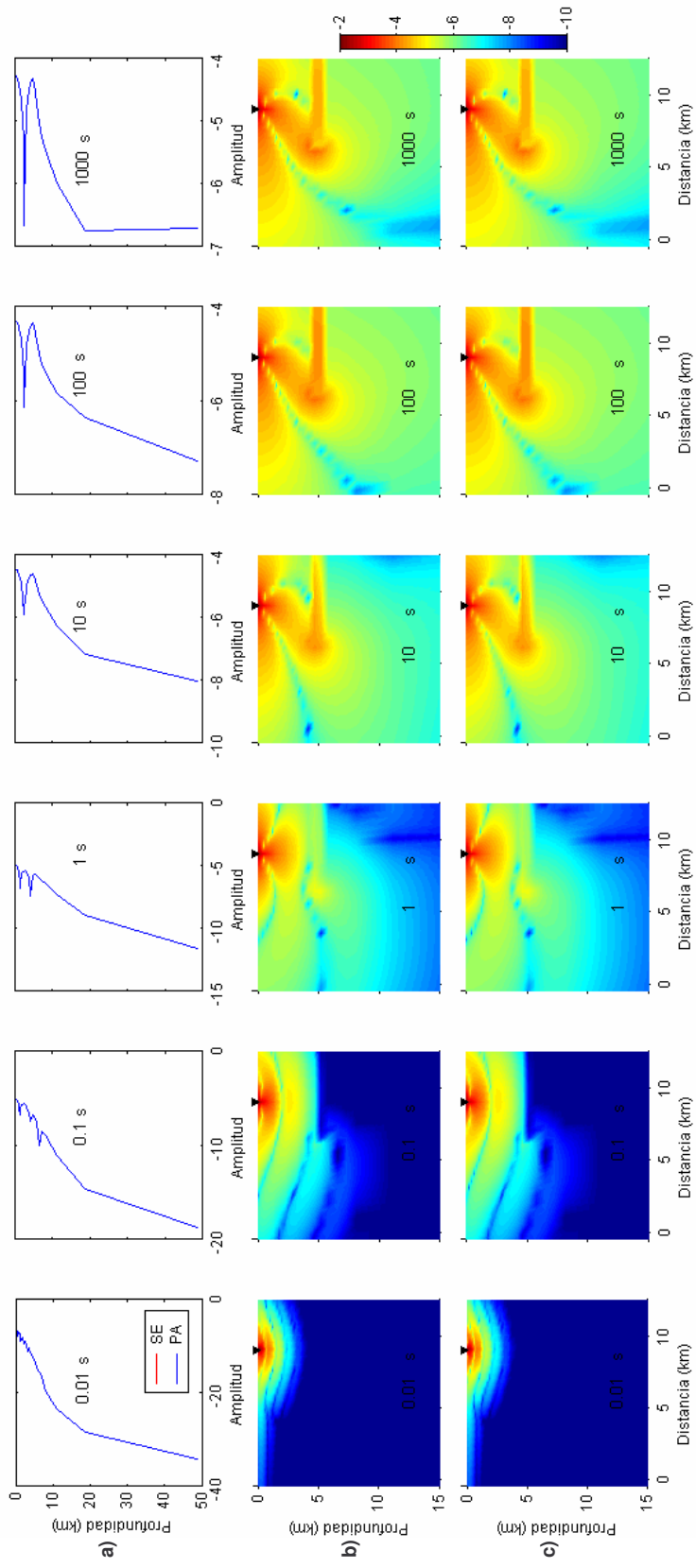


Figura 32. Matriz de sensibilidad cuatro promedios serie-paralelo, modelo cuerpo conductor horizontal. a) Amplitud de la matriz de sensibilidad en función de la profundidad por periodo, debajo del sitio, b) modo Serie y c) modo Paralelo. Sitio 9 a seis periodos distintos.

III.3.7 Conclusiones para el modelo de un cuerpo conductor horizontal

Para el modelo de un cuerpo conductor horizontal podemos concluir lo siguiente:

El modo TE se encuentra mayormente afectado por la presencia del cuerpo conductor horizontal, mientras que el modo TM solo siente el cuerpo conductor cuando se encuentra arriba de él.

La respuesta paralelo es fuertemente afectada tanto por lo que se encuentra localmente debajo del sitio de medida, como por el cuerpo conductor profundo. A diferencia del modo TE, el cual se ve afectado solamente por el cuerpo conductor profundo y muy poco por efectos locales. Por otra parte la respuesta serie siente el cuerpo conductor profundo principalmente cuando el sitio de medida se encuentra arriba de él.

La respuesta y sensibilidad de los promedios S-P es semejante a la respuesta y sensibilidad del determinante.

III.4 Modelo conductor vertical

El modelo consiste de un cuerpo conductor vertical de 1 ohm-m con dimensiones de 1 km de ancho por 4.5 km de espesor, dentro de un semiespacio de 100 ohm-m. La cima del cuerpo se localiza a 400 metros de profundidad, localizado como se muestra en la Figura 33, la discretización utilizada es de 34 por 54 celdas, 13 sitios separados un kilómetro entre ellos y 11 periodos distribuidos entre 0.01 a 1000 segundos.

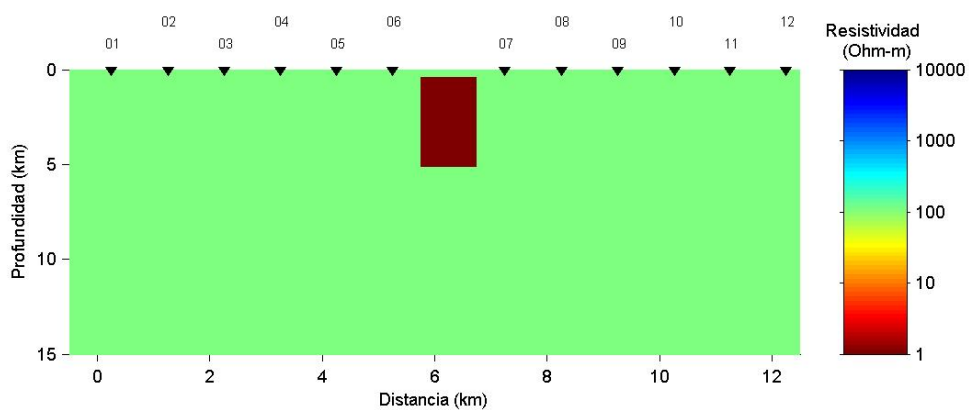


Figura 33. Modelo cuerpo conductor vertical.

III.4.1 Respuesta TE-TM

La Figura 34 muestra en pseudosecciones la respuesta TE y TM para el modelo de un cuerpo conductor vertical. El modo TE es muy afectado por la presencia del cuerpo conductor, mientras que la anomalía TM es sumamente débil y solo se presenta en sitios muy cercanos al cuerpo.

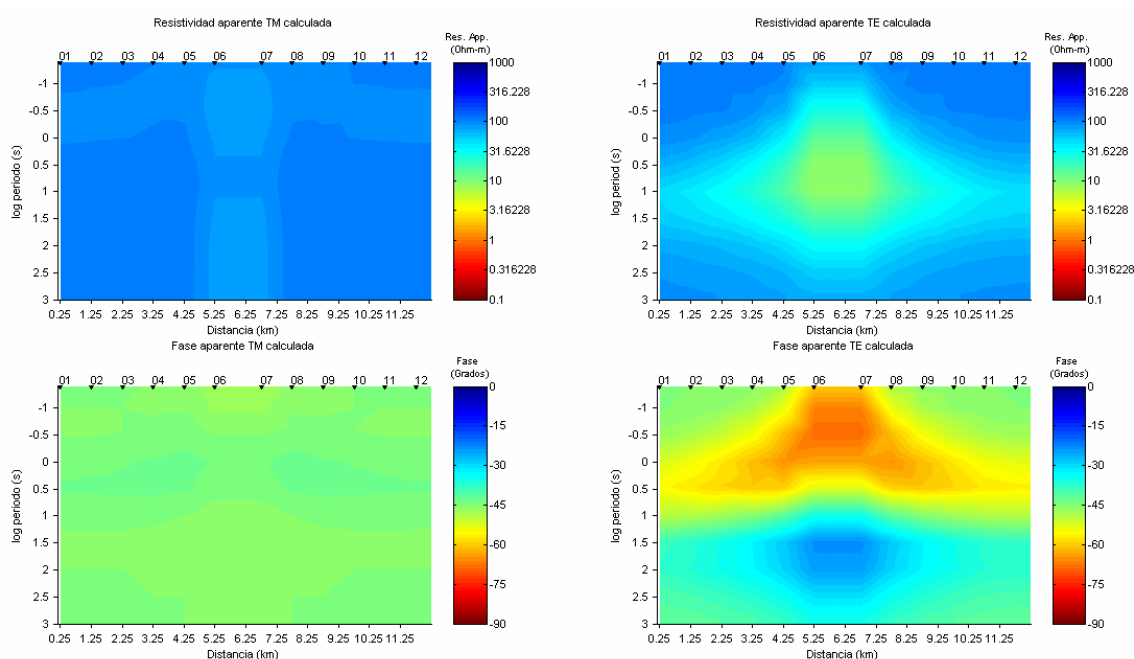


Figura 34. Respuesta TE-TM para modelo de un cuerpo conductor vertical.

III.4.2 Matriz de sensibilidad TE-TM

La Figura 35 muestra las imágenes de la matriz de sensibilidad del modelo de un cuerpo conductor vertical para los modos TE y TM, a seis periodos diferentes, en uno de los sitios (sitio 4).

A periodos menores a un segundo las funciones de sensibilidad son similares a las mostradas para un modelo homogéneo. Al aumentar el período el modo TE es muy sensible al cuerpo conductor, mientras que el modo TM es afectado solamente por lo que se encuentra directamente debajo del sitio de medida y prácticamente insensible a la presencia del conductor vertical.

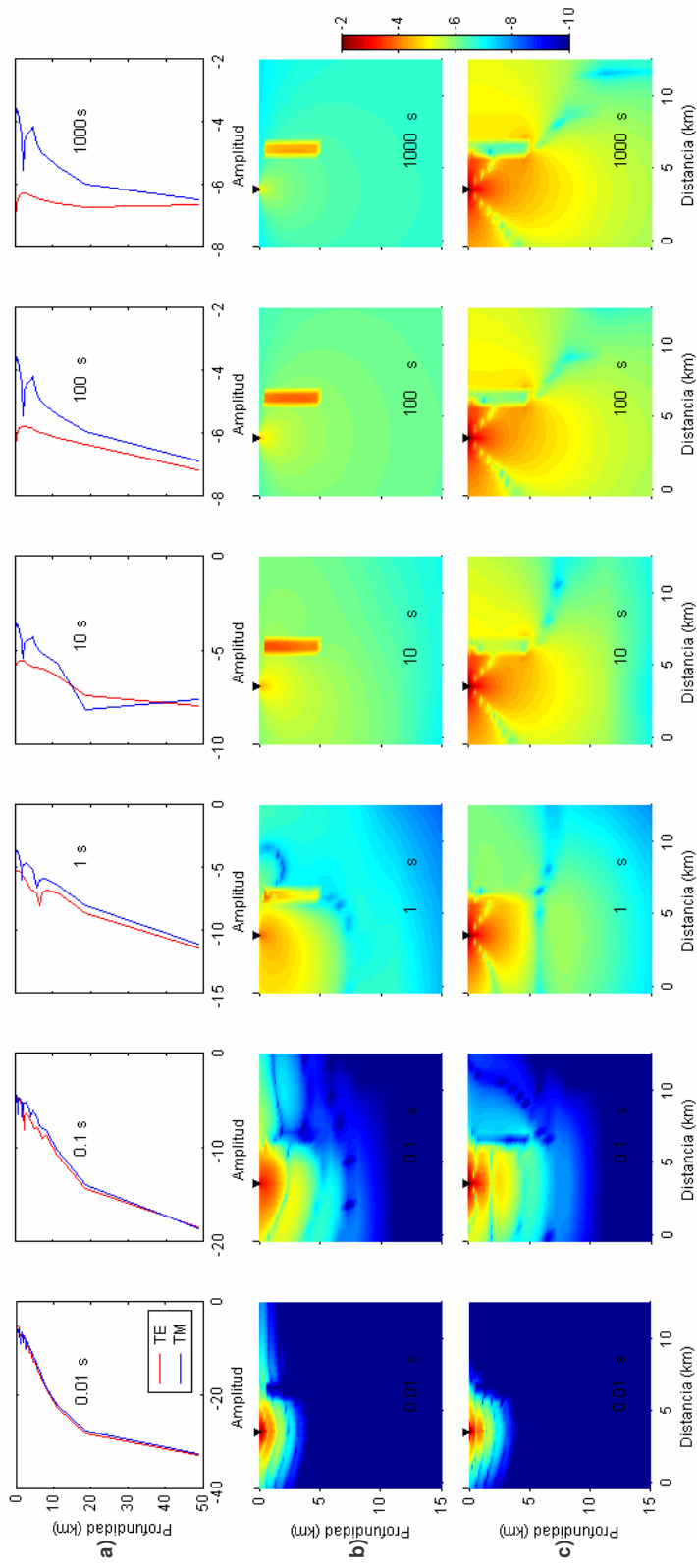


Figura 35. Matriz de sensibilidad modo TE y TM, modelo cuerpo conductor vertical. a) Amplitud de la matriz de sensibilidad en función de la profundidad por periodo, debajo del sitio, b) modo TE y c) modo TM. Sitio 4 a seis periodos distintos.

III.4.3 Respuesta S-P y determinante

La Figura 36 muestra en pseudosecciones la respuesta S y P para el modelo de un cuerpo conductor vertical. Observamos que tanto la respuesta serie como la paralelo presentan anomalías tanto en resistividad como en fase, aunque las anomalías de la respuesta paralelo son más intensas. Comparativamente con las respuestas TE y TM, la anomalía paralelo es menos intensa que la TE, mientras que la anomalía serie es más intensa que la TM. Es decir se hace evidente un compromiso, la respuesta serie es superior a la TM pero el costo que la respuesta paralelo pierde definición respecto al TE.

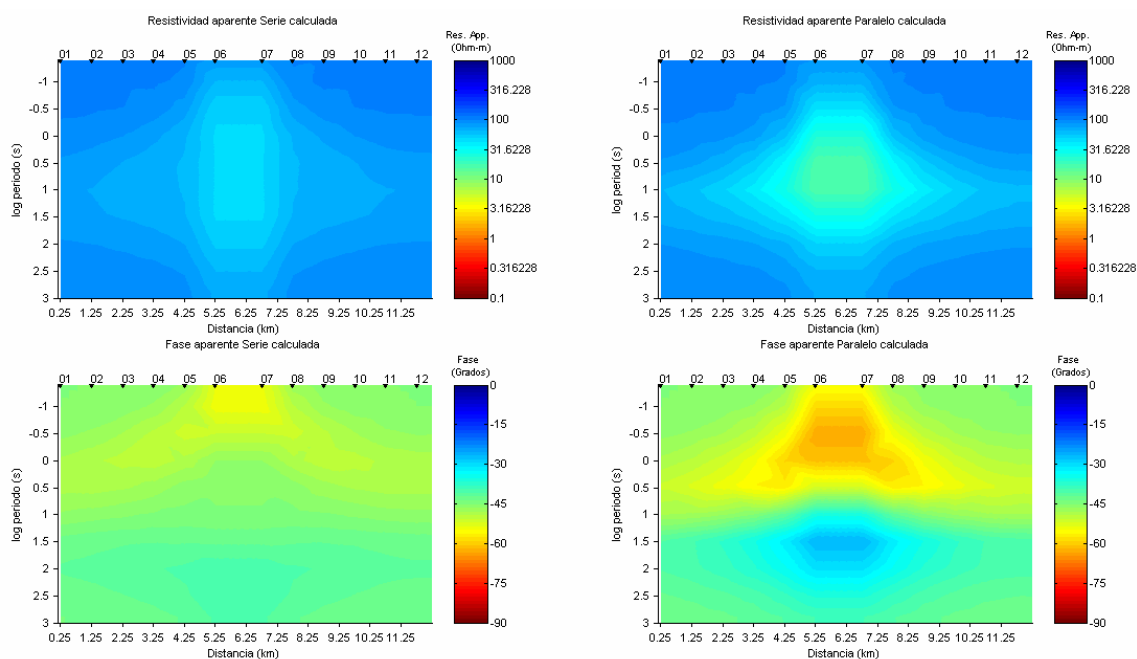


Figura 36. Respuesta S-P para modelo de un cuerpo conductor vertical.

La Figura 37 muestra en pseudosecciones la respuesta del determinante, en donde observamos el efecto promediado de las anomalías s-p..

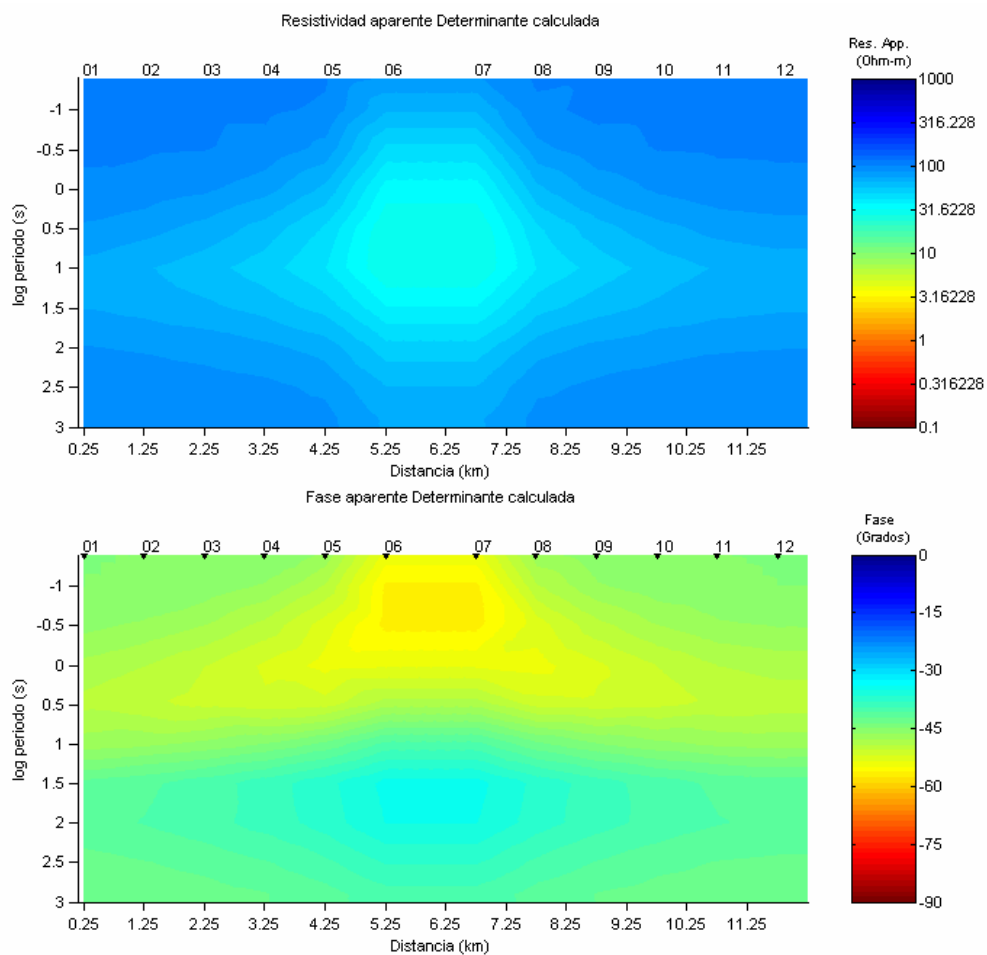


Figura 37. Respuesta determinante para modelo de un cuerpo conductor vertical.

III.4.4 Matriz de sensibilidad S-P y determinante

La Figura 38 muestra las imágenes de la matriz de sensibilidad del modelo de un cuerpo conductor vertical para las respuestas serie, paralelo y determinante, en uno de los sitios, a seis periodos diferentes. A periodos menores a un segundo las funciones son similares a las mostradas para un modelo homogéneo. Al aumentar el periodo la sensibilidad al conductor vertical es ligeramente mejor para la respuesta paralelo, aunque la respuesta serie también es sensible. Los efectos locales debajo del sitio son mayores para el modo serie en comparación con el paralelo, aunque para el periodo de 1000 s la diferencia ya no es notable. Podemos decir que el modo paralelo es sensible al cuerpo conductor pero también a los efectos locales cercanos al sitio, mientras que el modo TE solamente es sensible al conductor y no se ve afectado por efectos locales. Por otro lado respuesta serie es un poco más sensible a los efectos locales pero también siente la presencia del conductor vertical, a diferencia del modo TM que es prácticamente insensible al conductor y solo siente efectos locales..

La sensibilidad del determinante es muy similar a las sensibilidades s-p, siente efectos locales al igual que la presencia del conductor vertical.

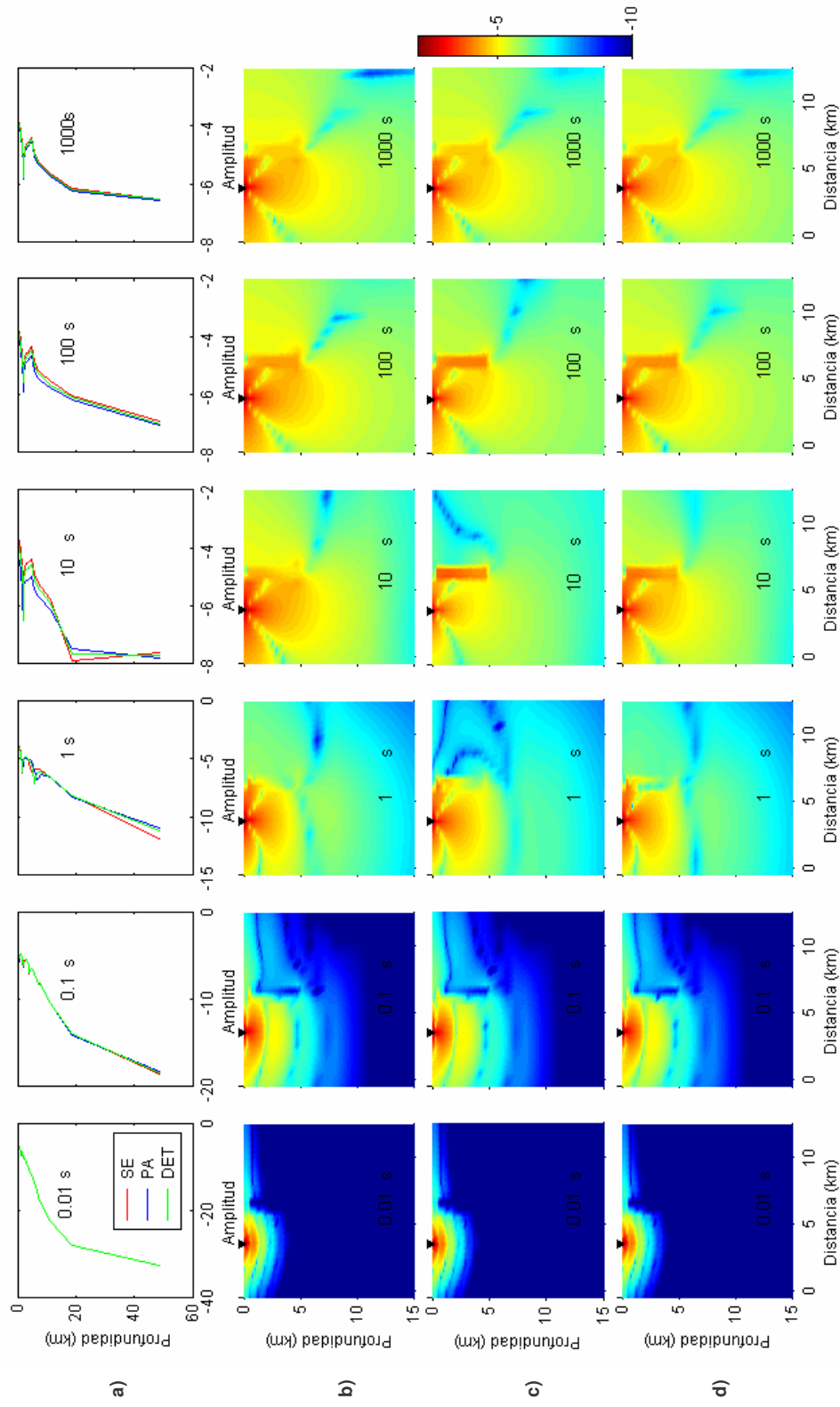


Figura 38. Matriz de sensibilidad modo serie, paralelo y determinante, modelo cuerpo conductor vertical. a) Amplitud de la matriz de sensibilidad en función de la profundidad por periodo, debajo del sitio, b) modo Serie, c) modo Paralelo y d) Determinante. Sitio 4 a seis periodos distintos.

III.4.5 Respuesta promedios S-P

La Figura 39 y Figura 40 muestran en pseudosecciones la respuesta serie y paralelo, con dos y cuatro promedios recursivos respectivamente, para el modelo de un cuerpo conductor vertical. Observamos que en ambos casos las anomalías son muy similares a las del determinante.

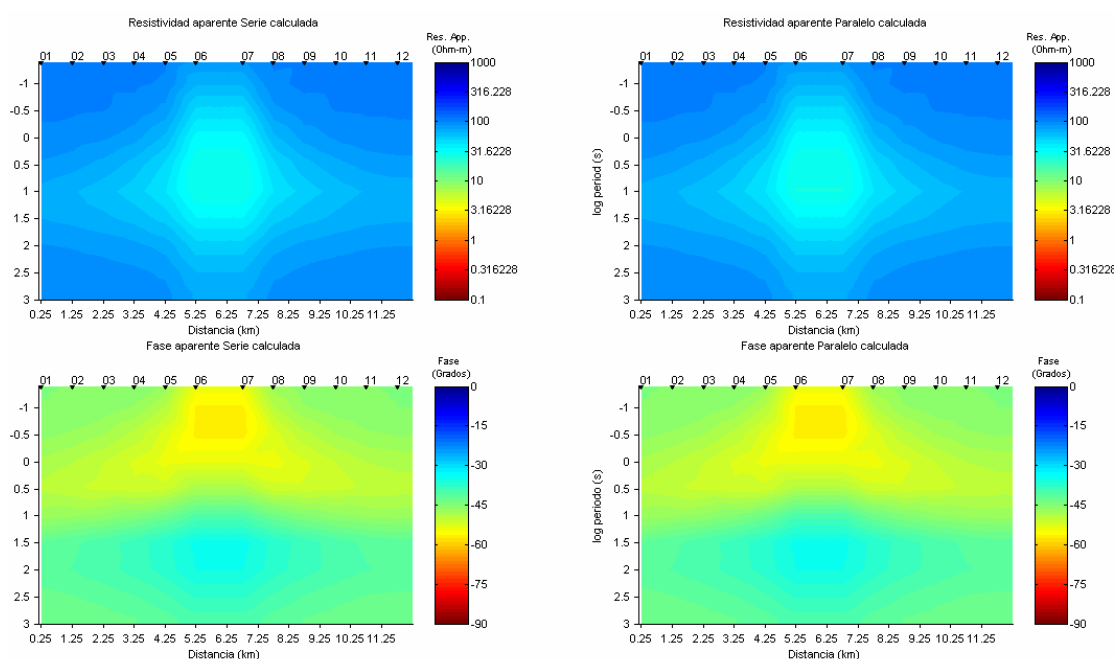


Figura 39. Respuesta S-P, dos promedios para modelo de un cuerpo conductor vertical.

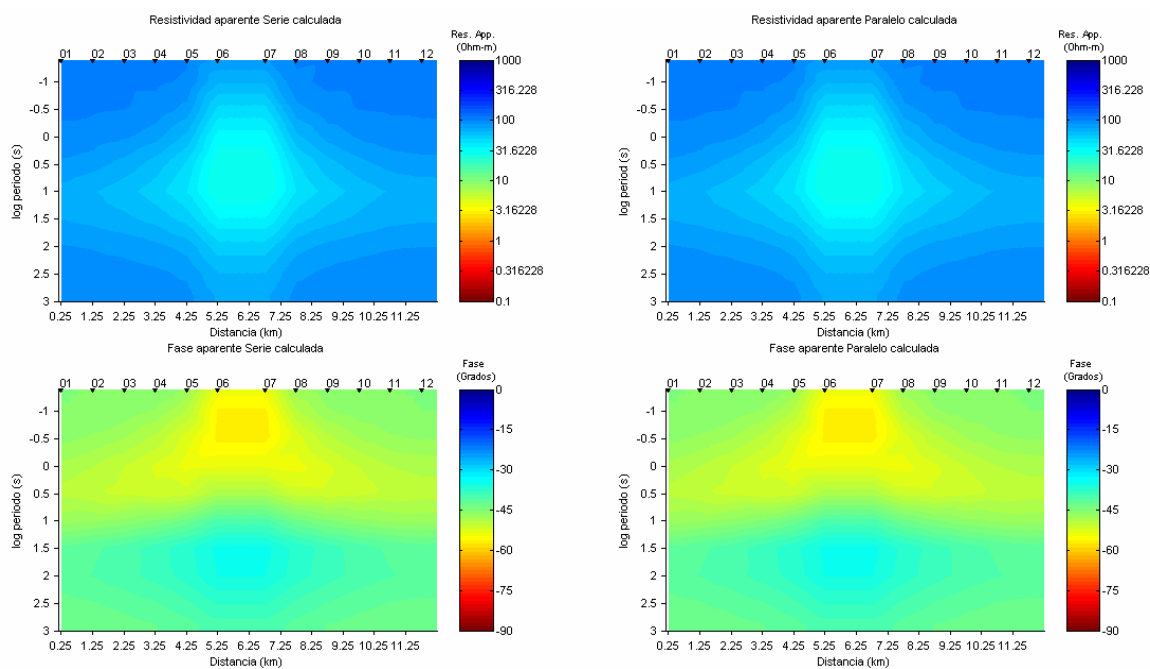


Figura 40. Respuesta S-P, cuatro promedios para modelo de un cuerpo conductor vertical.

III.4.6 Matriz de sensibilidad Promedios S-P

La Figura 41 y Figura 42 muestran las imágenes de la sensibilidad para dos y cuatro promedios recursivos. Podemos observar que el efecto de realizar los promedios recursivos no produce resultados significativamente diferentes a los obtenidos con el determinante.

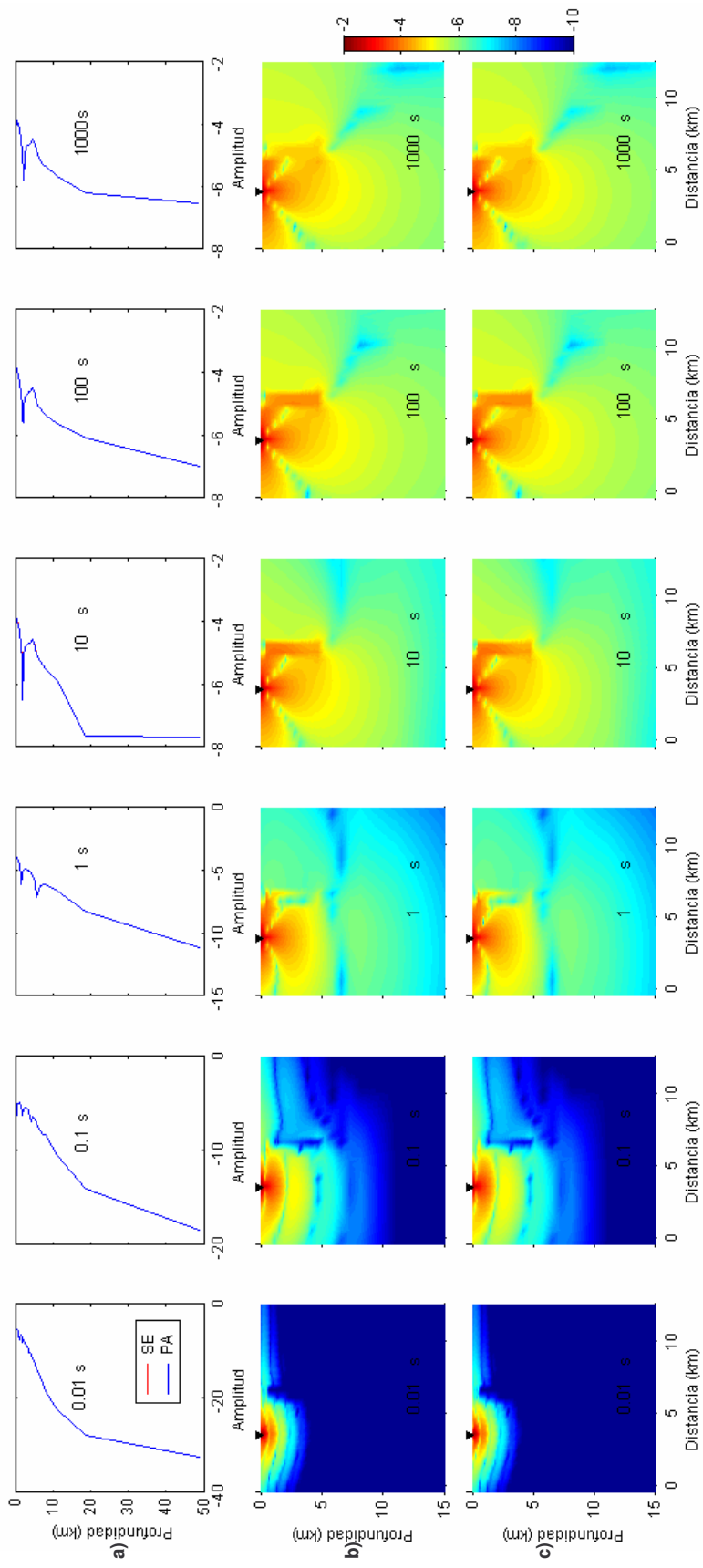


Figura 41. Matriz de sensibilidad dos promedios serie-paralelo, modelo cuerpo conductor vertical. a) Amplitud de la matriz de sensibilidad en función de la profundidad por periodo, debajo del sitio, b) modo Serie y c) modo Paralelo. Sitio 4 a seis periodos distintos.

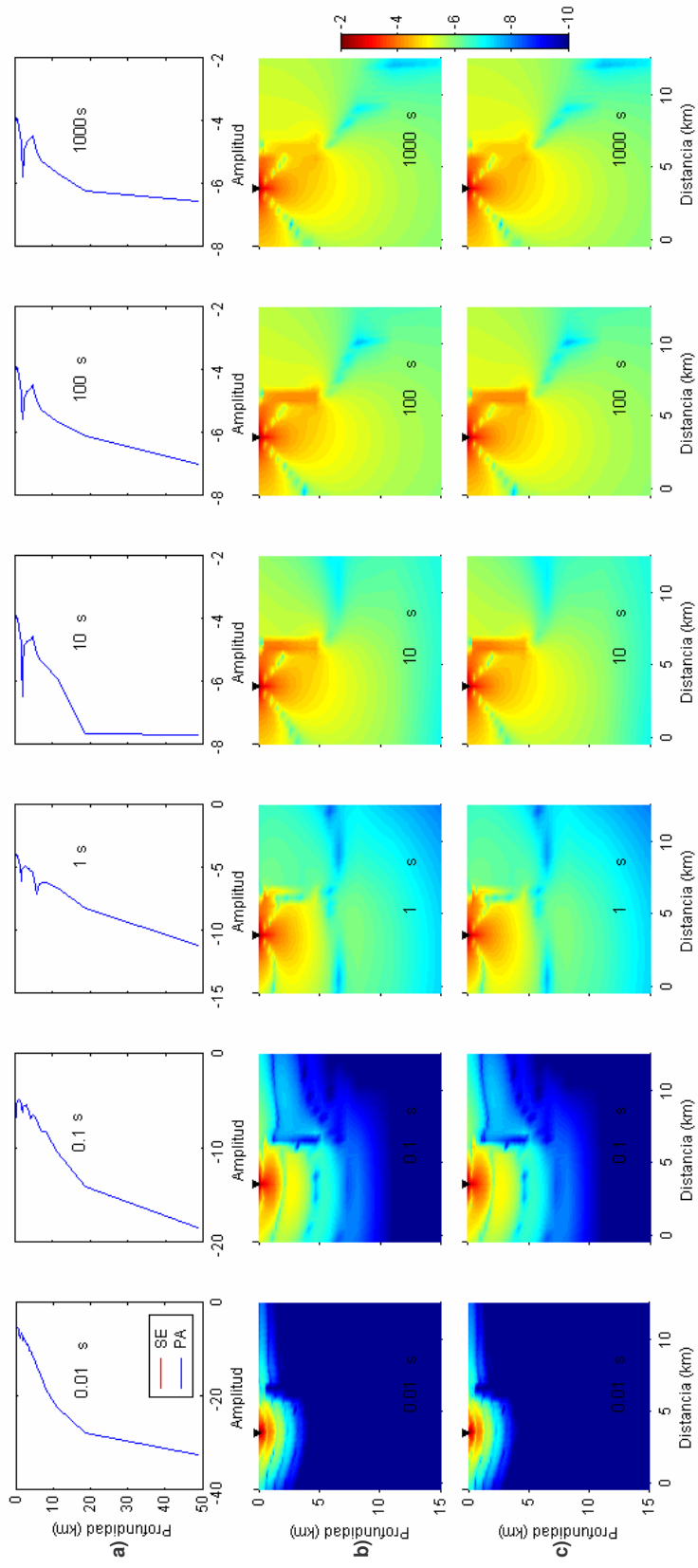


Figura 42. Matriz de sensibilidad cuatro promedios serie-paralelo, modelo cuerpo conductor vertical. a) Amplitud de la matriz de sensibilidad en función de la profundidad por periodo, debajo del sitio, b) modo Serie y c) modo Paralelo. Sitio 9 a seis periodos distintos.

III.4.7 Conclusiones para el modelo de un cuerpo conductor vertical.

Para el modelo de un cuerpo conductor vertical podemos concluir lo siguiente:

El modo TE es muy sensible al cuerpo conductor y prácticamente insensible a efectos locales debajo del sitio de medida. En cambio, el modo TM es afectado solamente por lo que se encuentra directamente debajo del sitio de medida y prácticamente insensible a la presencia del conductor vertical.

La respuesta paralelo es un poco más sensible al cuerpo conductor, comparada con la respuesta serie. Los efectos locales debajo del sitio son mayores para el modo serie en comparación con el paralelo. Comparativamente con los modos TE y TM, podemos decir que el modo paralelo es sensible al cuerpo conductor pero también a los efectos locales cercanos al sitio, mientras que el modo TE solamente es sensible al conductor y no se ve afectado por efectos locales. Por otro lado, la respuesta serie es un poco más sensible a los efectos locales pero también siente la presencia del conductor vertical, a diferencia del modo TM que es prácticamente insensible al conductor y solo siente efectos locales

La respuesta y sensibilidad de los promedios S-P es semejante a la respuesta y sensibilidad del determinante, el cual responde con similar intensidad tanto a los efectos locales, como al cuerpo conductor vertical.

IV INVERSIÓN 2-D DE DATOS SITÉTICOS 3-D

Para analizar las bondades de las nuevas respuestas invariantes y contrastarlas con las utilizadas tradicionalmente en las inversiones 2D es conveniente probarlas con datos que contengan efectos 3D.

En este capítulo se presentan los resultados de la inversión 2D de datos sintéticos utilizando las distintas funciones de respuesta descritas más arriba. Utilizamos datos generados con un modelo tridimensional que incluye dos cuerpos (resistivo y conductor) en un medio de resistividad intermedia y los perfiles usados en el trabajo de Romo *et al.*, (2005).

Se realizaron inversiones conjuntas y separadas de los tradicionales modos TE y TM, así como los nuevos modos serie y paralelo. También se invirtieron los perfiles seleccionados utilizando promedios serie y paralelo, así como el determinante del tensor. Una vez teniendo todos los modelos se compararon entre si y se identificaron sus diferencias, como se describe a continuación.

El modelo consiste de dos cuerpos un conductor de 2 ohm-m y un resistivo de 5000 ohm-m, inmersos en un semiespacio de 100 ohm-m. Las dimensiones de los cuerpos son de 20 X 10 X 14 kilómetros, distribuidos como se muestran en la Figura 43. Los datos sintéticos se generaron utilizando un programa de modelado directo en tres dimensiones (Mackie *et al.*, 1994), el cual calcula campos eléctricos y magnéticos en la superficie de un modelo de resistividad en 3-D.. Una vez teniendo los campos eléctricos y magnéticos en la superficie del modelo se calcularon sus respectivas impedancias, se eligieron dos perfiles (A y D) distribuidos como se muestra en la Figura 43, seleccionando 23 sitios a lo largo de los mismos.

La inversión en 2D de los perfiles se realizó utilizando el algoritmo original escrito por Rodi y Mackie (2001) utilizando los modos TE y TM, así como el modificado para calcular las nuevas transformaciones serie-paralelo (Romo *et al.*, 2005); el cual se basa en una solución regularizada al problema inverso. Este algoritmo considera un modelo inicial que se va modificando iterativamente hasta que produce una respuesta que se ajusta a los datos observados. El algoritmo busca una solución que cumpla con dos condiciones: por un lado se requiere que la respuesta del modelo ajuste lo mejor posible a las observaciones y por otro, se condiciona que el modelo sea lo más suave posible. Ambas condiciones constituyen un compromiso que se puede describir matemáticamente con la minimización de la siguiente función, objetivo:

$$S(m) = (d - F(m))^T R_{dd}^{-1} (d - F(m)) + \tau \|L(m - m_o)\|^2 \quad (53)$$

Donde: $F(m)$ es la respuesta del modelo, d son los datos observados, m son los parámetros del modelo, R_{dd} es la incertidumbre en los datos, τ es el parámetro de regularización y $L(m)$ es el operador de Laplace. La función objetivo es la suma de dos términos, el primero se encarga de minimizar la diferencia entre datos observados y calculados. El segundo término se encarga de minimizar la rugosidad del modelo, basándose en el operador Laplaciano (segunda derivada).

Los dos términos de (53) están ligados por el factor de regularización o parámetro de regularización τ . Mientras más pequeño sea τ menor será el peso que se da a la suavidad del modelo y mayor será el ajuste a los datos. Por el contrario, si τ es grande se dará mucho peso a la suavidad del modelo y poca importancia al ajuste de las observaciones.

Para encontrar el mejor balance entre ajuste y suavidad se requiere encontrar el mejor valor numérico de τ . Para esto calculamos soluciones con varios valores distintos de τ y graficamos el rms contra la rugosidad. La curva que se forma con estos resultados se conoce por su forma como curva "L" (Farquharson y Oldenburg, 2004; Hansen, 1992). Al ir reduciendo el valor de τ el desajuste va disminuyendo a costa de un aumento en la rugosidad de la solución, hasta llegar a un punto en que una pequeña disminución en el desajuste implica un gran aumento en la rugosidad del modelo. El τ óptimo se encuentra cerca del vértice de la "L" en donde se logra un compromiso entre suavidad y ajuste.

Para los promedios recursivos, se modificó el programa de inversión de tal manera que cuando los datos son promedios recursivos, el algoritmo promedia igualmente las respuestas calculadas en cada iteración antes de estimar el desajuste y modificar el modelo. Así mismo se modificaron la matriz de derivadas parciales tomando en cuenta estas nuevas funciones de respuesta.

De la misma manera se utilizó el programa modificado para invertir el determinante del tensor de impedancias, con el mismo esquema de inversión explicado anteriormente.

A los datos de los perfiles se les agrego 5% de ruido aleatorio, posteriormente se modelaron utilizando las impedancias, TE-TM, serie-paralelo; en forma conjunta y separada, así como los promedios recursivos S-P con dos y cuatro promedios por frecuencias y el determinante del tensor. Para cada caso se eligió el mejor modelo utilizando el criterio de la curva L, los cuales se muestran a continuación.

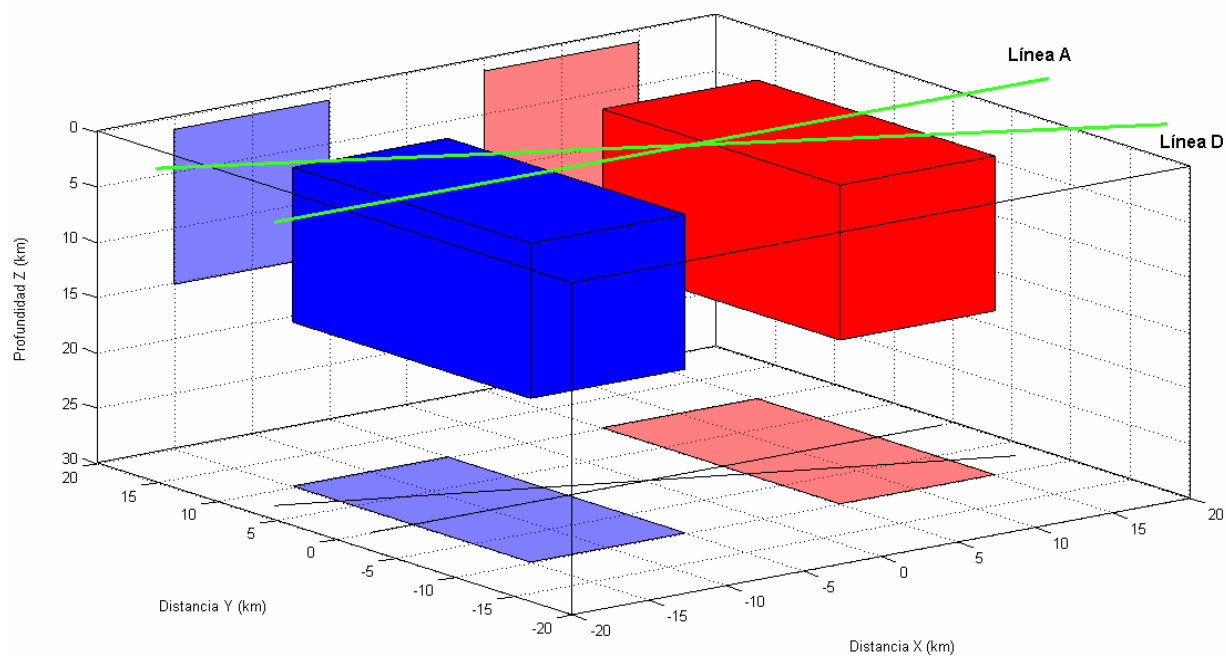


Figura 43. Modelo sintético 3-D, y perfiles elegidos para inversión 2D. El cuerpo de la izquierda tiene una resistividad de 500 Ohm-m; el de la derecha 2 Ohm-m y el semiespacio encajonante tiene una resistividad de 100 Ohm-m.

IV.1 Inversión 2D modo TE

La Figura 44 y Figura 45 muestran el modelo obtenido de la inversión del modo TE solamente, para los perfiles A y D. Se observan resultados no muy apropiados principalmente para el cuerpo resistivo cuya base no se observa a la profundidad propuesta, se ve que el cuerpo resistivo se extiende en profundidad y lateralmente. El cuerpo conductor se recupera aceptablemente, aunque por debajo del cuerpo aparece un semiespacio con más alta resistividad que la propuesta por el modelo.

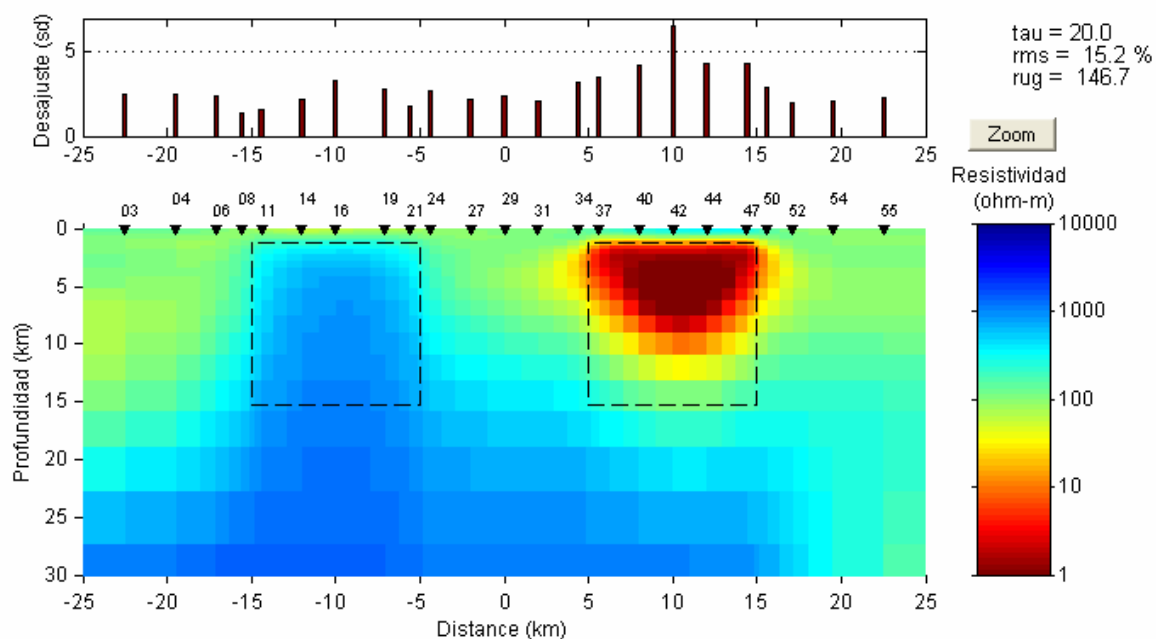


Figura 44. Modelo 2D, perfil A, inversión modo TE.

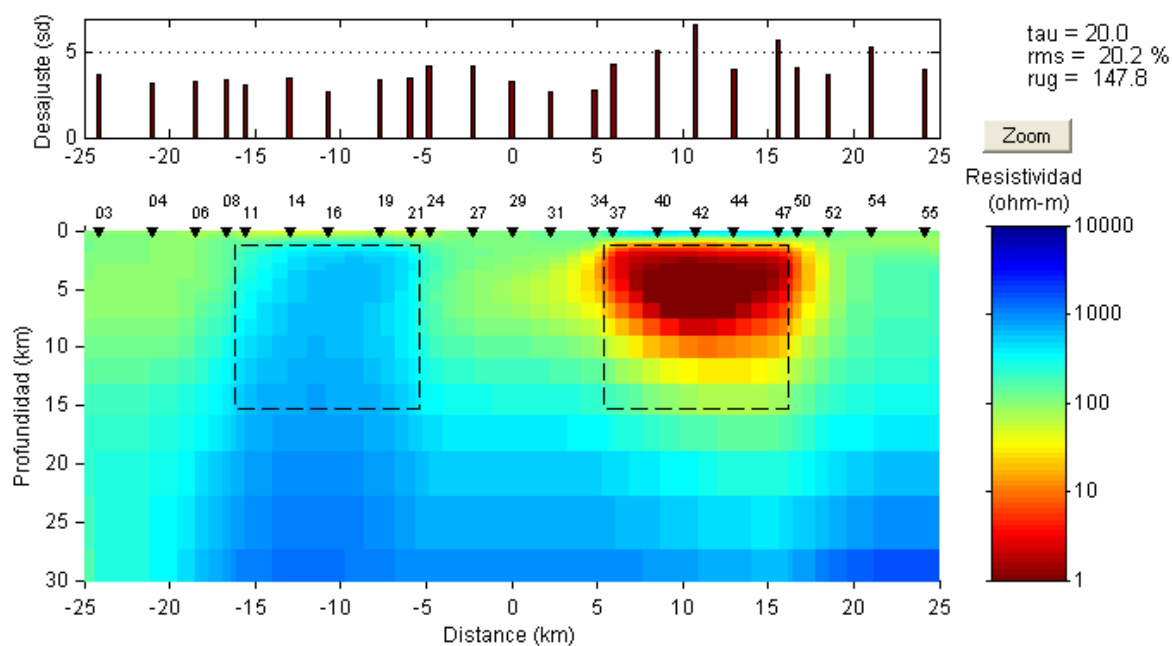


Figura 45. Modelo 2D, perfil D, inversión modo TE.

IV.2 Inversión 2D modo TM

La Figura 46 y Figura 47 muestran el modelo obtenido de la inversión del modo TM solamente, para los perfiles A y D. Se observan buenos resultados ya que los cuerpos propuestos se logran recuperar aceptablemente. A diferencia de los modelos utilizando solo el modo TE, observamos que la base del cuerpo resistivo se recupera por encima de la propuesta para el modelo. El cuerpo conductor no se recupera satisfactoriamente pues se alarga a profundidad.

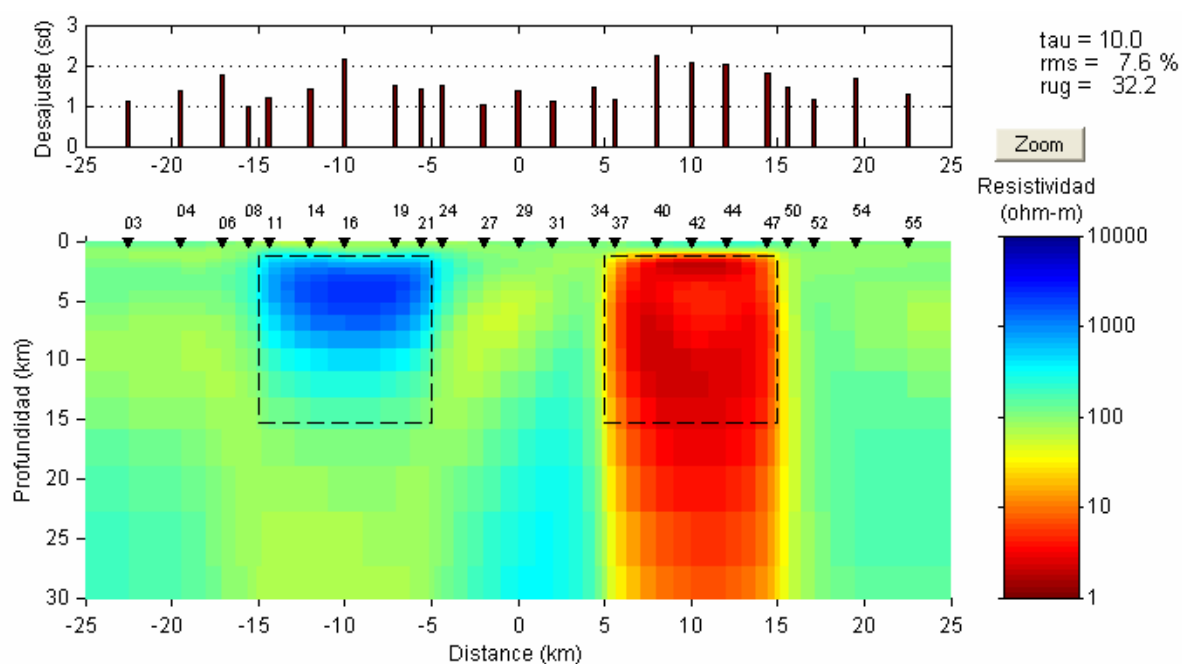


Figura 46. Modelo 2D, perfil A, inversión modo TM.

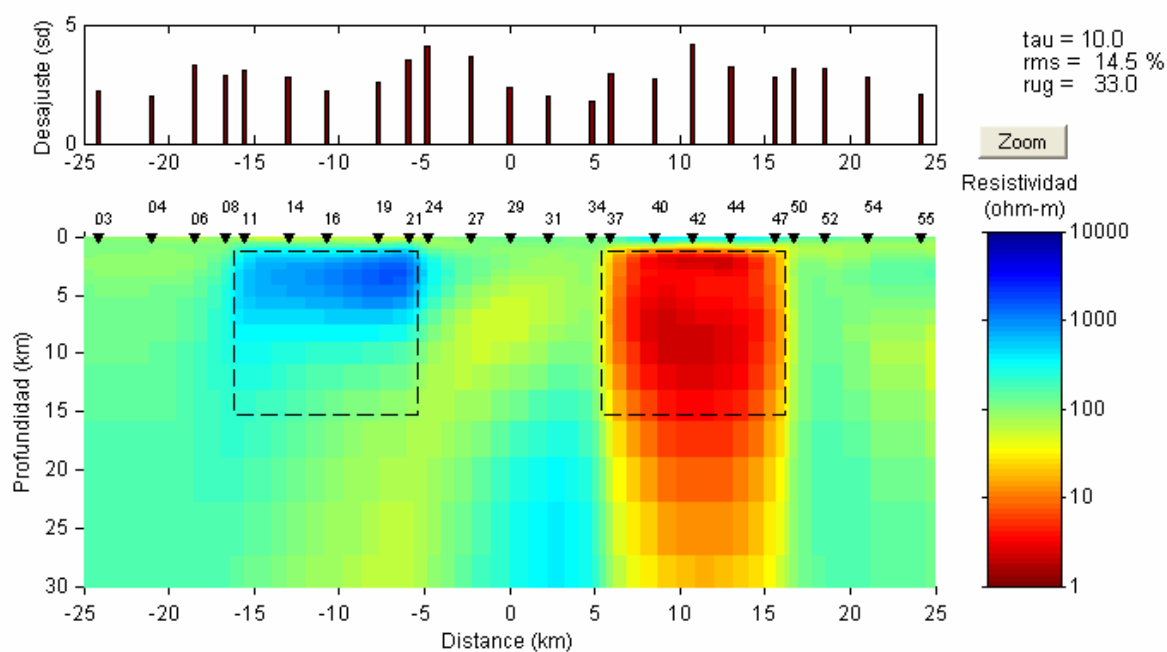


Figura 47. Modelo 2D, perfil D, inversión modo TM.

IV.3 Inversión conjunta 2D TE-TM

La Figura 48 y Figura 49 muestran el mejor modelo obtenido de la inversión en 2-D del perfil A y D respectivamente, utilizando en forma conjunta los modos TE y TM. Se observa la buena recuperación de los cuerpos propuestos (conductor y resistivo). Los recuadros con líneas punteadas dentro del modelo indican las dimensiones originales del cuerpo. La Figura 49 (perfil diagonal) muestra que el cuerpo conductor se recupera mejor que el resistivo, esto se debe a que el perfil corta al cuerpo resistivo en un extremo a diferencia del perfil A donde lo hace a la mitad del mismo.

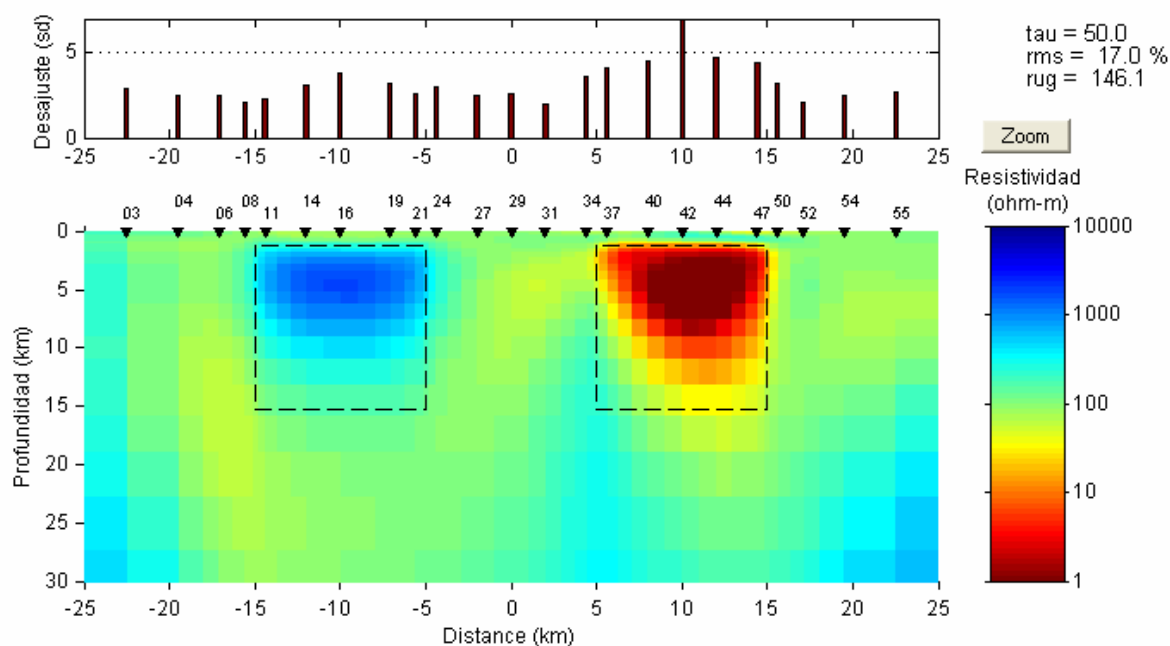


Figura 48. Modelo 2D, perfil A, inversión conjunta TE-TM.

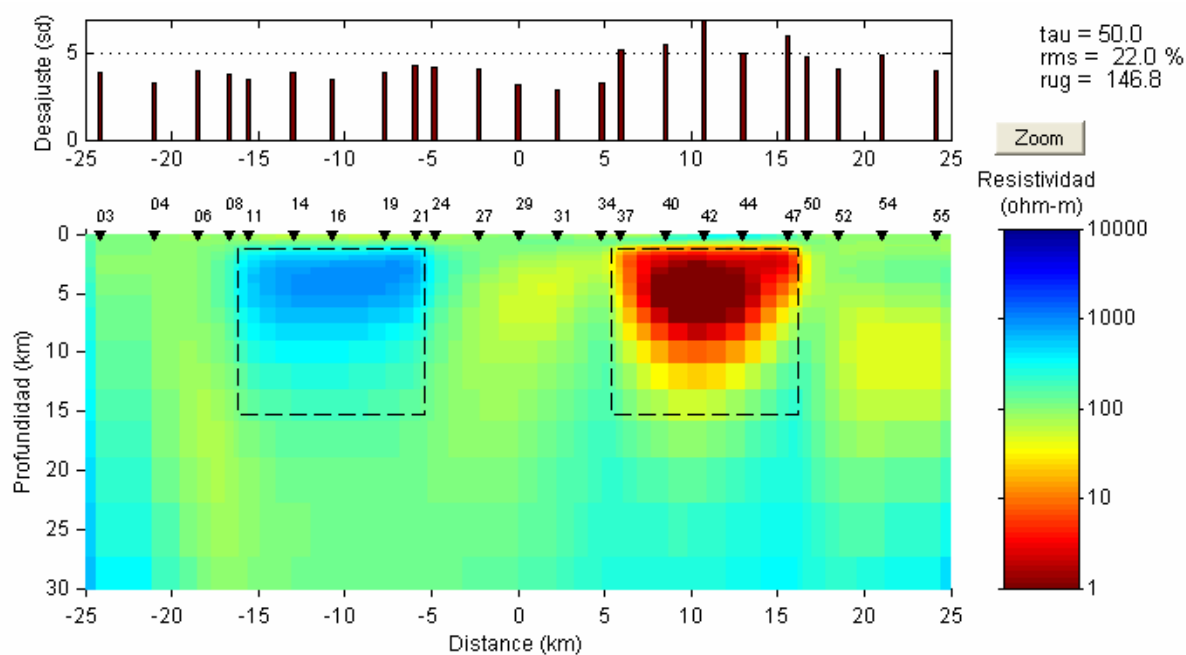


Figura 49. Modelo 2D, perfil D inversión conjunta TE-TM.

IV.4 Inversión 2D modo serie

La Figura 50 y Figura 51 muestran el modelo obtenido utilizando únicamente el modo serie. Se observan resultados no muy convincentes, principalmente para el cuerpo conductor debido a que su base aparece por debajo de la profundidad real. El cuerpo resistivo se recupera aceptablemente. Así mismo aparecen algunos cuerpos resistivos y conductores espurios en los alrededores de los cuerpos reales. Comparando con el modelo producido con el modo TM (Figura 46 y Figura 47) se observa cierta correlación: el cuerpo resistivo se recupera bien y el conductor se alarga en profundidad aunque para el modo paralelo esto es más marcado.

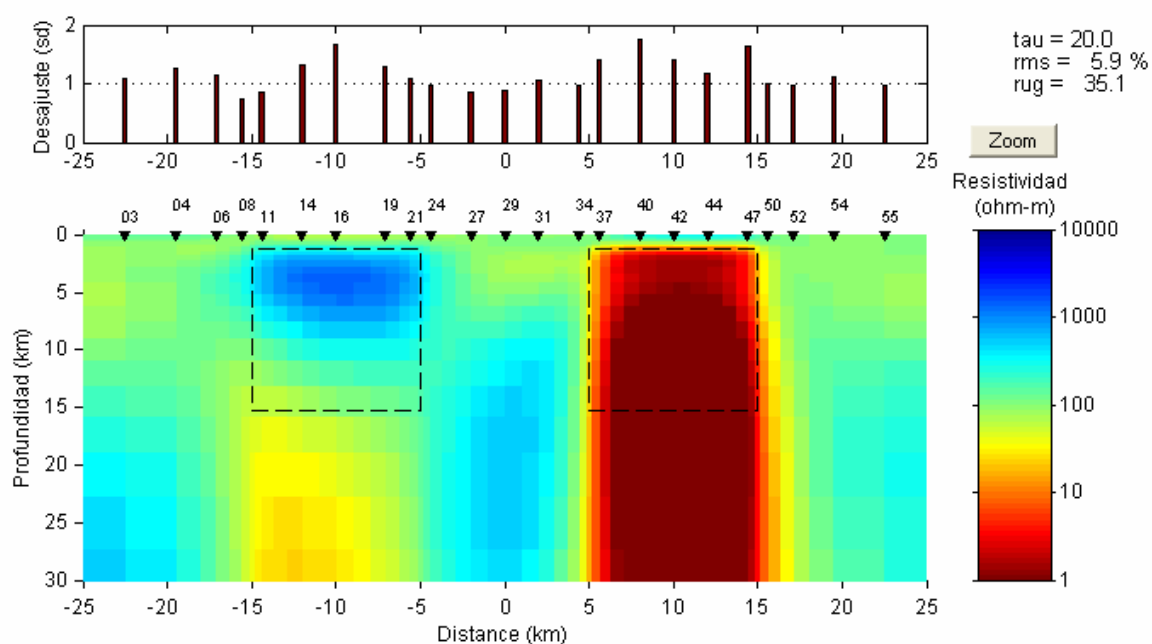


Figura 50. Modelo 2D, perfil A, inversión modo serie.

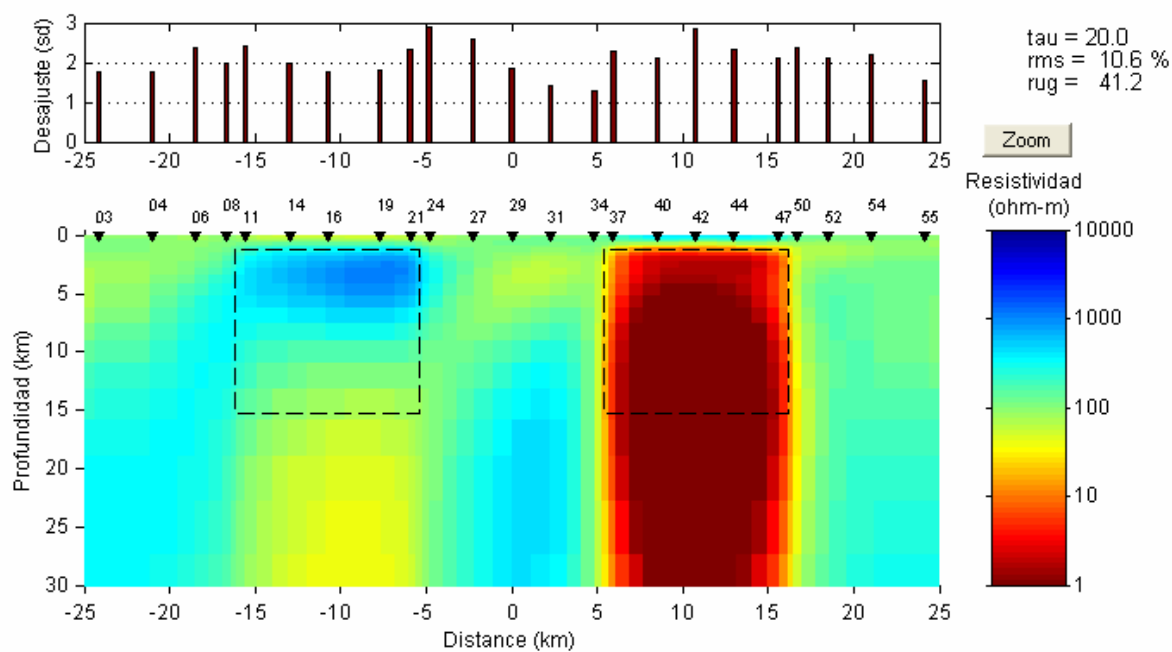


Figura 51. Modelo 2D, perfil D, inversión modo serie.

IV.5 Inversión 2D modo paralelo

La Figura 52 y Figura 53 muestran el modelo obtenido utilizando solamente el modo paralelo. Se observan resultados aceptables ya que los cuerpos propuestos se logran recuperar. A diferencia de los modelos obtenidos con el modo serie, observamos que la base del cuerpo conductor se aparece por encima de la real, al contrario que el modelo producido por el modo serie, en donde la base del cuerpo conductor se aparece por debajo de la real. El cuerpo resistivo en ambos perfiles se recupera muy bien. Comparando con los modelos producidos por la inversión del modo TE I (Figura 44 y Figura 45) se observan mejores resultados, en cuanto a que el cuerpo resistivo y conductor se recuperan satisfactoriamente, aunque el conductor se recupera con un espesor menor al verdadero.

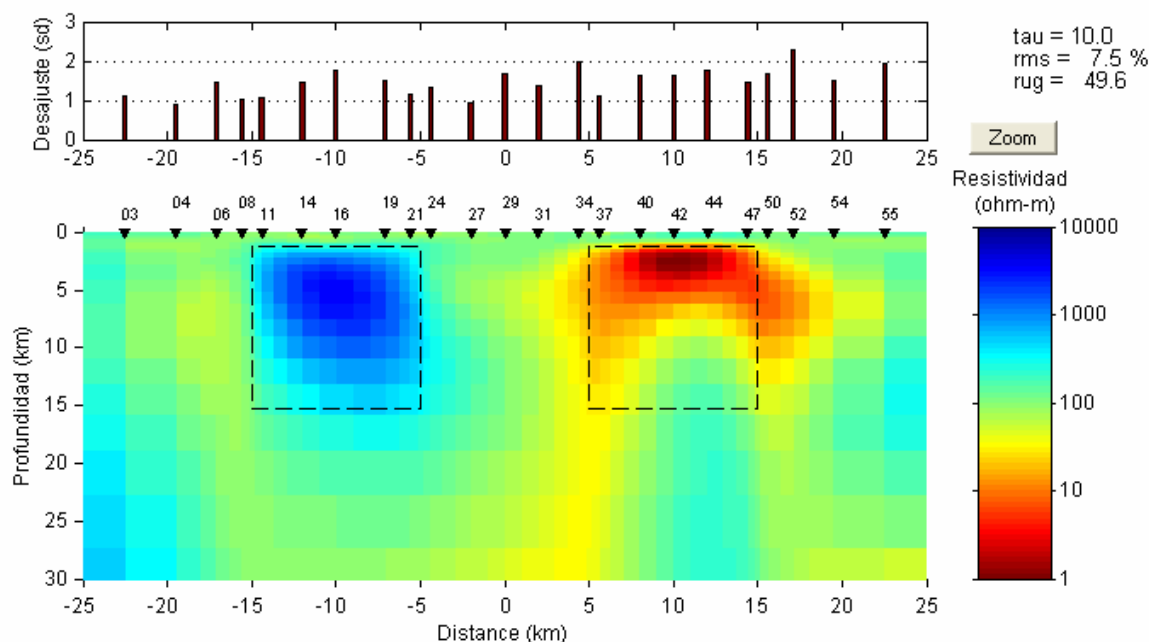


Figura 52. Modelo 2D, perfil A, inversión modo paralelo.

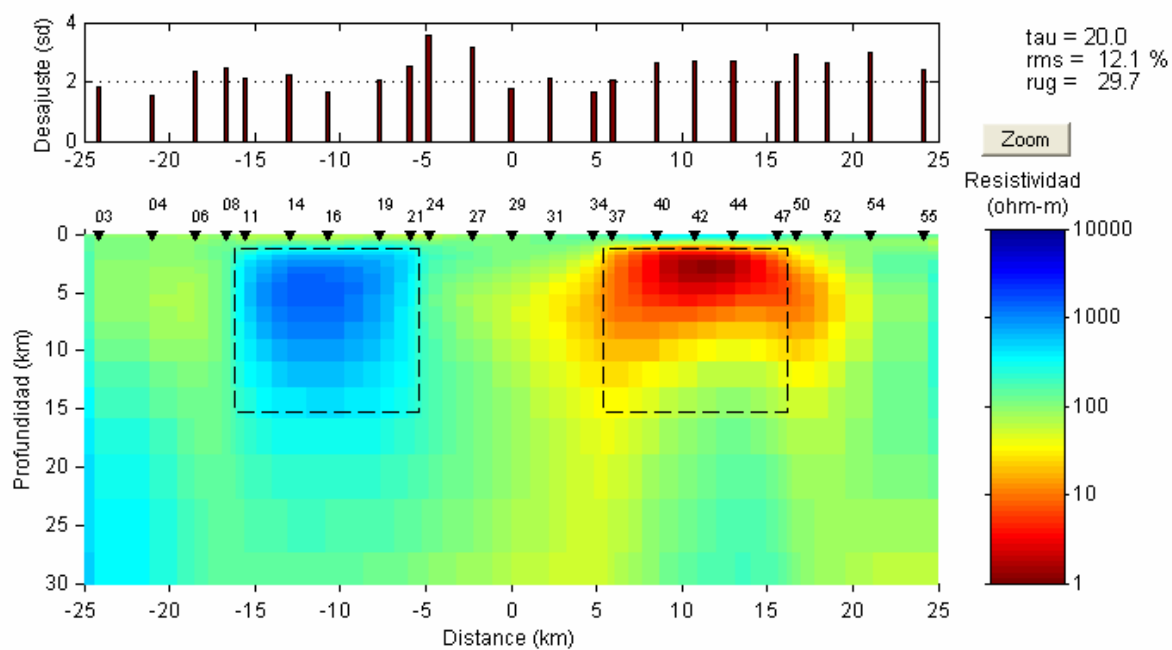


Figura 53. Modelo 2D, perfil D, inversión modo-paralelo.

IV.6 Inversión conjunta 2D SP

La Figura 54 y Figura 55 muestran el modelo obtenido utilizando en forma conjunta los modos serie y paralelo. Se observa la buena recuperación de los cuerpos propuestos (conductor y resistivo). Los recuadros con líneas punteadas dentro del modelo indican las dimensiones originales del cuerpo. La Figura 55 (perfil diagonal) muestra que el cuerpo conductor se recupera mejor que el resistivo, esto se debe a que el perfil corta al cuerpo resistivo en un extremo a diferencia del perfil A donde lo hace a la mitad del mismo. Haciendo una comparación con los modelos obtenidos con la inversión conjunta TE-TM (Figura 48 y Figura 49) se observan resultados similares en cuanto a que en ambos casos los cuerpos se recuperan aceptablemente.

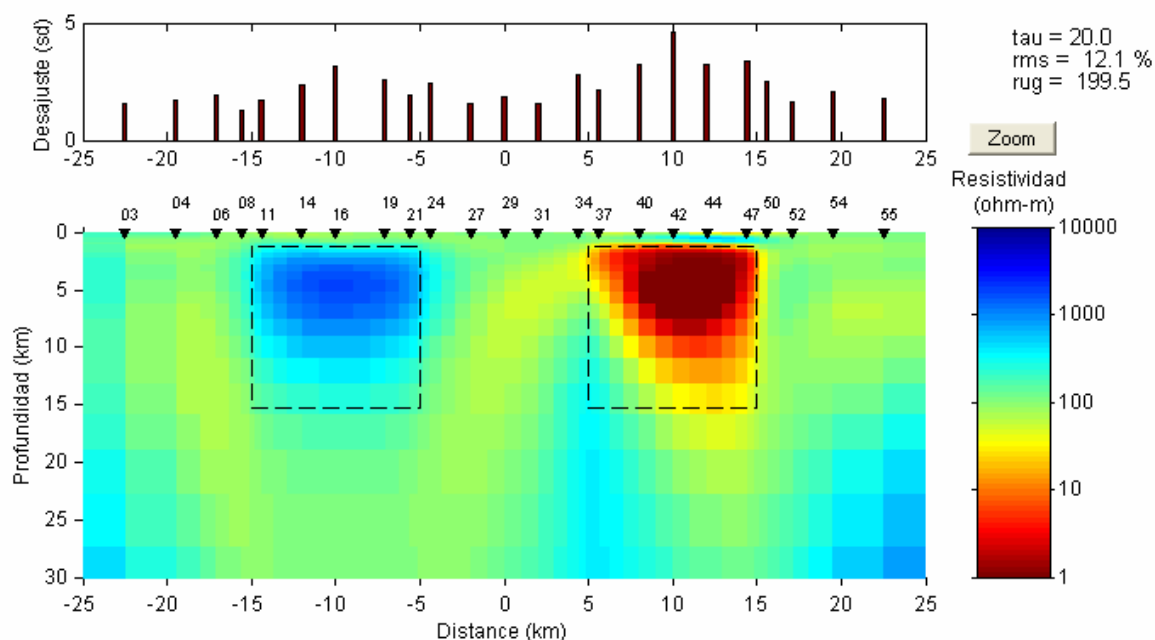


Figura 54. Modelo 2D, perfil A, inversión conjunta serie-paralelo.

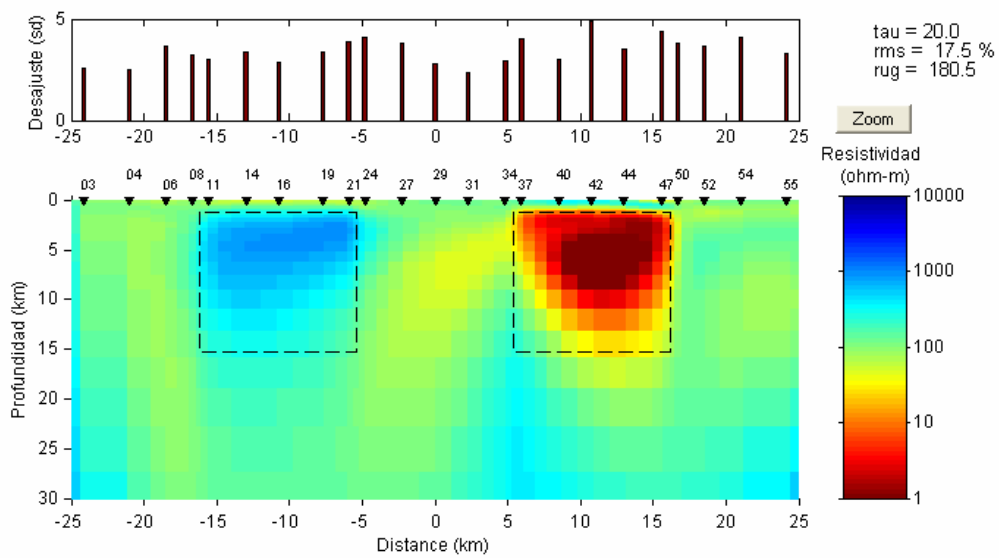


Figura 55. Modelo 2D, perfil D inversión conjunta serie-paralelo.

IV.7 Inversión 2D utilizando el determinante

La Figura 56 y Figura 57 muestran el modelo obtenido utilizando el determinante. Se observan resultados poco aceptables ya que los cuerpos propuestos no se logran recuperar muy bien, sobre todo la base de los mismos, esto sucede con ambos bloques (resistivo y conductor). al igual que los casos anteriores, la base del conductor es el que presenta más problemas. La cima de los cuerpos se recupera muy bien en casi todos los casos,

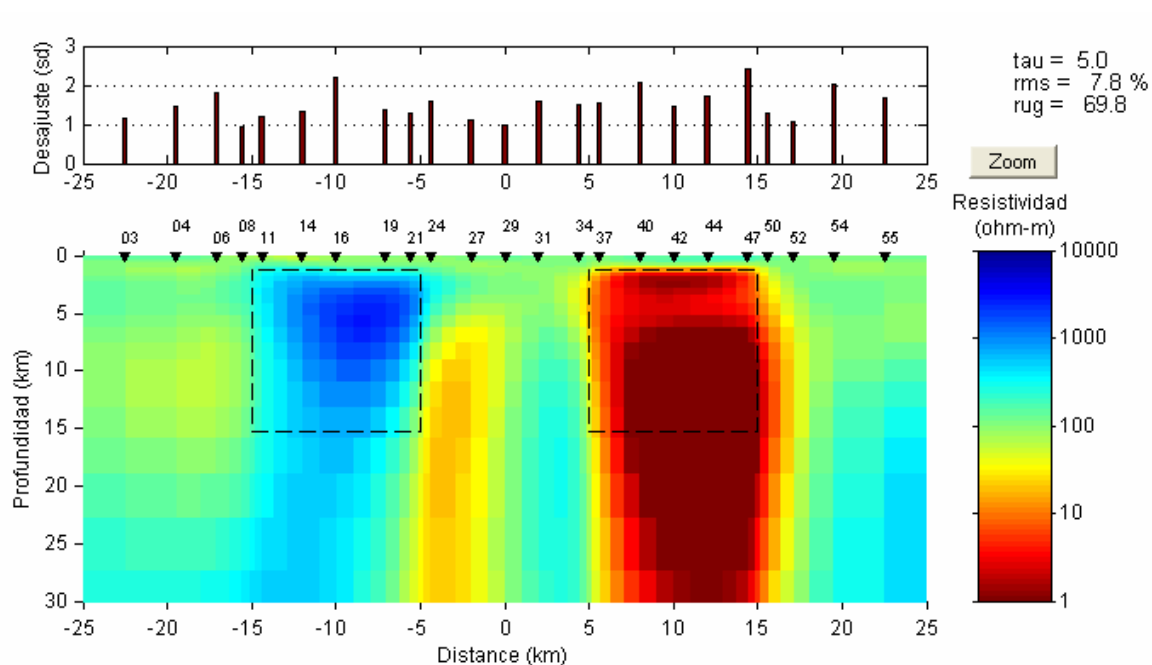


Figura 56. Modelo 2D, perfil A, inversión utilizando el determinante del tensor.

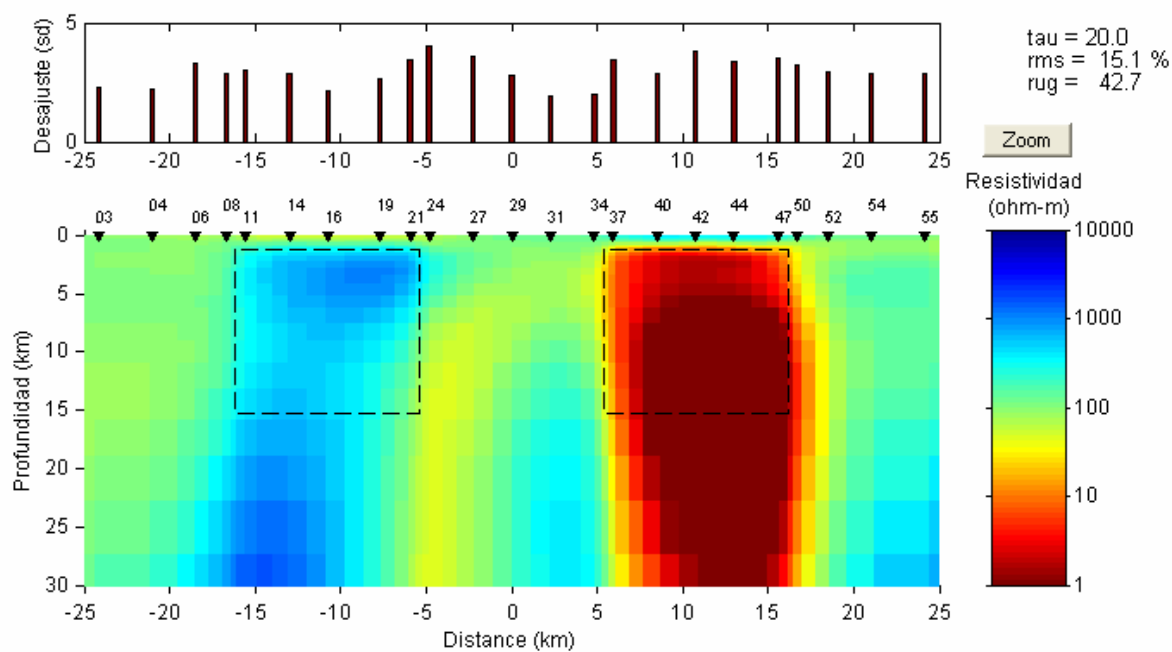


Figura 57. Modelo 2D, perfil D, inversión utilizando el determinante del tensor.

IV.8 Inversión 2D con promedios SP

La Figura 58, Figura 59, Figura 60 y Figura 61 muestran el modelo obtenido utilizando dos y cuatro promedios recursivos con los modos serie y paralelo. Los modelos con dos promedios (perfil A y D) (Figura 58 y Figura 59) presentan resultados aceptables ya que los cuerpos propuestos se logran recuperar bastante bien. Para el caso de cuatro promedios (Figura 60 y Figura 61) se observan resultados similares a los obtenidos al utilizar el determinante, en el sentido de que la base de los bloques no aparece en su posición verdadera. Por otra parte, la cima de los cuerpos se recupera muy bien en casi todos los casos.

Podemos observar en estos modelos cómo al realizar promedios recursivos se obtienen modelos parecidos a los que se obtienen a partir del determinante, como es de esperarse. Los modelos de cuatro promedios son muy similares a los obtenidos con el determinante, mientras que los modelos de dos promedios son un caso intermedio entre S-P originales y determinante.

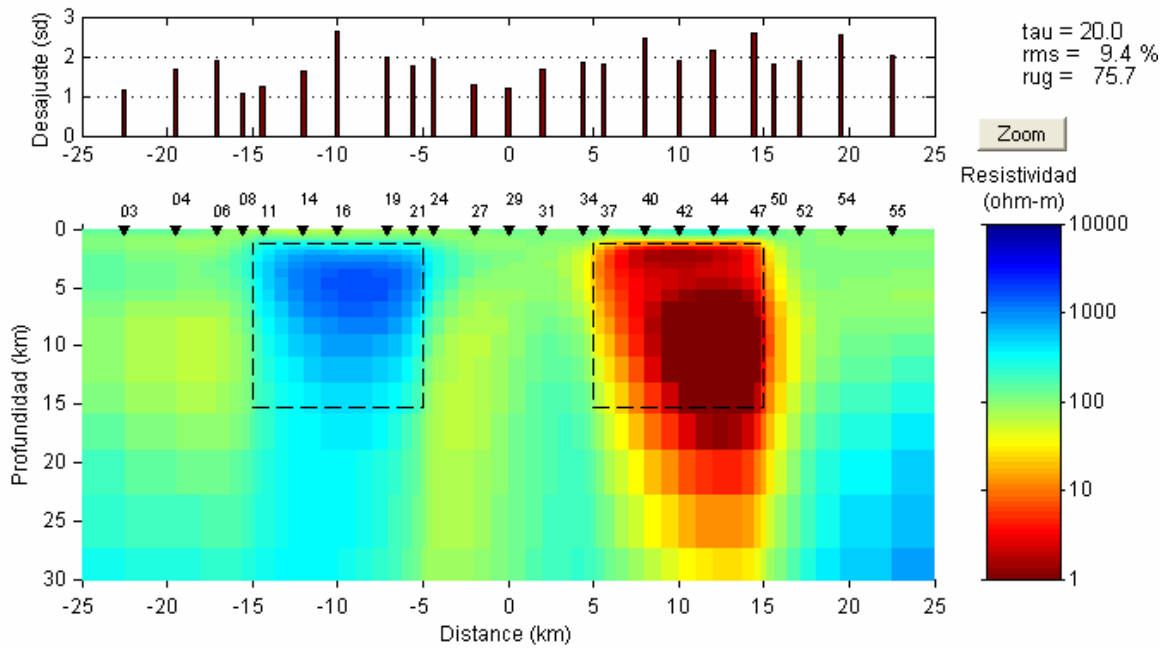


Figura 58. Modelo 2D, perfil A, dos promedios por frecuencia inversión conjunta serie-paralelo.

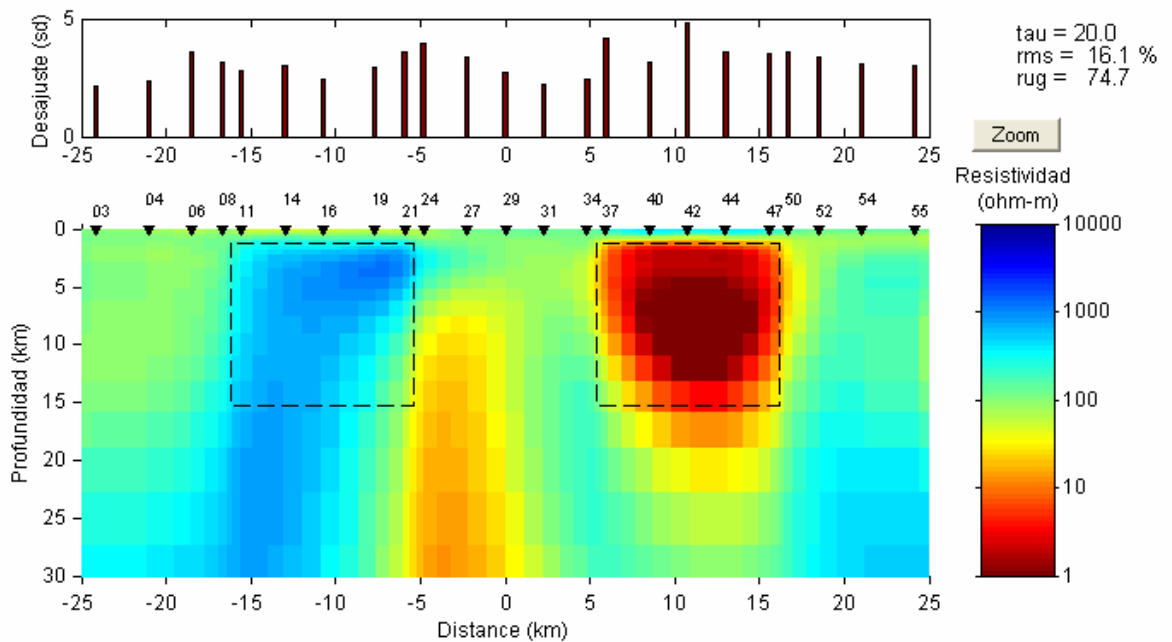


Figura 59. Modelo 2D, perfil D, dos promedios por frecuencia inversión conjunta serie-paralelo.

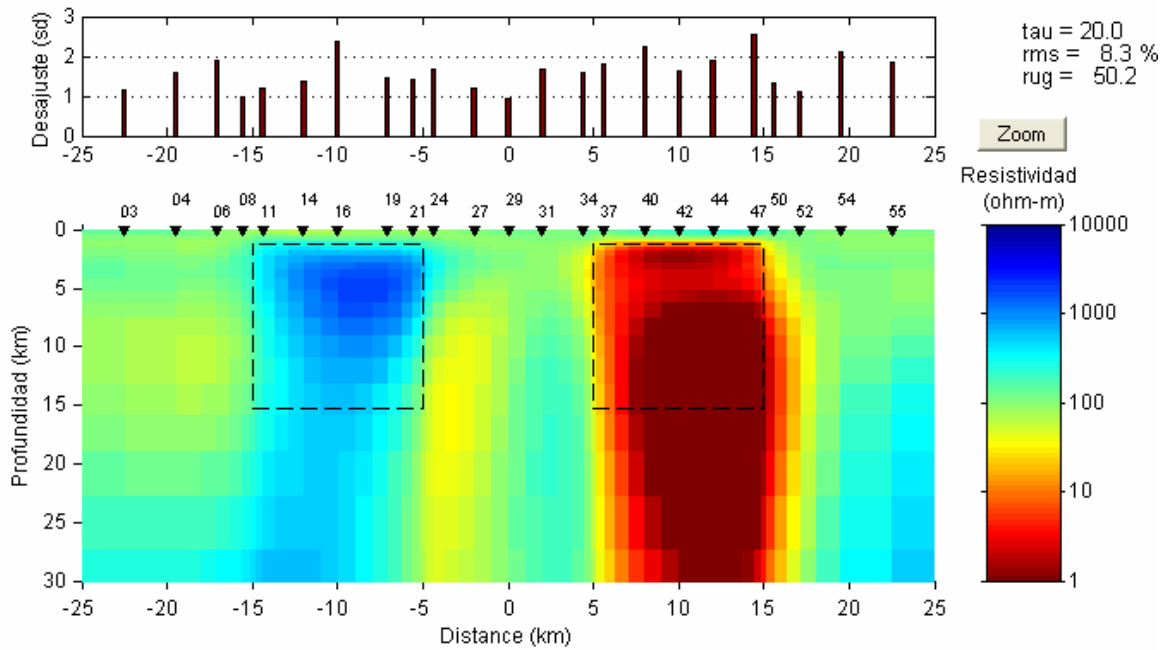


Figura 60. Modelo 2D, perfil A, cuatro promedios por frecuencia inversión conjunta serie-paralelo.

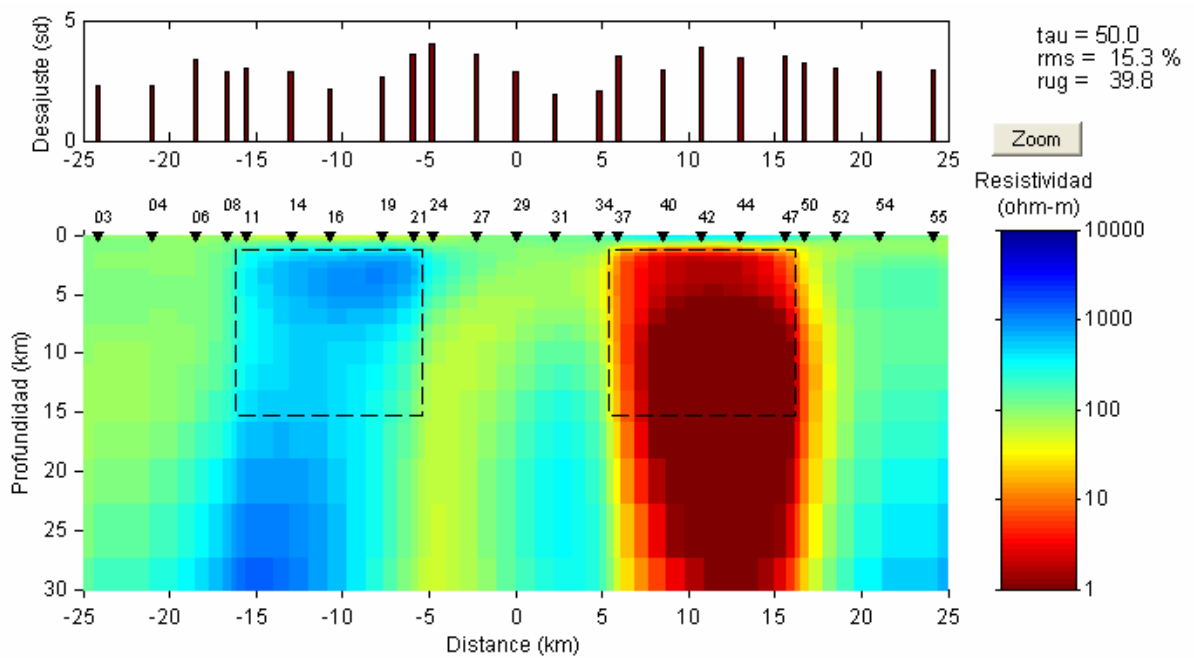


Figura 61. Modelo 2D, perfil D, cuatro promedios por frecuencia inversión conjunta serie-paralelo.

V DATOS DE CAMPO

En este capítulo mostramos resultados con dos grupos de datos de campo, el primero de ellos consiste de un perfil de 17 estaciones magnetoteléuricas al sur del Valle de Ojos Negros, al Este de la ciudad de Ensenada B. C. El segundo perfil de datos es un conjunto disponible a la comunidad que normalmente se utilizan para probar métodos nuevos de inversión y se le denomina datos BC87 (Jones, 1993). Este conjunto tiene efectos 3D muy fuertes lo que representan un buen ejemplo para probar nuevas técnicas de procesado de datos magnetoteléuricos.

Procesamos estos dos conjuntos de datos utilizando los modos TE-TM, las impedancias serie-paralelo, así como promedios recursivos, los resultados se muestran a continuación.

V.1 Perfil Ojos Negros

V.1.1 Antecedentes

El área está señalada en el recuadro azul de la Figura 62, la cual delimita una pequeña zona en el sector sur de la falla de San Miguel (FSM), al sur de la región del valle de Ojos Negros. Esta falla es una estructura geológica activa, de unos 100 km de longitud y rumbo N 60° W, que se localiza al Este de la ciudad de Ensenada, entre los 31.5° N y 32° N de latitud y los 115.5° W y 116.5° W de longitud, en Baja California, México. Es parte de un sistema de fallas que comprende a las fallas Calabazas, San Miguel y Vallecitos. La expresión superficial de la falla de San Miguel no es un trazo continuo, sino que está

formado por varios segmentos de alrededor de 20 km de longitud cada uno, sin aparente conexión entre ellos, al menos en la superficie.

El régimen tectónico que actualmente caracteriza a la región norte de Baja California se originó hace ~12 Ma, cuando se inició la deformación trans-tensional en la frontera entre la Placa Pacífico y la Placa de Norteamérica (Suárez-Vidal et al., 1991).

Actualmente esta región es una de las zonas con mayor actividad sísmica dentro de la cordillera peninsular de Baja California (Frez *et al.*, 2000).

El sistema de fallas San Miguel, Ojos Negros y Tres Hermanos son las principales estructuras en la región de interés (Figura 62). Las fallas Sierra de Juárez y San Pedro Mártir forman al Escarpe Principal del Golfo, el cual constituye la frontera occidental de la Provincia Extensional del Golfo (PEG), mientras que la falla de Agua Blanca es la frontera norte del bloque peninsular estable. La falla de San Miguel se une a estas dos estructuras en el vértice formado por los tres dominios estructurales descritos antes.

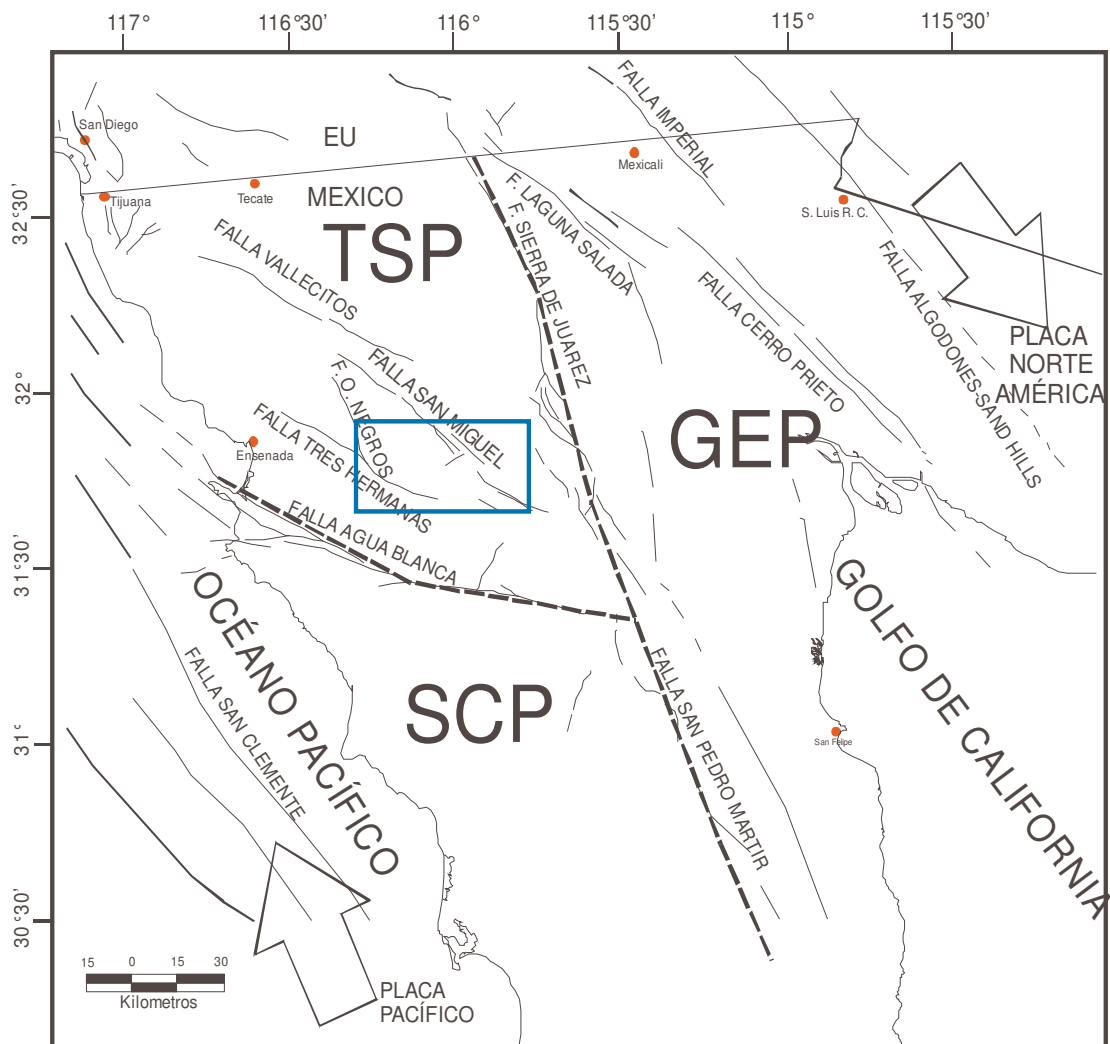


Figura 62. Localización del área de estudio (recuadro azul) y marco tectónico regional.

El área de estudio se encuentra conformada litológicamente por rocas prebatolíticas compuestas principalmente por rocas volcanoclásticas de la formación Alisitos de edad cretácico temprano (100-120 Ma) así como también rocas metamórficas como: mármoles, pizarras, cuarcitas, esquistos y gneisses. Rocas batolíticas que (Gastil *et al.*, 1975) describen que al final del Mesozoico, durante el Cretácico Tardío (~100 Ma), se llevó a cabo el emplazamiento del Batolito Peninsular, una intrusión magmática que corre a todo lo largo de la península originando la Cordillera Peninsular, la cual modificó profundamente la geología preexistente. El batolito está formado por rocas intrusivas predominantemente félsicas, cuya composición varía principalmente de granodiorita a tonalita y gabros así como dacitas en menor proporción (Gastil *et al.*, 1975).

Rocas posbatolíticas representadas por un conglomerado basal que descansa sobre el basamento granítico de la Sierra de Juárez, el conglomerado contiene clastos volcánicos así como algunos derivados del mismo basamento. La edad de este conglomerado es de 53.8 ± 1.5 Ma, según un análisis del contenido de K-Ar de cristales de biotita en un clasto de andesita, y corresponde al periodo de intensa erosión de la cordillera peninsular Mesozoica (Gastil *et al.*, 1975). Sobre el conglomerado, se tiene una secuencia de cuatro unidades volcánicas (en orden ascendente): una brecha andesítica de lahar; un basalto discontinuo; una toba riolítica densa, localmente soldada, que se encuentra cubriendo mesetas; y un basalto discontinuo. El basalto que sobreyace a la brecha de lahar tiene una edad de 13.6 ± 0.4 Ma, y la toba riolítica tiene 10.0 ± 0.5 Ma. Toda la secuencia tiene

unos 300 m de espesor y se puede asociar a los productos del arco volcánico del Mioceno (Gastil *et al.*, 1975). Depósitos recientes, compuestos por material aluvial depositado en las partes bajas de la Sierra principalmente en la cuenca de Ojos Negros-Real del Castillo y en los arroyos. Se sabe por información de pozos agrícolas para obtener agua que el espesor sedimentario máximo en la cuenca de Ojos Negros es de aproximadamente 120 m s (Campos-Gaytán, 2002; Vázquez *et al.*, 1991). En la Figura 63 se muestra el plano geológico de (Gastil *et al.*, 1975) para la zona de estudio en donde se muestra la distribución de las rocas descritas anteriormente, podemos observar que el perfil MT cruza los tres principales grupos de rocas en superficie.

V.1.2 Datos

Las variaciones temporales del campo electromagnético natural fueron registradas en 17 sitios distribuidos a lo largo de un perfil de 45 kilómetros con una separación aproximada de 3 km entre cada uno de ellos, como se muestra en la Figura 63. El perfil de sitios MT se localiza al sur del valle Ojos Negros y pasa perpendicular a la falla San Miguel iniciando en el rancho San Antonio (MT-15), con coordenadas de localización UTM 0565497E 3518187N y terminando en la laguna Hanson en Sierra Juárez (MT-17), con coordenadas de localización UTM 0600348E 3543645N, la campaña de obtención de datos se realizó en dos etapas, en la primera se recolectaron 11 sitios (MT-01 a MT-11) del 16 al 22 de agosto del 2004 y en la segunda etapa se recolectaron 6 sitios (MT-12 a MT-17) del 22 al 27 de noviembre del 2004.

Los periodos de grabación de las mediciones se obtuvieron en un rango de 0.001-100 s distribuidos en 4 bandas. En cada sitio se estimó la respuesta del tensor de impedancias utilizando el algoritmo de (Chave *et al.*, 1987).

Una vez calculados los cuatro elementos del tensor de impedancias rotamos los datos al rumbo del perfil, previo análisis de dimensionalidad de los datos utilizando el procedimiento de Groom y Bailey (1989; 1991), para determinar los modos convencionales TE y TM, a partir de los cuales realizamos inversión 2D utilizando el algoritmo desarrollado por Rodi y Mackie (2001).

Por otro lado, el tensor original fue transformado a las impedancias invariantes serie y paralelo propuestas por Romo *et al.* (2005), a partir de las cuales se realizó la inversión 2D utilizando el mismo algoritmo modificado para utilizar las impedancias serie y paralelo.

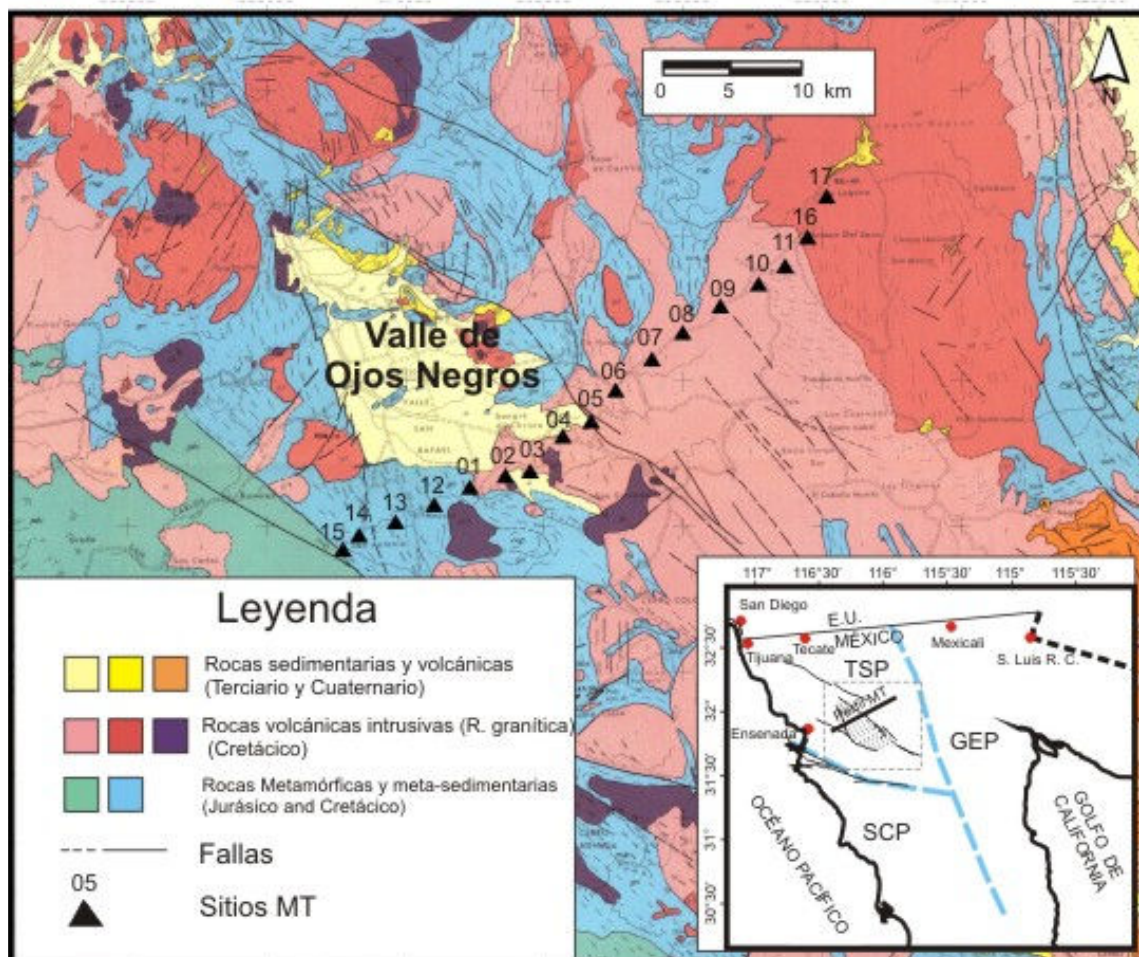


Figura 63. Plano geológico regional y localización de estaciones magnetotelúricas, (Gastil *et al.*, 1975).

V.1.3 Análisis de la dimensionalidad de los datos

La transformación serie-paralelo, produce dos funciones angulares las cuales están relacionadas con las características geométricas del subsuelo y pueden utilizarse para justificar a priori la interpretación en 1, 2 o 3 dimensiones de los datos. Estas son la diferencia angular $\Delta\theta$ y el promedio angular $\bar{\theta}$, como se describen en Romo et al. (2005). La primera de ellas esta relacionada con la dimensionalidad de los datos y la segunda con el rumbo de la estructura.

Además para verificar efectos en dos dimensiones de nuestros datos utilizamos los vectores de inducción del campo magnético vertical (Vozoff, 1991).

V.1.3.1 Efectos 3-D

Como se mencionó anteriormente para verificar la presencia de efectos 3D en nuestros datos utilizamos la parte real de $\Delta\theta$ como una medida del Skew de la impedancia, el cual es comúnmente usado como indicador de tridimensionalidad (Swift, 1967). Valores angulares más grandes que $\pm 15^\circ$ (Skew > 0.3) son indicadores de efectos 3-D. La Figura 64-a muestra que el 71% de los valores estimados en todos los sitios para todo el rango de frecuencias están entre $\pm 15^\circ$; indicándonos que no existen efectos 3-D significativos en nuestros datos.

Otro indicador de dimensionalidad es el desajuste normalizado entre la impedancia observada y la estimación obtenida del método de descomposición de Groom-Bailey. Un desajuste normalizado mayor a 1.0 es indicativo de que la hipótesis de un modelo regional 2-D no es aceptable. La Figura 64-b muestra el

desajuste normalizado en función de la frecuencia para todos los sitios. Para las altas frecuencias en la mayoría de los sitios el ajuste es mayor a 1.0, y se reduce a valores cercanos a 1.0 cuando el periodo se incrementa (baja frecuencia), por lo que razonablemente puede aceptarse la hipótesis de un modelo regional 2-D distorsionado por heterogeneidades superficiales 3-D.

En algunos sitios localizados al Este del perfil (7, 8, 11 y 16) el desajuste para periodos entre 10 y 100 s nos indica que el modelo no es 2-D.

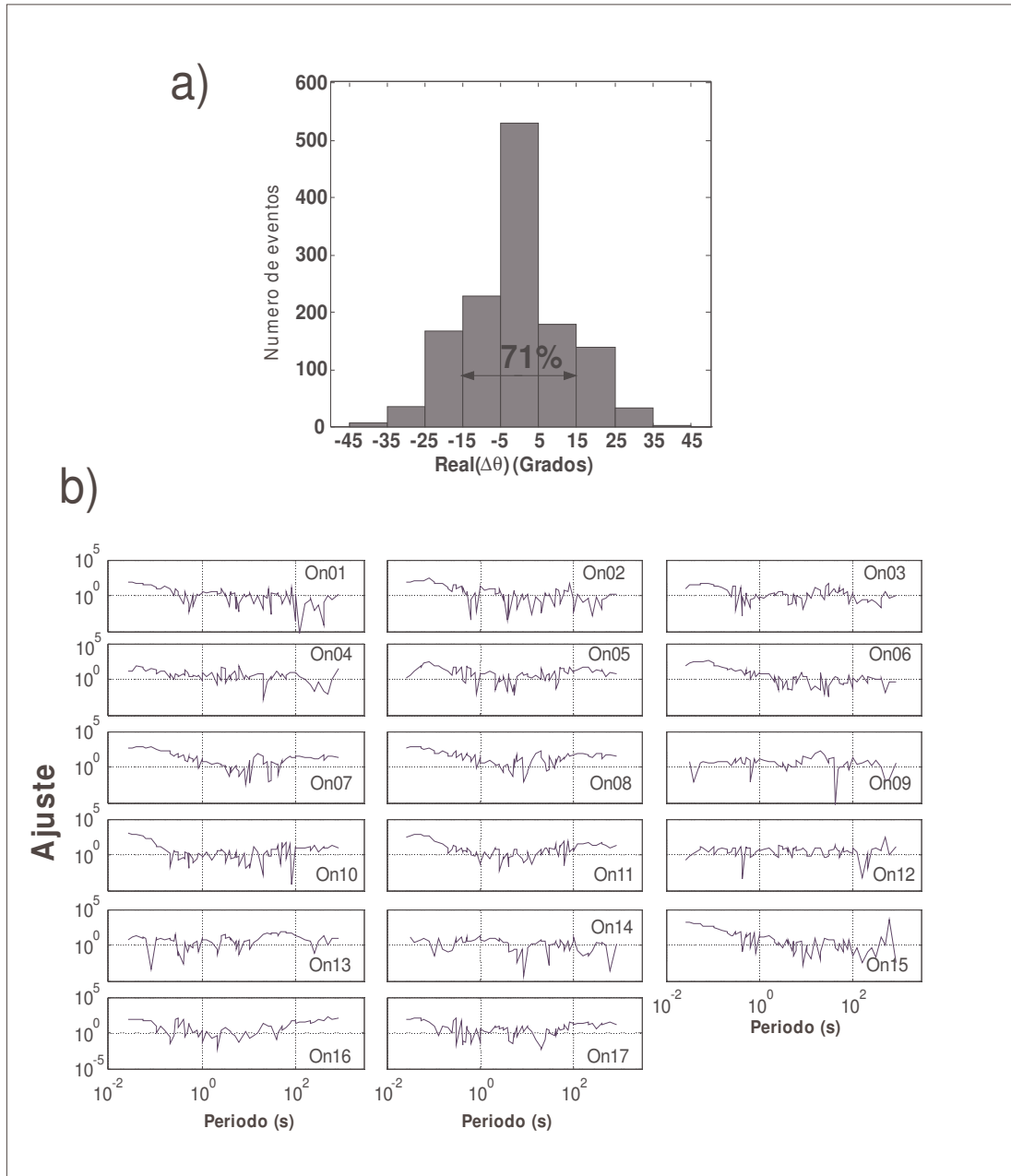


Figura 64. a) Distribución del Skew de la impedancia estimada de la parte real de la diferencia angular $\Delta\theta$. Valores mayores a $\pm 15^\circ$ indican efectos 3-D significativos. b) Ajuste normalizado entre las respuestas de la impedancia calculada y observada del proceso se descomposición de Groom-Bailey. Ajustes mayores que 1.0 son indicativos de efectos 3-D.

V.1.3.2 Rumbo de la impedancia

Romo et al. (2005) muestra que la parte real de $\bar{\theta}$, descrita en la ecuación (8), es el equivalente al ángulo de rotación de Swift o rumbo de la impedancia, el cual es un buen indicador de la geometría estructural, siempre y cuando ésta sea cercana a 2-D (Swift, 1967).

La estadística de este parámetro se muestran en diagramas de rosa, en la Figura 65, toda la banda de frecuencia fue dividida en dos ventanas: de $0.01 < T < 1$, mostrada en color gris y de $1 < T < 1000$ s en color negro. En la mayoría de los sitios el azimut estimado en ambas bandas de frecuencia son relativamente consistentes, excepto en los sitios 15, 13, 5 y 1, donde el cambio de azimut con la frecuencia indica una variación del rumbo de la estructura con la profundidad.

La banda de baja frecuencia tiene valores cercanos a 320° y/o 40° en muchos de los sitios, pero en los sitios 2, 3, 7, 8 y 17 los valores del azimut apuntan al norte.

Así también, como se observa en la Figura 65, un valor de azimut entre 300° y 350° es consistente con el rumbo de la mayoría de las fallas activas en el área.

La Figura 66 muestra que el método de descomposición de Groom-Bailey calcula valores de azimut con mayor dispersión pero bastante parecidos a los nuestros, por lo que podemos concluir que nuestro perfil puede ser interpretado confiablemente en términos de una estructura en dos dimensiones (2-D).

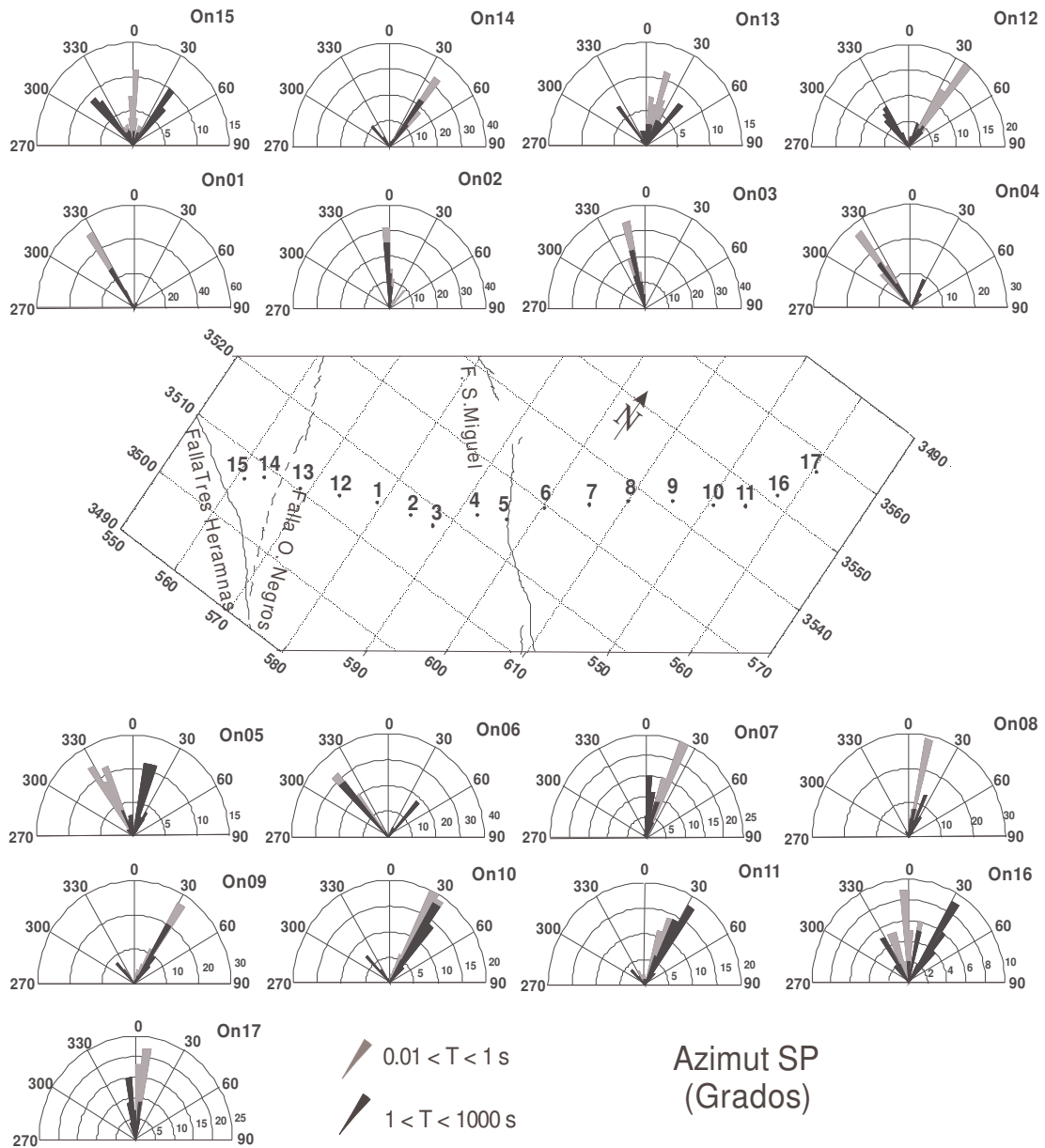


Figura 65. Diagrama de rosas que muestra el rumbo de la impedancia o azimut estimado del promedio angular $\bar{\theta}$ en cada uno de los sitios. El color gris es usado para periodos cortos menor a 1 segundo; para periodos largos mayores a 1 segundo se muestran en color negro. El mapa muestra la localización y rumbo de las Fallas principales y la ubicación de los sitios MT.

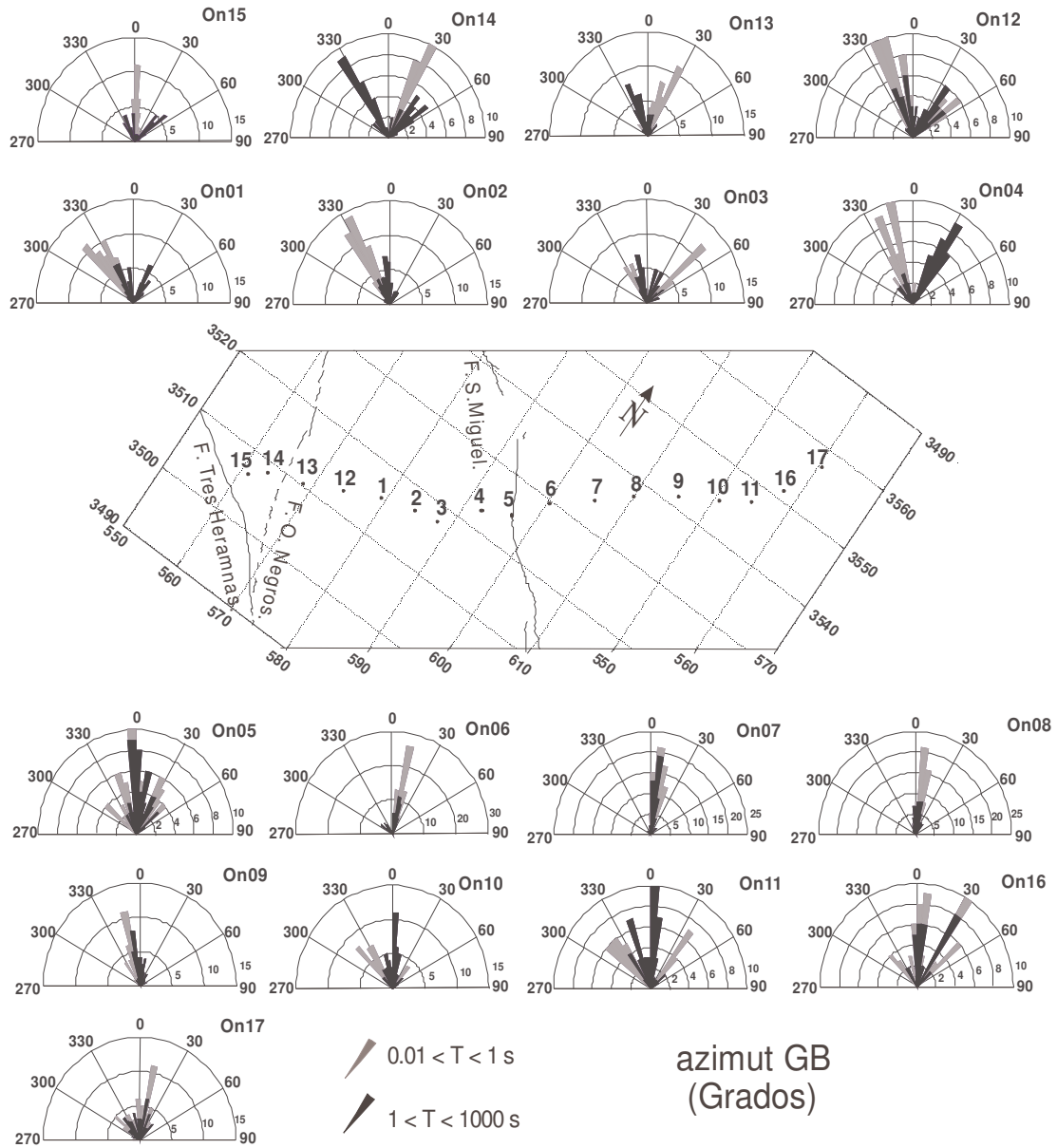


Figura 66. Diagrama de rosas mostrando el rumbo de la impedancia o azimut estimado del proceso de descomposición de Groom-Bailey. El color gris es usado para periodos cortos menores a 1 segundo, para periodos largos mayores a 1 segundo se muestran en color negro. El mapa muestra la localización y rumbo de las Fallas principales y la ubicación de los sitios MT.

V.1.3.3 Vectores de inducción

Para la inversión de los modos convencionales TE-TM, el análisis de dimensionalidad se realizó utilizando los vectores de inducción calculados del campo magnético vertical (Vozoff, 1991), debido a que son indicativos de la geometría regional.

En la banda de la alta frecuencia el campo vertical tiene baja amplitud y es producto de heterogeneidades laterales someras, por otra parte las bajas frecuencias dependen principalmente de la estructura regional.

La parte real de los vectores de inducción son usados comúnmente con una convención de signos; en donde la dirección de las flechas apunta hacia los cuerpos conductores y se aleja de los resistivos.

La Figura 67 muestra las flechas de los vectores de inducción siendo muy consistentes con la información regional y el modelo obtenido, indicándonos una anomalía conductora hacia le SW de la Falla San Miguel. La Falla de Ojos Negros localizada entre los sitios 13 y 14 es también asociada a una anomalía conductora y se los indican los vectores.

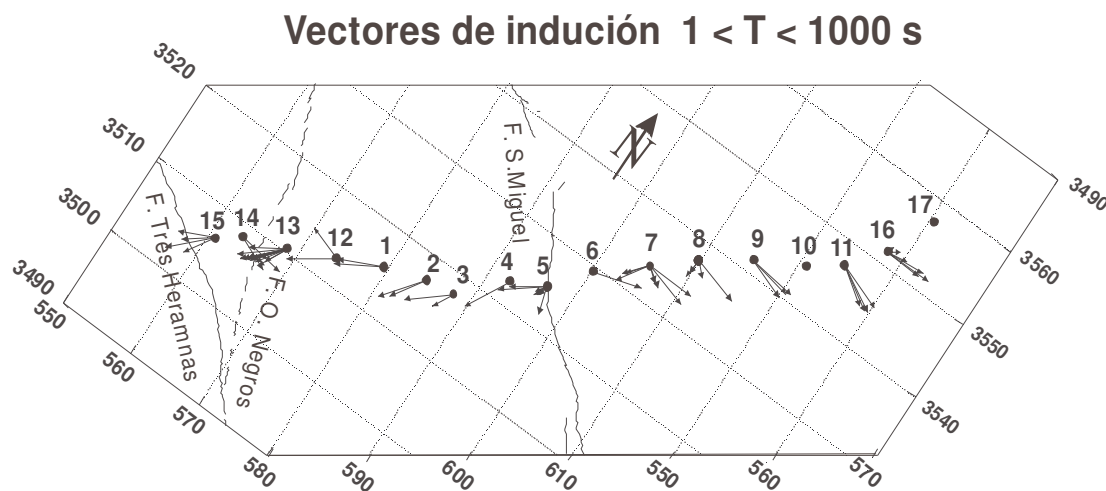


Figura 67. Vectores de inducción estimados en cada uno de los sitios en un rango de periodos entre 1 a 1000 segundos. Mostrándonos la convención de que las flechas apuntan hacia las zonas conductoras

V.1.4. Estimación del factor de estática

Para calcular los factores de estática en las curvas de resistividad aparente causados por efectos galvánicos someros, usamos una metodología similar a la propuesta por Ogawa (2002) y Wu et al. (1993)

El primer paso fue usar inversión en 2-D, ajustando solo las fases, la respuesta del modelo fue entonces utilizada para calcular el factor de corrimiento estático para resistividad aparente "serie" (o pseudo TM). El segundo paso fue invertir la resistividad aparente serie y ambas fases, cuya respuesta la utilizamos para calcular el factor de corrimiento estático en los datos de resistividad aparente paralelo (o pseudo TE). Las curvas corregidas con sus respectivos factores de corrimiento estático fueron invertidas simultáneamente utilizando el algoritmo descrito anteriormente. Los modelos obtenidos se describen más adelante.

V.1.5 Datos de Sismicidad local

La actividad micro sísmica fue registrada en el área por Frez et al (2000), usando 16-20 estaciones digitales colocadas en arreglos previamente planeados para registrar actividad local. Las estaciones sísmicas utilizadas fueron sismógrafos Reftek 72^a-07, equipados con sismómetros de periodo corto de tres componentes Mark L-22.

Miles de eventos ($0.2 < M < 4.0$) se registraron durante dos periodos separados de grabación de un mes cada uno.

Se realizó la localización hipocentral de alrededor de 400 eventos, todos ellos con un mínimo de seis estaciones y en distancias epicentrales más cortas que la profundidad focal calculada. El 90% de los casos fueron grabados con incertidumbres máximas de 1 km, y nunca excedieron de 1.5 km; el 80% de las localizaciones tuvieron errores tiempo-origen menores a 0.07 s (Frez *et al.*, 2000). No hubo correlación evidente entre la magnitud y la profundidad, probablemente porque las magnitudes registradas en estos periodos de tiempo fueron muy pequeñas.

La Figura 68-a muestra todos los epicentros con las fallas mapeadas en la región. Los círculos rojos indican eventos localizados dentro de una banda de 10 km alrededor del perfil MT, los triángulos negros representan los sitios MT. Los epicentros están ampliamente distribuidos entre la Falla de San Miguel y Ojos Negros-Tres Hermanas, verticalmente los eventos se acumulan a una profundidad

entre 14-15 km, con un segundo grupo alrededor de 4-5 km, como se muestra en la Figura 68-b

Los hipocentros fueron calculados con un modelo de capas de distinta velocidad cuidadosamente seleccionado a fin de minimizar los residuales de los tiempos de arribo de los eventos locales (Frez *et al.*, 2000). Una prueba de sensibilidad mostró que los hipocentros no son sensibles a cambios de velocidad en profundidades mayores a 10 km, como es de esperarse debido a la naturaleza local de los eventos seleccionados.

Soluciones de planos de Falla calculados por Frez *et al.* (2000), para 50 eventos sísmicos, muestran que la mayoría de los eventos localizados a lo largo del plano de la FSM son predominantemente de desplazamientos lateral o de rumbo con una pequeña componente normal, curiosamente ellos encontraron que tres de cuatro mecanismos focales determinados para eventos localizados dentro del Valle de Ojos Negros, son puramente normal.

Después de análisis del plano focal Frez *et al.* (2000), concluyeron que el esfuerzo tectónico que actúa en el área estudiada tiene un eje tensional en dirección E-W, con ejes de compresión orientados a lo largo de la dirección N-S, en correlación con el esfuerzo regional, a lo largo del sistema de Fallas transcurrentes NE-SW, San Andrés-Golfo de California.

Por otra parte ellos concluyen que los mecanismos normales encontrados dentro de la región del Valle de Ojos Negros, no representan suficiente evidencia para determinar la fuente de tal actividad.

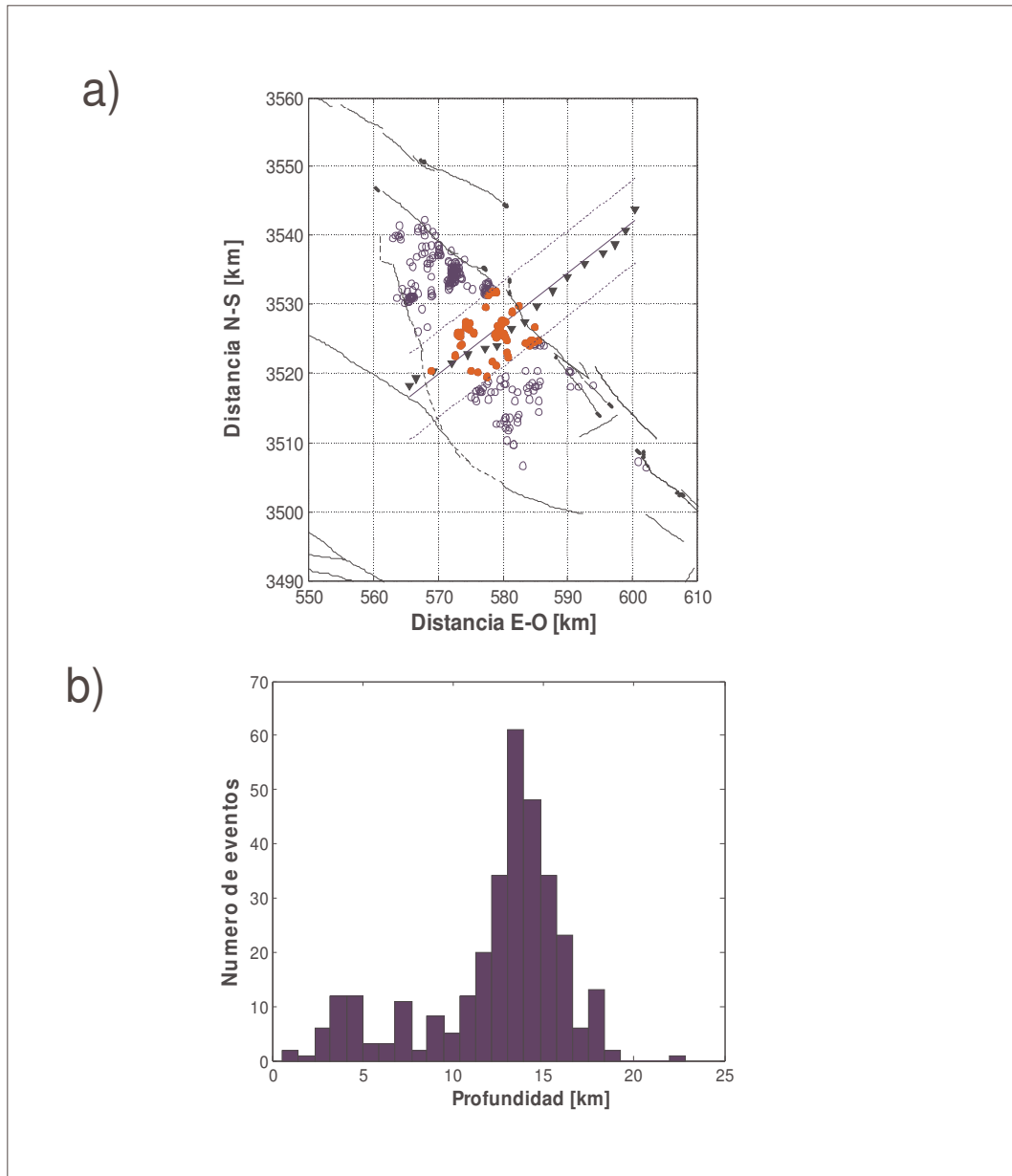


Figura 68. a) Mapa de localización de los sismos ($0.2 \leq M \leq 4.0$) registrados por una red sísmica local en un periodo de un mes. Los triángulos negros representas los sitios MT y los círculos rojos son los epicentros localizados en una banda de 10 Km a lo largo del perfil MT; los círculos abiertos son los epicentros localizados fuera de la banda de 10 km. b) Distribución en profundidad de los hipocentros, para los eventos mostrados en las Figuras 72 y 73. El histograma muestra que la mayoría de los sismos están entre 14 y 15 km de profundidad con un pequeño grupo alrededor de 4-5 km de profundidad.

V.1.6 Modelo Serie-Paralelo

Utilizamos una versión adaptada del algoritmo de inversión de Gauss-Newton, originalmente codificado por Rodi y Mackie (2001), modificado para incluir la matriz de derivadas parciales de las respuestas S-P respecto a cambios en el modelo de resistividades. El algoritmo iterativo minimiza el ajuste entre los datos observados y la respuesta del modelo en el sentido de mínimos cuadrados. Al mismo tiempo, la rugosidad del modelo es constreñida minimizando la variación de la resistividad en cada celda. El compromiso entre el ajuste de los datos y la rugosidad del modelo es controlado por el parámetro de regularización llamado τ .

Ambas impedancias serie y paralelo fueron invertidas simultáneamente para obtener un modelo de resistividad en una sección a lo largo del perfil MT. Inicializamos con un semiespacio homogéneo de 10 ohm-m, buscando una distribución de resistividades que considere un compromiso entre el ajuste de los datos y el modelo más suave posible. Los modelos demasiado suaves ajustan poco a los datos, por otra parte reducir demasiado el desajuste de los datos resulta en modelos rugosos inaceptables.

Exploramos el espacio de soluciones usando diferentes valores para el parámetro de regularización. El mejor modelo u óptimo se encontró utilizando el criterio de la curva L, (Farquharson y Oldenburg, 2004), es decir el modelo con el mejor balance entre el ajuste de los datos y la rugosidad del modelo.

V.1.6.1 Interpretación del modelo

La Figura 69 presenta el modelo “óptimo”, obtenido con el factor de regularización $\tau = 30$. La figura muestra solo el área de interés, debido a que el modelo se extiende lateralmente y en profundidad por varios kilómetros para evitar efectos numéricos en los bordes. La gráfica de barras en la parte superior del modelo muestra el ajuste obtenido en cada sitio, en un rango de 2 a 8 desviaciones estándar (sd), es decir de 10% a 40% con un error de 5% de error en los datos de resistividad aparente y 2.5 grados en la fase. Después de 400 iteraciones el desajuste total de todo el conjunto de datos fue de 22.9% (~ 4.6 sd). La Figura 71 compara sitio por sitio las curvas observadas (símbolos) con las respuestas calculadas producidas por nuestro modelo (línea continua). Mostramos un sitio si y otro no a lo largo de la línea incluyendo dos de los mejores ajustados (sitios 15 y 7) y unos de los peores (sitio 17). El valor de rms por sitio es calculado incluyendo las dos curvas de resistividad aparente y las dos de fase. Se puede observar que ambos, resistividad aparente y fase son reproducidas bastante bien por el modelo, en la mayoría de los sitios y en todo el rango de periodo. En general, los ajustes obtenidos nos permiten concluir que el modelo de resistividad, mostrado en la Figura 69 explica bien las observaciones a lo largo del perfil.

El rasgo más sobresaliente en el modelo es la anomalía de alta conductividad localizada en profundidad al lado oeste del perfil. Esta zona tiene una resistividad muy baja de alrededor de 1 ohm-m, su cima se localiza a 10 kilómetros de profundidad debajo de los sitios 13 a 03 y profundiza hacia el este hasta ~ 25 km

debajo de los sitios 07 a 11. Al este de sitio 04 el modelo muestra una anomalía de alta resistividad (~ 10000 Ohm-m), extendiendo prácticamente desde la superficie hasta 20 kilómetros de profundidad. Existen pequeñas zonas de baja resistividad en profundidades someras (1 a 2 km) localizados bajo los sitios 12, 06 y 16, respectivamente. Al final del lado Este del modelo, bajo el sitio 17, se localiza una zona de baja resistividad a una profundidad de 5 kilómetros que parece extenderse verticalmente hacia abajo. Como esta zona está en el extremo del perfil, no está correctamente constreñida por nuestras medidas, así que no será incluida en la discusión.

V.1.7 Modelo TE-TM

Vale la pena mostrar un modelo de resistividad resultante al utilizar una metodología convencional, como el método de descomposición de Groom-Bailey (GB). Los parámetros de GB primeramente fueron estimados sin restricciones, el ángulo de rotación se muestra en la Figura 66. Posteriormente estimamos las impedancias restringiendo el ángulo de rotación a un azimut de 324° en todos los sitios, de acuerdo con el rumbo de las principales estructuras, las cuales son casi perpendiculares a la dirección del perfil.

Las impedancias de GB calculadas, se invirtieron empleando el código original de Gauss-Newton (Rodi y Mackie, 2001) para la inversión bidimensional de los modos TE-TM. Usamos la misma discretización utilizada para el modelo s-p y el mismo número de iteraciones. La búsqueda del mejor modelo se realizó con distintos parámetros de regularización, el elegido fue el que tuviera el mejor compromiso entre el ajuste y la rugosidad, siendo el modelo de resistividad de $\tau = 50$; que se muestra en la Figura 70.

V.1.7.1 Interpretación del modelo

En este caso el rms total fue de 33.4% comparativamente más alto que le obtenido con el modelo s-p. Cabe mencionar que con estos datos no alcanzamos valores rms menores a 33%, aún usando factores de regularización inferiores que acentúan el ajuste de los datos a expensas de un modelo rugoso. Esto sugiere que las curvas s-p son más fáciles de ajustar que las curvas TE-TM,

probablemente porque las funciones de sensibilidad toman en cuenta regiones más amplias en el subsuelo; así que produce modelos más suaves con ajustes mejores. Las curvas s-p son una especie de promedio de los cuatro elementos del tensor, así como las curvas TE-TM son los valores de la diagonal principal del tensor en el caso 2-D, por lo que es necesario contrastes más altos en el modelo para reducir el ajuste de las curvas TE-TM.

La comparación entre las curvas de datos TE-TM; observados y calculados se muestra en la Figura 72. El mejor ajuste fue obtenido fue en el sitio 05 (3.3 sd) y el peor ajustado fue el sitio 09 (13.0 sd). Nuevamente el modelo reproduce en gran medida las observaciones en la mayoría de los sitios en todo el rango de frecuencia. En conclusión, el modelo de la Figura 70 muestra esencialmente la misma información del subsuelo que el obtenido con los datos s-p, es decir la anomalía conductora localizada debajo de los sitios 13 a 03; aunque en este caso no se extiende tanto y el ángulo de buzamiento hacía el NE no es tan evidente como en el modelo s-p.

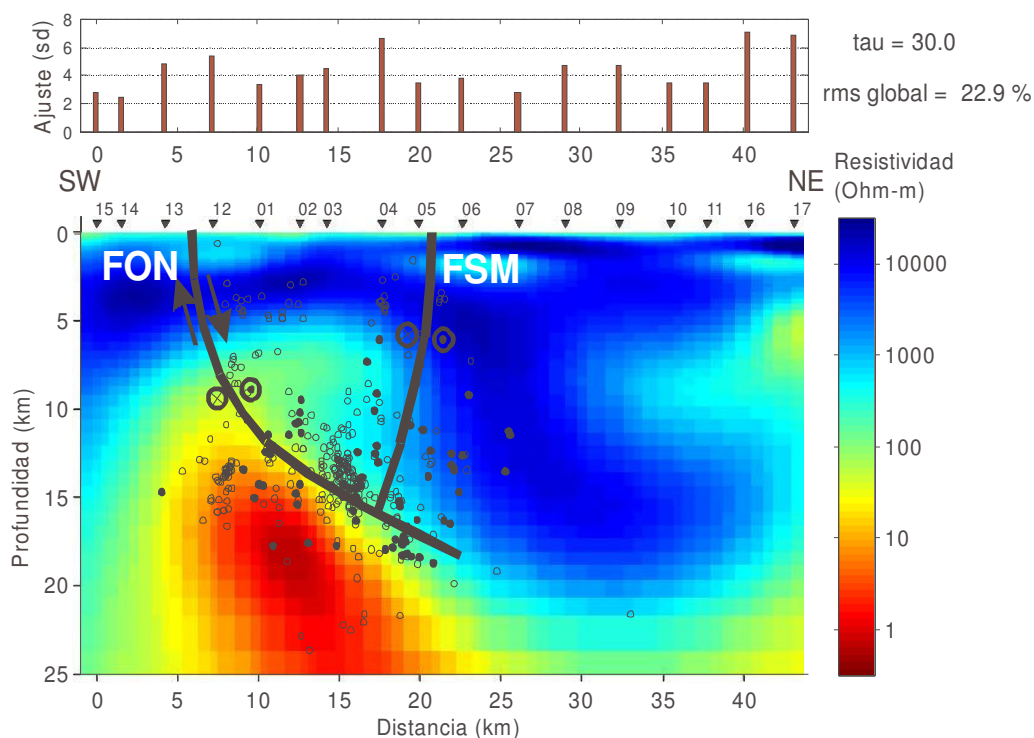


Figura 69. Modelo de resistividad resultante de la inversión 2-D con la impedancias s-p. Los triángulos pequeños representan la localización de los sitios MT medidos. En la parte superior del modelo de resistividad se muestra el ajuste entre los datos observados y calculados en cada uno de los sitios, en unidades de desviación estándar (1 sd = 5% error). La localización de hipocentros se muestra también en el modelo. Los círculos rellenos y negros corresponden a los hipocentros localizados en una banda de 10 km alrededor del perfil MT. Se indican también los planos de falla inferidos de las Fallas San Miguel (FSM) y Ojos Negros (FON).

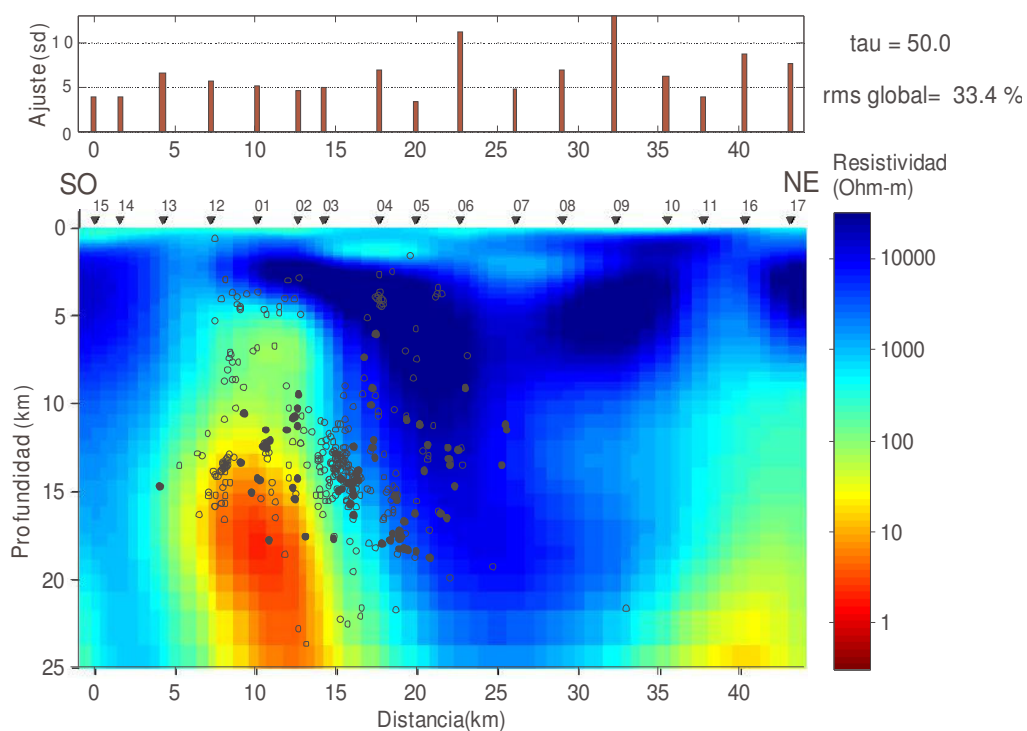


Figura 70. Modelo de resistividad resultante de la inversión 2-D con la impedancias usando los modos TE y TM previo descomposición de Groom y Bailey. Los triángulos pequeños representan la localización de los sitios MT medidos. En la parte superior del modelo de resistividad se muestra el ajuste entre los datos observados y calculados en cada uno de los sitios, en unidades de desviación estándar (1 sd = 5% error). La localización de hipocentros se muestra también en el modelo. Los círculos rellenos y negros corresponden a los hipocentros localizados en una banda de 10 km alrededor del perfil MT.

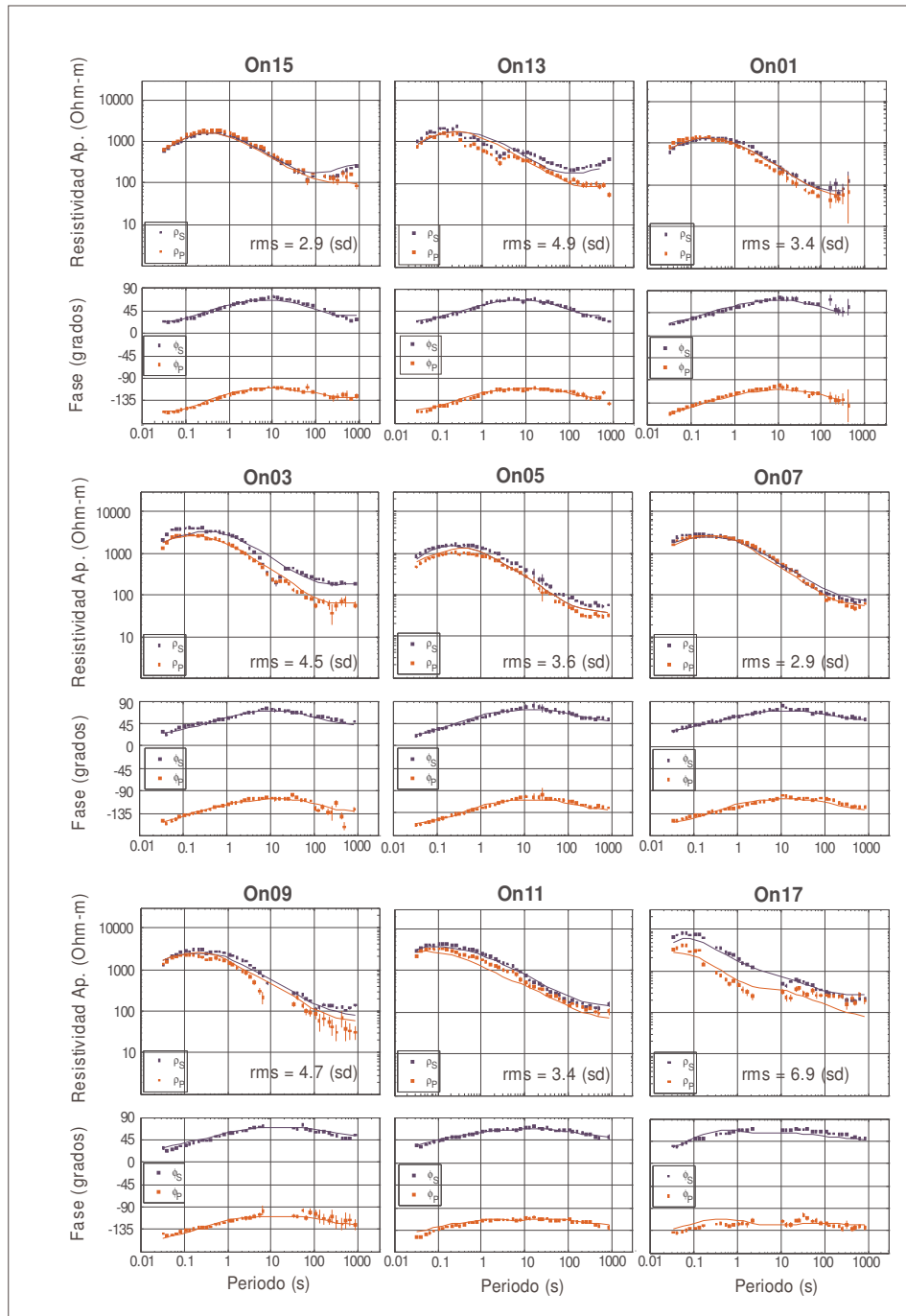


Figura 71. Comparación entre las curvas de resistividad y fase observadas y calculadas. Los símbolos corresponden a la resistividad y fase aparentes s-p observadas. Las líneas continuas es la respuesta del modelo de resistividad de contra profundidad de la Figura 69.

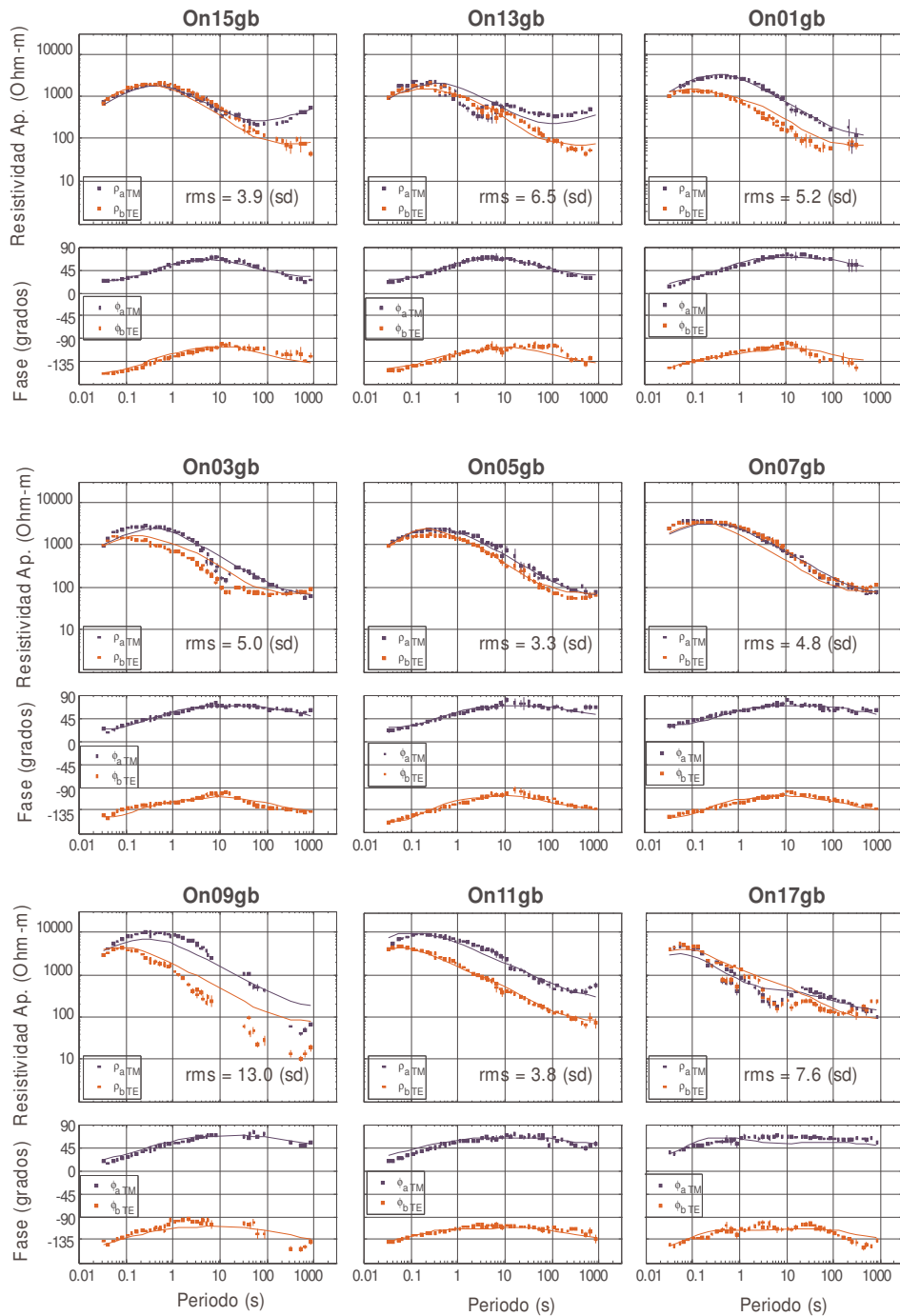


Figura 72. Comparación entre las curvas de resistividad y fase observadas y calculadas. Los símbolos corresponden a la resistividad y fase aparentes de Groom-Bailey observadas. Las líneas continuas es la respuesta del modelo de resistividad contra profundidad de la Figura 70.

V.1.8 Discusión de los resultados del modelo

La Figura 69 nos muestra la localización de los hipocentros en el modelo de resistividad. Los círculos rellenos corresponden a los localizados en una banda de 10 km alrededor del perfil MT, los círculos abiertos son eventos localizados fuera de esta banda (ver Figura 68-a). Un hecho muy notable es que la mayoría de la actividad sísmica se localiza bordeando la cima de la anomalía de alta conductividad en el modelo de resistividad. La cima de esta anomalía de alta conductividad (< 30 ohm-m) está buzando hacia el Este de 10 a 25 km de profundidad. Es evidente que los hipocentros ocurren en una zona con resistividades intermedias (30 a 300 ohm-m) agrupándose en la zona de máximo gradiente. La forma de la anomalía de alta conductividad así como la actitud de los hipocentros nos permite inferir la extensión en profundidad de la falla de Ojos Negros (FON), proponiendo una falla lítrica como se representa en la Figura 68-a. Por otra parte asociamos la zona de la Falla San Miguel en profundidad con una área de mediana resistividad (~ 300 ohm-m) como se muestra en la Figura 68-a.

La FSM es conocida como una de las fallas más activas en la región así como la fuente de terremotos históricos, la cual ha llamado mucho la atención de los sismólogos (Brune *et al.*, 1979; Doser, 1992; Hirabayashi *et al.*, 1996; Johnson *et al.*, 1976; Lomnitz *et al.*, 1970; Reyes *et al.*, 1975; Shor y Roberts, 1958; Suárez-Vidal *et al.*, 1991).

Nuestro resultados revelan la FON es también una estructura importante acomodando movimientos normales y de rumbo; se observa que la falla es

responsable de la mayoría de la actividad sísmica que ha sido mapeada en una amplia distribución dentro del Valle de Ojos Negros.

La distribución espacial de los epicentros mapeados en superficie puede ser explicada debido a que el echado del plano de falla decrece con la profundidad, proyectando una gran área en superficie. Alternativamente la falla San Miguel es una estructura de rumbo con un plano de falla vertical, esto explica algunos de los alineamientos de epicentros observados en la superficie. Ambas estructuras están de acuerdo con el régimen de esfuerzo regional producido por el sistema transtensivo prevaleciente en la zona.

Las anomalías de alta resistividad en el modelo (>1000 Ohm-m) están asociadas a rocas graníticas secas del PRB. La alta resistividad es indicativa de condiciones secas en las rocas y ocurren en zonas donde existe granito sano y no fracturado. Cuando la roca granítica está fracturada y húmeda, su resistividad decrece en varias órdenes de magnitud (Olhoeft, 1981). Por lo que las resistividades medias (30 a 300 ohm-m) pueden ser razonablemente asociadas con rocas graníticas fracturadas, particularmente porque están asociadas con zonas donde la mayoría de los microtemblores están ocurriendo.

La fuente de la anomalía de alta conductividad en el bloque de techo de la FON puede ser asociada a varios factores, el primero y principal es la presencia de fluidos atrapados en las rocas pre-batolíticas meta-sedimentarias. Esta interpretación está de acuerdo con la idea que los fuertes contrastes en resistividad observados a lo largo de la FON pueden estar relacionados con un

contraste composicional entre meta-sedimentos en el bloque de piso y rocas plutónicas fracturadas en el bloque de techo de la FON. Además un gran grupo de autores en la literatura (Bailey, 1990; Marquis y Hyndman, 1992; Shankland y Ander, 1983) argumenta que el agua está atrapada justo debajo de la zona de transición dúctil-quebradiza en la corteza baja, debido a que esta zona actúa como una capa impermeable evitando el ascenso o migración de fluidos producidos por la pérdida de agua en los meta-sedimentos y/o por procesos metamórficos de bajo grado y diagenéticos (Peacock, 1990). En el área de estudio la zona de transición dúctil-quebradiza está localizada entre 13-15 km de profundidad, evidenciada por la distribución de sismos mostrada en la Figura 68-b y soportada por otros análisis de actividad sísmica local y regional (Frez y González, 1991). Adicionalmente las fallas lítricas ocurren comúnmente donde las rocas quebradizas cubren a las dúctiles en una tectónica extensional como el área estudiada (Shelton, 1984).

En algunos casos la presencia de fluidos ha sido aprobada por información geofísica adicional, por ejemplo Mitsuata (2001) encontró, en el noreste de Japón que los micro temblores ocurren justo arriba de anomalías altamente conductoras en coincidencia con la presencia de reflectores de onda S. Los reflectores de onda S son indicadores de la presencia de fluidos, la causa de una anomalía altamente conductora es interpretada como un medio poroso saturado con fluidos. De esta manera ellos sugieren que cuando el fluido migra a zonas menos permeables (más resistivas) como las rocas graníticas, éstas incrementan la presión de poro y generan actividad micro-sísmica.

Un factor adicional que puede producir un aumento de la conductividad es la presencia de grafito, aún en muy pequeñas fracciones de volumen (Duba y Shankland, 1982). El grafito está comúnmente presente en zonas de falla o como producto de procesos metamórficos, particularmente en este caso en los meta sedimentos; se ha demostrado que si los minerales de grafito, si están apropiadamente interconectados pueden ser una causa del aumento de la conductividad. En nuestro caso tenemos ambas condiciones, una zona activa de falla y una intensa historia de metamorfismo; por lo que la presencia de minerales de grafico puede ser una causa razonable de la anomalía de alta conductividad en nuestro modelo. Aunque no descartamos esta probabilidad, los fluidos atrapados parece ser explicación más simple.

Como un punto final, pensamos que la temperatura no es un factor significativo al aumento de la conductividad en el área,. En esta zona los eventos de acreción magmática finalizaron hace 100 Ma, por lo que la temperatura esperada entre 13-15 km de profundidad es de alrededor de 400° C, lo cual está de acuerdo con la localización de la zona de transición dúctil quebradiza determinada por la localización hipocentral. Este rango de temperatura por si solo es un factor insignificante para aumentar la conductividad comparado con el contenido de fluidos (Olhoeft, 1981). Sin embargo, probablemente contribuye a incrementar la salinidad del fluido en los poros, e indirectamente incrementa la conductividad volumétrica de las rocas.

V.2 Perfil magnetotelúrico BC-87

V.2.1 Antecedentes

Como parte del proyecto LITHOPROBE (Clowes *et al.*, 1993), un conjunto de 27 sitios de datos magnetotelúricos de banda ancha (384 Hz a 1820 s) fueron medidos a lo largo de un perfil de 150 km con orientación Este-Oeste, al Sur-Este de British Columbia, Sur-Oeste de Canadá y al Norte de los estados de Washington, Idaho y Montana en Estados Unidos, como se muestra en la Figura 73 (Jones, 1993).

El conjunto de datos se utiliza normalmente en la literatura para probar métodos nuevos de inversión y se le denomina datos BC87, se sabe que los datos reflejan la tridimensionalidad del subsuelo por lo que representan un buen ejemplo para probar nuevas técnicas de procesamiento..

En la literatura existen varios modelos reportados, podemos mencionar a Eisel y Karsten 1993, Jones y Groom (1993), Ledo y Jones (2001), entre los más importantes.

Jones y Groom (1993) realizaron inversiones 2-D de estos datos mediante inversión tipo Occam, encontraron que el modelo que representa mejor las propiedades resistivas del subsuelo es el que se muestra en la Figura 74.

Uno de los modelos más recientes es el publicado por Ledo y Jones (2001), el cual utilizó el algoritmo de inversión RRI (Smith y Booker, 1991), con los modos TE y TM. La Figura 75 muestra el modelo de resistividad obtenido, en el cual podemos observar entre sus principales rasgos un cuerpo resistivo asociado el

batolito Nelson (NB) y la presencia de una falla que se muestra como un contraste de resistividades (conducto- resistivo) y se indica con línea punteada (SLF). Estos rasgos son importantes y son los que se busca que otros modelos representen.

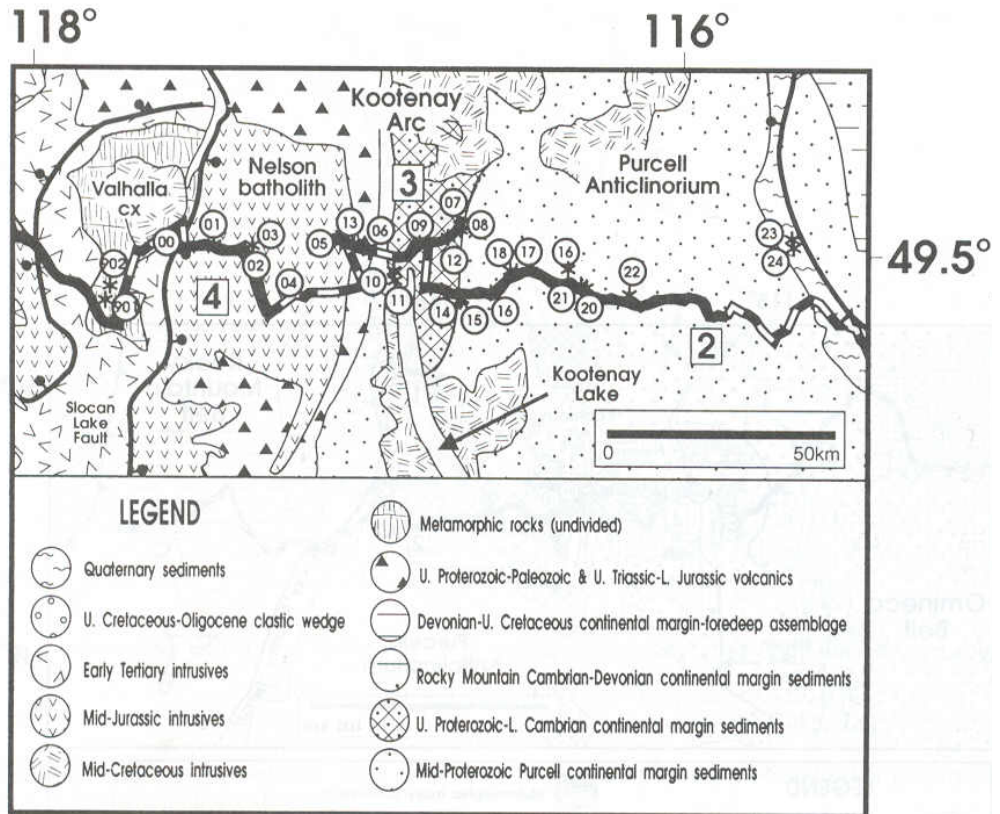


Figura 73. Localización de sitios MT BC87, con síntesis geológica regional, tomada de (Jones, 1993).

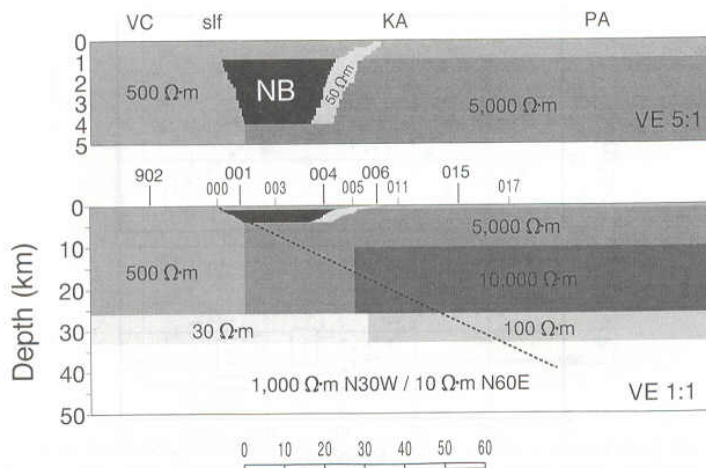


Figura 74. Interpretación 2-D que representa mejor las propiedades del subsuelo en base a información geológica y el ajuste con las mediciones realizadas mediante el programa Occam2, tomado de (Jones y Groom, 1993).

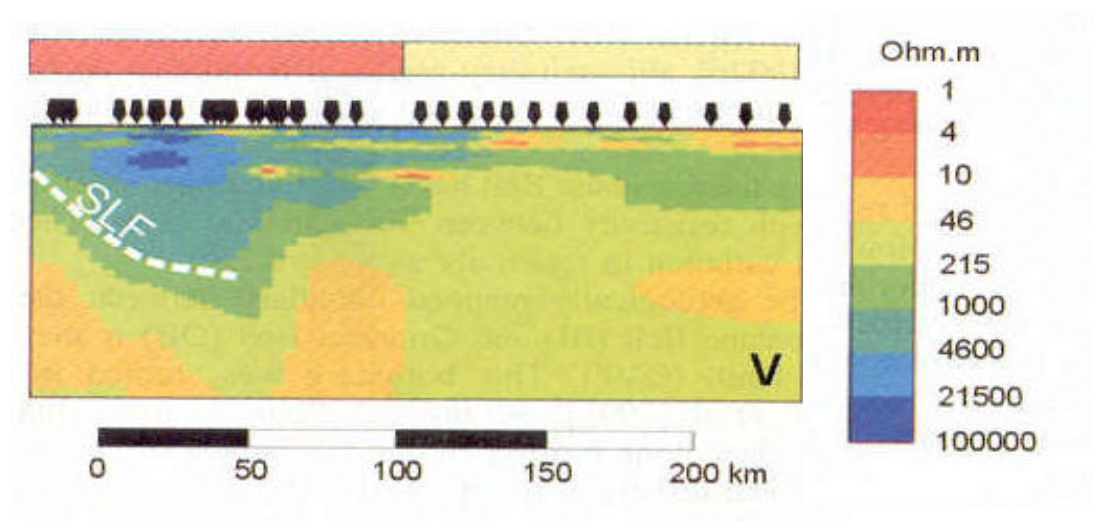


Figura 75. Modelo de resistividades obtenido por (Ledo y Jones, 2001), usando el algoritmo de inversión RRI (Smith y Booker, 1991) y los modos TE y TM. Los primeros 100 km del modelo son los correspondientes con los nuestros. SLF corresponde al trazo inferido de la Falla Slocan.

V.2.2 Modelo Serie-Paralelo

Del conjunto de datos BC87 elegimos 17 a lo largo de un perfil de 115 km de longitud aproximadamente. Debido a los efectos tridimensionales algunos datos localizados al oeste presentan fases fuera de cuadrante, principalmente en periodos largos (Jones y Groom, 1993; Jones *et al.*, 1988). Para el modo paralelo este efecto fue más marcado, después de hacer varias pruebas decidimos eliminar las frecuencias (datos) en donde las fases estuvieran fuera del cuadrante. Con los datos limpios realizamos la inversión bidimensional utilizando el algoritmo de Rodi y Mackie (2001) modificado para utilizar las impedancias invariantes serie-paralelo, calculamos varios modelos con distintos parámetros de regularización (τ); utilizando el criterio de la curva L y elegimos el mejor modelo, el cual se muestra en la Figura 76

V.2.3 Modelo con promedios recursivos

Realizamos dos, cuatro y seis promedios recursivos a los datos del perfil BC87, después del proceso de inversión utilizando el programa de modificado de Rodi y Mackie (2001) elegimos el mejor modelo para cada promedio a partir de diferentes modelos con distintos parámetros de regularización (τ). Los modelos para dos, cuatro y seis promedios se muestran en las Figuras 80, 81 y 82.

De los tres modelos el de seis promedios que se muestra en la Figura 79 para el cual las curvas de resistividad y fase para los modos serie y paralelo son idénticas a las del determinante, nuevamente confirmamos la tendencia de los promedios iterativos s-p al determinante del tensor. Como podemos ver el ajuste de los datos es mejor conforme aumenta el número de promedios. los de cuatro y seis es mucho mejor que le original s-p, pero es igual con cuatro que con seis, debido a que los cambios en los datos es mínimo por la rápida tendencia de las curvas a ser similares entre sí.

Respecto a los resultados de los distintos modelos de resistividad mostrados con anterioridad muestran resultados muy similares todos presentan los rasgos característicos o esperados, podemos observar el cuerpo resistivo entre los sitios 01 a 13, asociado a la presencia del Batolito Nelson, sí como el cuerpo conductor que lo bordea hacia el oeste del mismo. De la misma manera observamos el contraste de resistividades (conductor-resistivo) al este del mismo asociado a la presencia de la Falla Slocan (SLF).

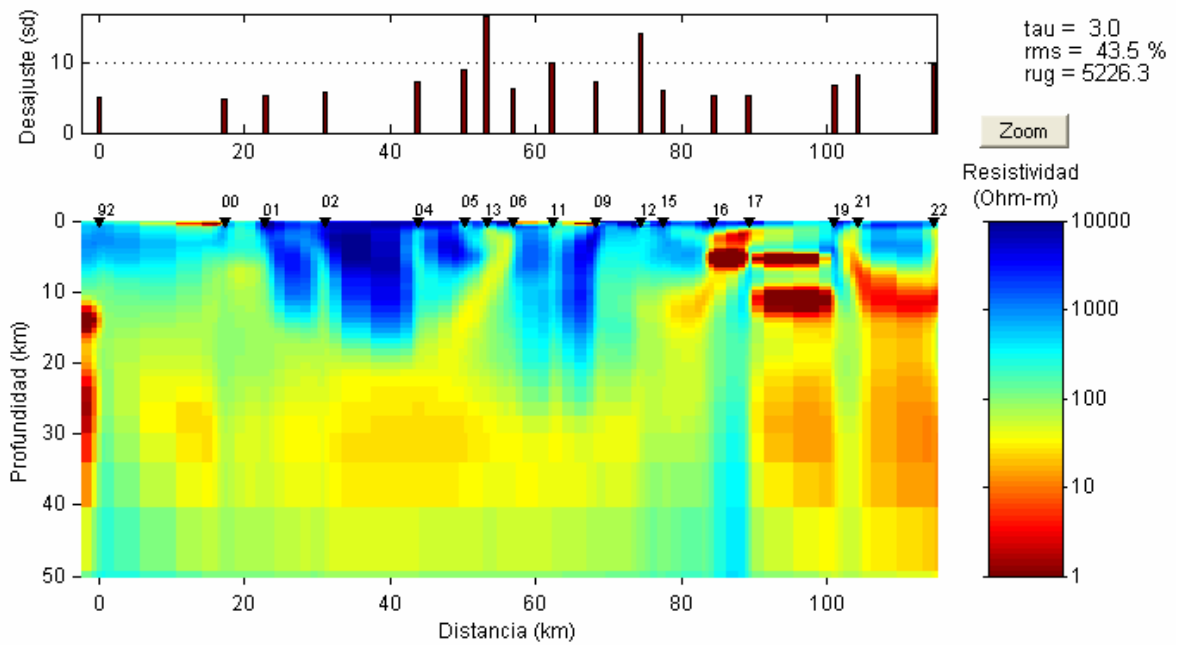


Figura 76. Modelo de resistividades del perfil MT BC87, utilizando la transformación serie-paralelo original.

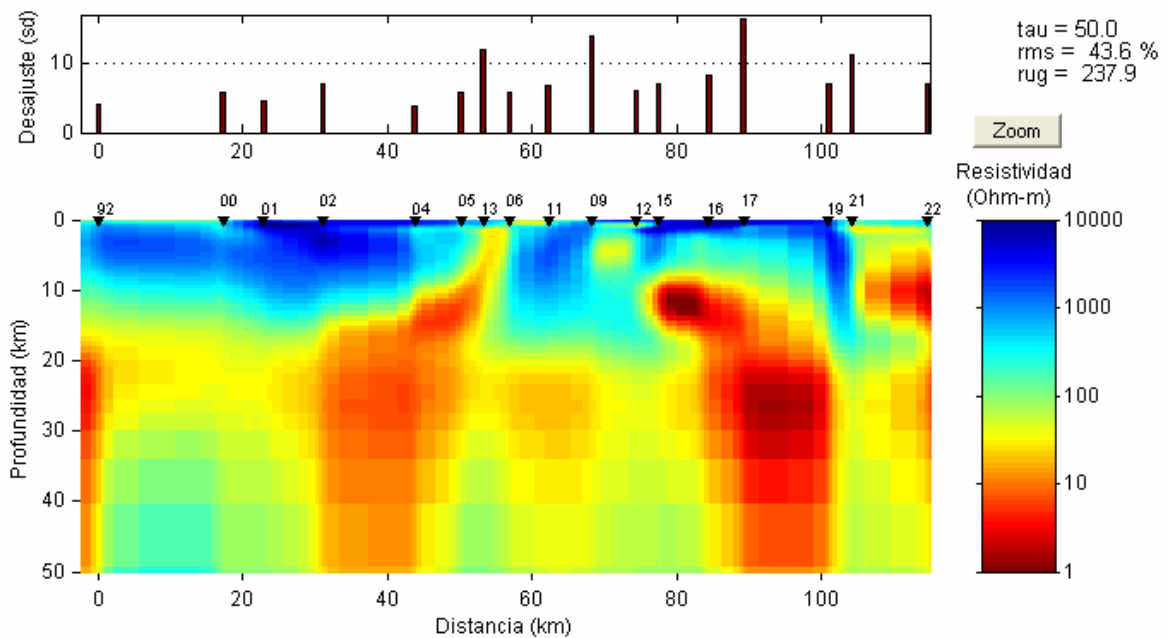


Figura 77. Modelo de resistividades del perfil MT BC87 utilizando dos promedios recursivos.

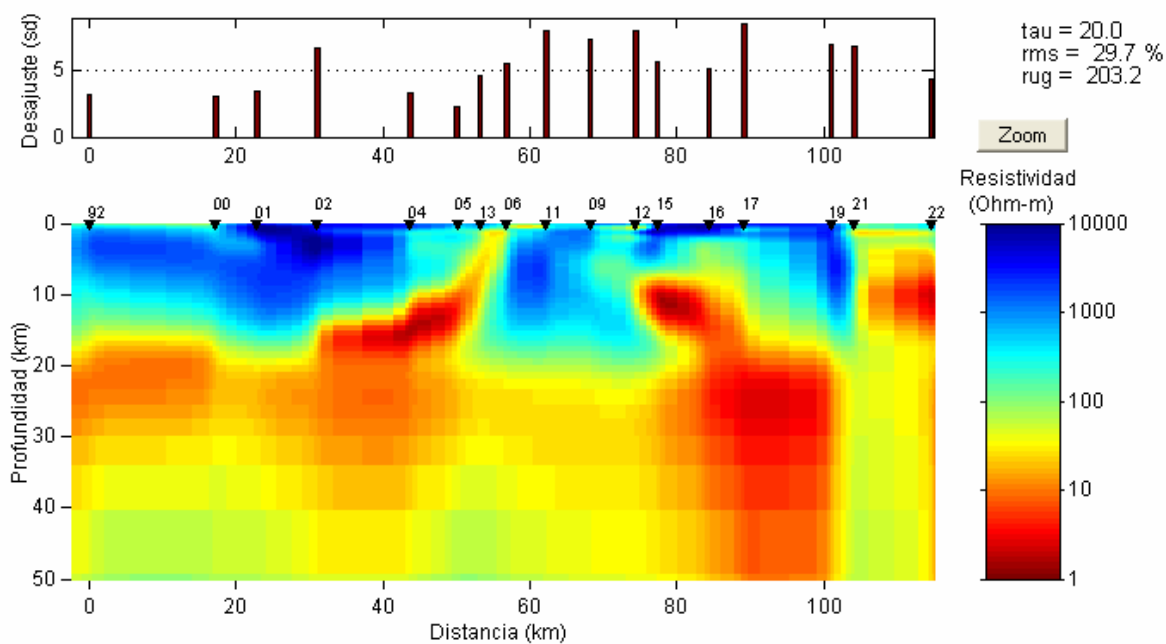


Figura 78. Modelo de resistividades del perfil MT BC87 utilizando cuatro promedios recursivos.

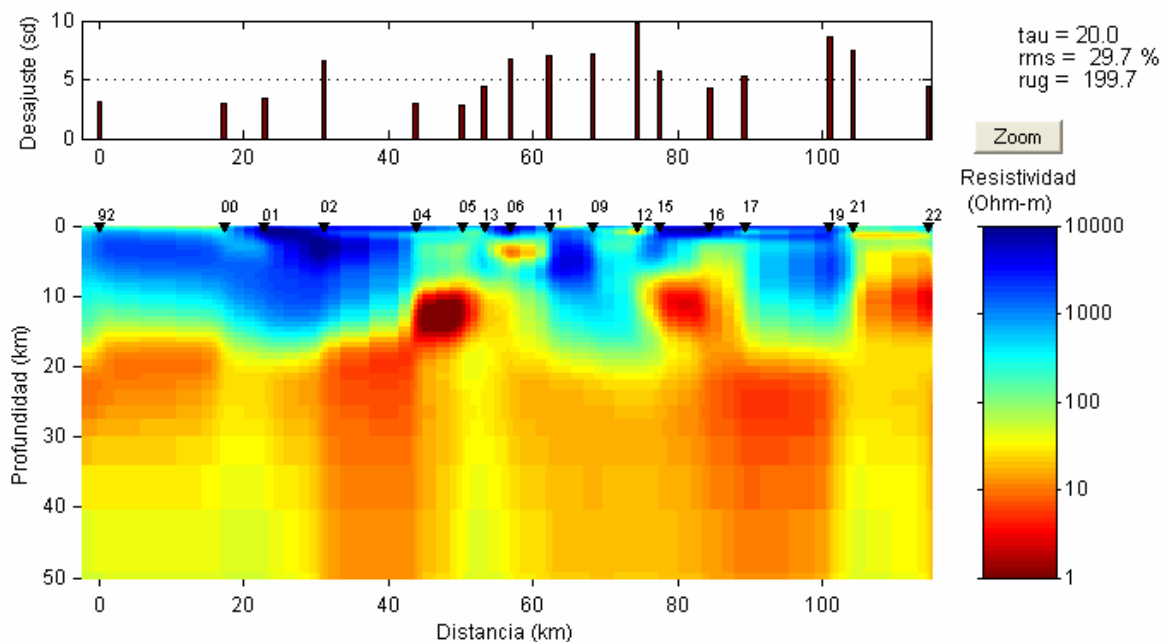


Figura 79. Modelo de resistividades del perfil MT BC87 utilizando seis promedios recursivos.

VI CONCLUSIONES

Las impedancias s-p son una especie de promedio de los elementos del tensor original, al aplicar estos promedios en forma sucesiva el resultado se acerca cada vez más al promedio geométrico, i.e. al determinante del tensor original, Es posible utilizar las respuestas en cualquier etapa de la sucesión de promedios para obtener modelos del subsuelo. Los experimentos realizados muestran que basta con un par de promedios para obtener curvas muy cercanas al determinante, de manera que los modelos resultantes no son muy diferentes de los obtenidos con el determinante. Se derivaron las ecuaciones necesarias para la estimación de incertidumbre tanto de las impedancias s-p, como de sus promedios recursivos.

Se analizaron las virtudes y defectos de las distintas funciones de respuesta: TE-TM, S-P y determinante, así como los promedios S-P, mediante las funciones de sensibilidad que relacionan las variaciones de las respuestas en cada sitio de observación respecto a las variaciones en el modelo. Se utilizaron modelos sintéticos simples.

En un modelo homogéneo la sensibilidad TE es diferente de la sensibilidad TM. En el TM los efectos locales dominan la respuesta independientemente del periodo, mientras que en el TE la sensibilidad va extendiéndose tanto lateralmente como en profundidad a medida que aumenta el periodo.

Las sensibilidades serie paralelo y determinante son iguales. En todas ellas los efectos locales dominan completamente las respuestas independientemente del periodo. .

Para el modelo de un contacto lateral conductor-resistivo podemos concluir lo siguiente: para un sitio localizado del lado conductor la respuesta y la sensibilidad TE y serie son similares, mientras que la respuesta y sensibilidad TM es similar a paralelo. En todos los casos la sensibilidad al bloque resistivo es muy pequeña, los modos TM y el paralelo son los que presentan un poco de sensibilidad al bloque resistivo.

Por otro lado, un sitio localizado del lado resistivo la respuesta y la sensibilidad TM y serie son similares, mientras que TE se te parece más al paralelo. En contraste con el caso anterior, el sitio en el bloque resistivo se ve sumamente afectado por la presencia del bloque conductor lateral.

Respecto a la inversión 2-D de datos sintéticos 3-D podemos concluir lo siguiente:

La inversión conjunta s-p recupera el modelo de buena forma, con resultados muy parecidos a la inversión conjunta de los modos TE-TM.

El determinante del tensor es el que peor recupera el modelo. La base de los cuerpos propuestos (conductor y resistivo) no se define y en su lugar aparece una sombra que se extiende con la profundidad.

Los promedios s-p presentan resultados intermedios entre las impedancias s-p originales y el determinante.

Del perfil de datos reales Ojos Negros, concluimos lo siguiente:

El rasgo principal del modelo es un cuerpo conductor localizado debajo de Valle de Ojos Negros, su cima se localiza a 10 km y profundidad hasta ~ 25 km y su limite al Este coincide con el trazo de la Falla San Miguel en superficie, en una zona de mediana resistividad en profundidad. Se observa que la mayoría de la actividad sísmica se localiza bordeando la cima de la anomalía de alta conductividad en el modelo, debido a la forma de la anomalía de alta conductividad así como la actitud de los hipocentros nos permite inferir la extensión en profundidad de la falla de Ojos Negros (FON), proponiendo una falla lístrica. La anomalía de baja resistividad la asociamos principalmente a la presencia de fluidos dentro de rocas pre-batolíticas meta-sedimentarias.

La zona de resistividad intermedia donde se localizan la mayoría de los hipocentros (zona sismogénica), es el área dúctil-quebradiza que funciona como una barrera de los fluidos atrapados debajo la misma.

Respecto a los datos BC87 podemos concluir lo siguiente: logramos generar modelo de resistividad del subsuelo con los rasgos principales esperados para dicho conjunto de datos, todos los modelos presentados muestran resultados aceptables con lo ya publicado para dichos datos.

Los modos s-p permiten obtener un modelo de resistividades con resultados muy similares a los obtenidos con los modos tradicionales TE-TM. Con la ventaja de no depender de la direccionalidad de los datos. Los promedios s-p demostraron ser

otra opción para el procesado de este tipo de datos, permitiendo obtener modelos comparables a los existentes, con un ajuste más rápido y mejor.

VII LITERATURA CITADA

- Bahr, K. 1988. Interpretation of the magnetotelluric impedance tensor: regional induction and local telluric distortion. *Journal of Geophysics*. 62: 119-127 p.
- Bahr, K. 1991. Geological noise in magnetotelluric data: A classification of distortion types. *Phys. Earth Planet. Int.* 66: 24-38 p.
- Bailey, R.C. 1990. Trapping of aqueous fluids in the deep crust. *Geophysical Research Letters*. 17: 1129-1132 p.
- Berdichevsky, M.N., Dimitriev, V.I. y Pozdnjakova, E.E. 1998. On two-dimensional interpretation of magnetotelluric soundings. *Geophysical Journal International*. 133: 585-606 p.
- Brune, J.N., Simons, C., Rebollar, C. y Reyes, A. 1979. Seismicity and faulting in northern Baja California. En: P.L. Abbot y J.W. Elliot (eds), *Earthquakes and other perils, San Diego region, San Diego, Ca.*, 83-100 p.
- Cagniard, L. 1953. Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting. *Geophysics*. 18: 605-635 p.
- Chave, A.D., Thomson, D.J. y Ander, M.E. 1987. On the robust estimation of power spectra, coherences and transfer functions. *Journal of Geophysical Research*. 92B: 633-648 p.
- Clowes, R.M., Cook, F.A., Green, A.G., Keen, C.E., Ludden, J.N., Percival, J.A., Quinlan, G.M. y West, G.F. 1993. LITHOPROBE: New perspectives on crustal evolution. *Can. J. Earth Sci.*, 29: 1813-1864 p.
- Doser, D.I. 1992. Faulting processes of the 1956 San Miguel, Baja California, earthquake sequence. *PAGEOPH*. 139(1): 3-16 p.
- Duba, A. y Shankland, T.J. 1982. Free Carbon and Electrical Conductivity in the Earth's Mantle. *Geophysical Research Letters*. 9: 1271-1274 p.
- Esparza, F.J., 2008. Demostración de convergencia de los promeidos s-p (comunicación personal).
- Farquharson, C.G. y Oldenburg, D.W. 2004. A comparison of automatic techniques for estimating the regularization parameter in non-linear inverse problems. *Geophys. J. Int.* 156:411-425. *Geophysical Journal International*. 156: 411-425 p.
- Fischer, G. y Masero, W. 1994. Rotational properties of the magnetotelluric impedance tensor: the example of the Araguinha impact crater, Brazil. *Geophys. J. Int.* 119: 548-560 p.
- Frez, J. y González, J.J. 1991. Crustal structure and seismotectonics of northern Baja California. En: B. Simoneit y J.P. Dauphin (eds), *The gulf and peninsular province of the Californias*. American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, Oklahoma, 261-283 p.
- Frez, J., González, J.J., Acosta, J.G., Nava, F.A., Méndez, I., Carlos, J., García-Arthur, R.E. y Alvarez, M. 2000. A detailed microseismicity study and current stress regime in the Peninsular Ranges of northern Baja California, México: The Ojos Negros region. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 90(5): 1133-1142 p.

- Gastil, R.G., Phillips, R.P. y Allison, E.C. 1975. Reconnaissance geology of the State of Baja California. The Geological Society of America. 170 p.
- Gómez-Treviño, E. 1987.
- Groom, R.W. y Bailey, R.C. 1989. Decomposition of magnetotelluric impedance tensors in the presence of local three-dimensional galvanic distortion. *Journal of Geophysical Research*. 94: 1913–1925 p.
- Groom, R.W. y Bailey, R.C. 1991. Analytic investigations of the effects of near-surface three-dimensional galvanic scatterers on MT tensor decompositions. *Geophysics*. 56: 496-518 p.
- Hansen, C., 1992. Regularization Tools” A matlab package for análisis and solution of discrete ill-posed problems, Versión 3.1 for Matlab 6.0, Technical University of Denmark, DK-2800 Lyngby, Denmark. , 107 p
- Hirabayashi, K., Rockwell, T.K., Wenousky, S.G., Stirling, M.W. y Suárez-Vidal, F. 1996. A neotectonic study of the San Miguel-Vallecitos fault, Baja California, México. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 86(6): 1770-1783 p.
- Johnson, T.L., Madrid, J. y Koczyński, T. 1976. A study of microseismicity in northern Baja California, México. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 66(6): 1921-1929 p.
- Jones, A.G. 1993. The BC87 Dataset: Tectonic Setting, Previous EM Results, and Recorder MT Data. *J. Geomag. Geoelectr.* 45: 1089-1105 p.
- Jones, A.G. y Groom, R.W. 1993. Descomposición and Modelling of the BC87 Dataset. *J. Geomag. Geoelectr.* 45: 1127-1150 p.
- Jones, A.G.y., Kurtz, R.D., Oldenburg, D.W., Boerner, D.E. y R., E. 1988. Magnetotelluric observations along the Lithoprobe Southeastern Canadian Cordilleran Transect. *Geophys. Research Letters*. 15: 677-680 p.
- Ledo, J. y Jones, A.G. 2001. Regional electrical resistivity structure of the southern Canadian Cordillera and its physical interpretation. *Journal Geophysical Research*. . 106: 30755-30769 p.
- Lilley, F.E.M. 1993. Magnetotelluric analysis using Mohr circles. *Geophysics*. 45: 833- 839 p.
- Lilley, F.E.M. 1998. Magnetotelluric tensor decomposition: Part I, Theory for a basic procedure. *Geophysics*. 63: 1885-1897 p.
- Lomnitz, C., Mooser, F., Allen, C.R., Brune, J.N. y Thatcher, W. 1970. Seismicity and tectonics of the northern Gulf of California region, México: preliminary results. *Geofísica Internacional*. 10(2): 37-48 p.
- Lujan, F.V. 2006. Utilización de ondas electromagnéticas para detectar la invasión de agua marina en el acuífero de Valle de Maneadero en Ensenada B. C. Tesis. CICESE. Esenada B. C.
- Mackie, R.L., Smith, J.T. y Madden, T.R. 1994. Three-dimensional electromagnetic modeling using finite difference equations: The magnetotelluric example. *Radio Science* 29: 923-935 p.
- Marquis, G. y Hyndman, R.D. 1992. Geophysical support for aqueous fluids in the deep crust: seismic and electrical relationships. *Geophysical Journal International*. 110: 91-105 p.

- Mitsuhata, Y.e.a. 2001. Electromagnetic heterogeneity of the seismogenic region of 1962 M6.5 Northern Miyagi Earthquake, northeastern Japan. *Geophysical research letters*. 28((23)): 4371-4374 p.
- Ogawa, Y. 2002. On Two-dimensional modeling of magnetotelluric field data. *Surveys in Geophysics*. 23((2-3)): 251-273 p.
- Olhoeft, G. 1981. Electrical Properties of Granite With Implications for the Lower Crust. *Journal of Geophysical Research*. 86((B2)): 931-936 p.
- Oliver, O.F.M. 2004. Correlación entre la conductividad eléctrica y la actividad sísmica en la Falla San Miguel, Ensenada B. C. Tesis. CICESE. Ensenada B. C.
- Peacock, S.M. 1990. Fluid processes in subduction zones. *Science*. 248: 239-337 p.
- Reyes, A., Brune, J.N., Barker, T., Canales, L., Madrid, J., Rebollar, C. y Munguía, L. 1975. A microearthquake survey of the San Miguel fault zone, Baja California, México. *Geophysical Research Letters*. 2(2): 56-59 p.
- Rodi, W. y Mackie, R.L. 2001. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2D magnetotelluric inversion. *Geophysics*. 66: 174-187 p.
- Romo, J.M. 2002. Conductividad eléctrica de la litósfera de Baja California en la región de Vizcaíno, B.C.S. Tesis. CICESE. Ensenada B. C.
- Romo, J.M., Gómez-Treviño, E. y Esparza, F.J. 2005. Series and parallel transformations of the magnetotelluric impedance tensor: theory and applications. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 150: 63-83 p.
- Shankland, T.J. y Ander, M.E. 1983. Electrical conductivity, temperatures, and fluids in the lower crust. *Journal of Geophysical Research*. 88: 9475-9484 p.
- Shelton, J.W. 1984. Listric normal faults; an illustrated summary. *AAPG Bulletin*. 68(7): 801-815 p.
- Shor, G.G. y Roberts, E. 1958. San Miguel, Baja California Norte, earthquakes of February, 1956: a field report. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 48: 101-116 p.
- Smith, J.T. y Booker, J.R. 1991. Rapid inversion of two and three-dimensional magnetotelluric data. *J. Geophys. Res.* 96: 3905-3922 p.
- Suárez-Vidal, F., Armijo, R., Morgan, G., Bodin, P. y Gastil, R.G. 1991. Framework of recent and active faulting in northern Baja California. En: J.P. Dauphin y B. Simoneit (eds), *The gulf and peninsular province of the Californias*. American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, Oklahoma, 285-300 p.
- Swift, C.M. 1967. A magnetotelluric investigation of an electrical conductivity anomaly in the southwestern United States. Tesis PhD. Massachusetts Institute of Technology.
- Szarka, L. y Menvielle, M. 1997. Analysis of rotational invariants of the magnetotelluric impedance tensor. *Geophys. J. Int.* . 129(133-142).
- Taylor, J.R. 1997. *An Introduction to Error Analysis Second*. United States of North America. 327 p.

- Tikhonov, A.N. 1950. On determining electrical characteristics of the deep layers of the Earth's crust In: Vozoff, K. (ed.), "Magnetotelluric methods. Geophys. Reprint Ser. 5, Soc. Expl. Geophys(2-3).
- Villela-Mendoza, A. 2004. Interpretación geofísica de la cuenca sedimentaria Vizcaíno, B.C.S., utilizando datos magnetotelúricos y gravimétricos. Tesis. CICESE. Ensenada B. C.
- Vozoff, K. 1991. The magnetotelluric method. En: M.N. Nabighian (ed), Electromagnetic methods in applied geophysics, 2, Application. Society of Exploration Geophysicists, 641–711 p.
- Weaver, J.T., Agarwal, A.K. y Lilley, F.E.M. 2000. Characterization of the magnetotelluric tensor in terms of its invariants. Geophys. J. Int. 141: 321-336 p.
- Wu, N., Booker, J.R. y Smith, J.T. 1993. Rapid Two-Dimensional inversion of COPROD2 data. Journal of Geomagnetism and Geoelectricity. 45: 1073-1087 p.