

Matemáticas en la Industria (I RSME-SMM)

**Simulaciones de Herramientas de Prospección
Petrolífera Basadas en el Electromagnetismo
Utilizando un Método de Elementos Finitos**

D. Pardo, M. J. Nam, C. Torres-Verdín, V. Calo

Basque Center for Applied Mathematics (BCAM)

TEAM MEMBERS:

D. Pardo (Research Professor)

I. Garay (Postdoctoral Fellow)

I. Andonegui (Technician)

MAIN COLLABORATORS:

M. J. Nam, F. de la Hoz

M. Paszynski, L.E. García-Castillo

I. Gómez, C. Torres-Verdín

24 de Julio de 2009

(bcam)

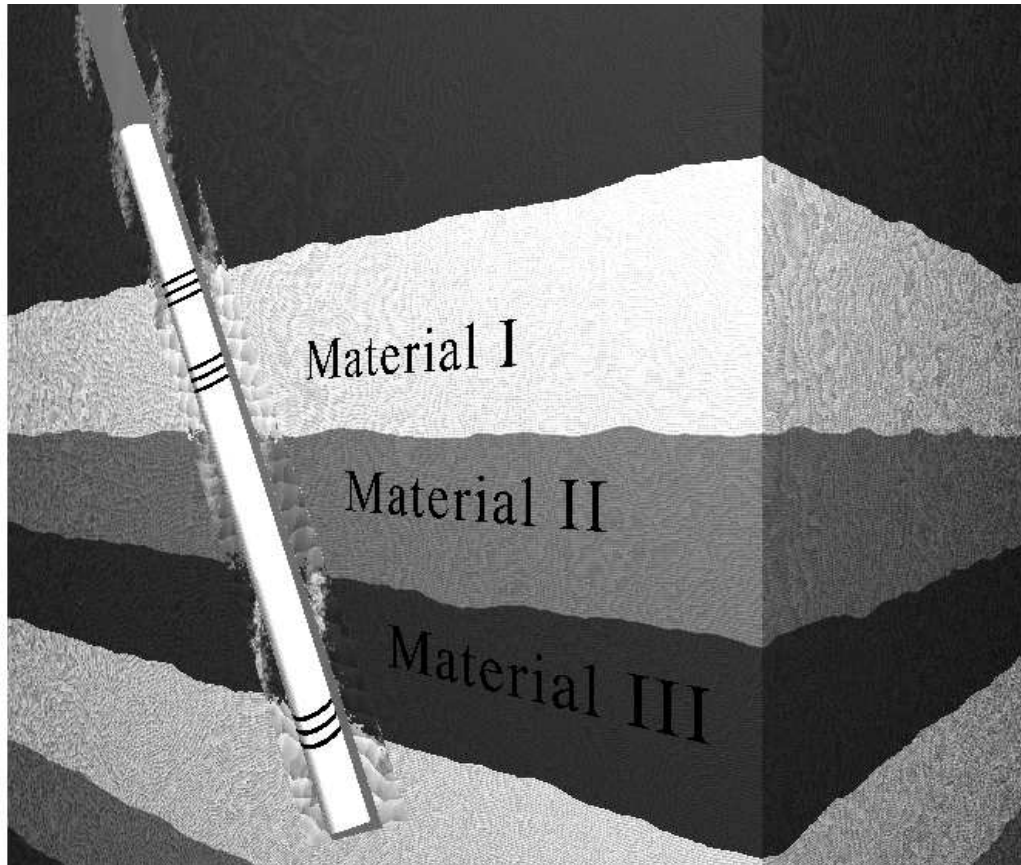
www.bcamath.org
basque center for applied mathematics



sumario

1. Motivación y Objetivos: Simulación de Mediciones Electromagnéticas en Pozos Petrolíferos.
2. Problemas en Dos Dimensiones (2D):
 - Método de Elementos Finitos en hp .
 - Simulaciones Numéricas.
3. Problemas en Tres Dimensiones (3D):
 - Método de Fourier y Elementos Finitos en hp .
 - Simulaciones Numéricas.
4. Otras Aplicaciones (Mediciones desde la Superficie).
5. Conclusiones

motivación y objetivos



Ángulo de Incidencia

Invasión

Anisotropía

Fuentes Tridimensionales

Herramientas
Descentradas

Laterolog

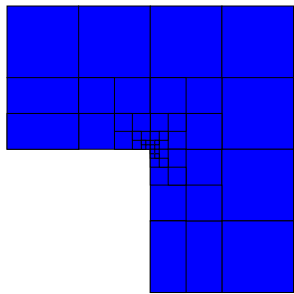
Mediciones a través de
tubería

Inducción-LWD

Inducción con cable

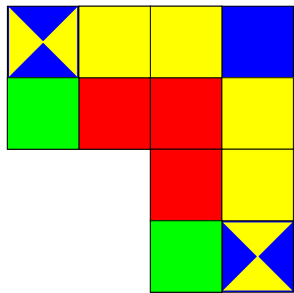
Objetivo: Determinación del campo electromagnético en las antenas receptoras.

simulaciones electromagnéticas en 2D



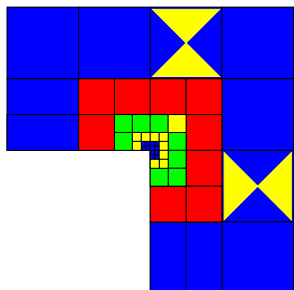
El Método de Elementos Finitos en h

1. La velocidad de convergencia está limitada por el orden de aproximación polinomial y el contraste en los materiales.
2. **NO converge exponencialmente en simulaciones reales.**
3. Se pueden “bloquear” (100% error).



El Método de Elementos Finitos en p

1. Convergen exponencialmente en problemas con alta regularidad.
2. NO converge exponencialmente en simulaciones reales.
3. **Si el malla inicial en h no es adecuado, el MEF en p es peor que el MEF en h .**



El Método de Elementos Finitos en hp

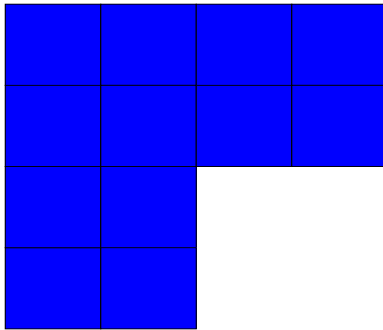
1. Convergencia exponencial en problemas reales.
2. Aunque la malla inicial en hp no sea adecuada, la convergencia será muy rápida.



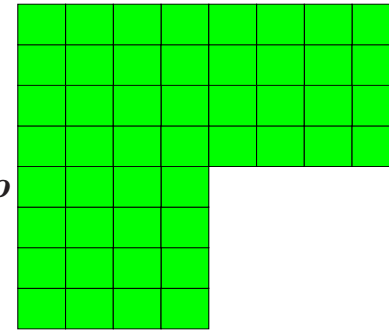
simulaciones electromagnéticas en 2D

Refinamientos automáticos en hp

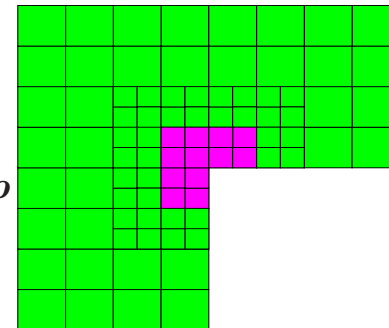
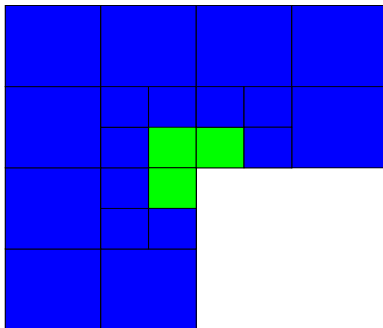
Mallas gruesas
(hp)



Mallas finas
($h/2, p + 1$)



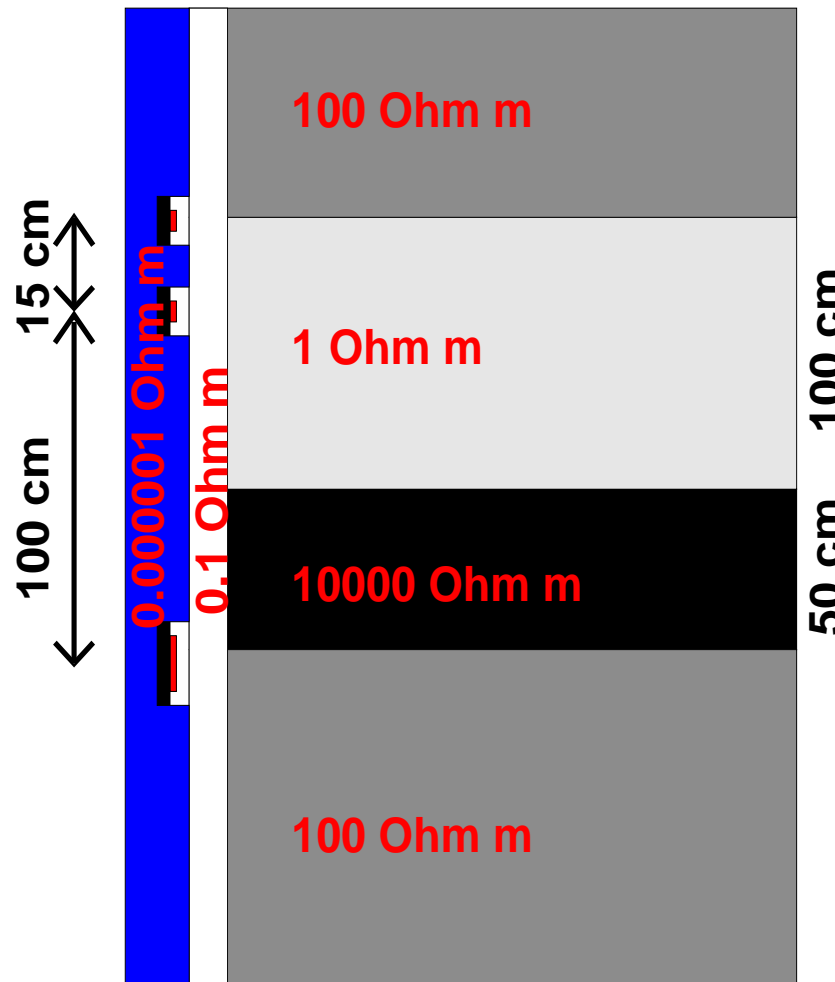
Refinamiento global hp



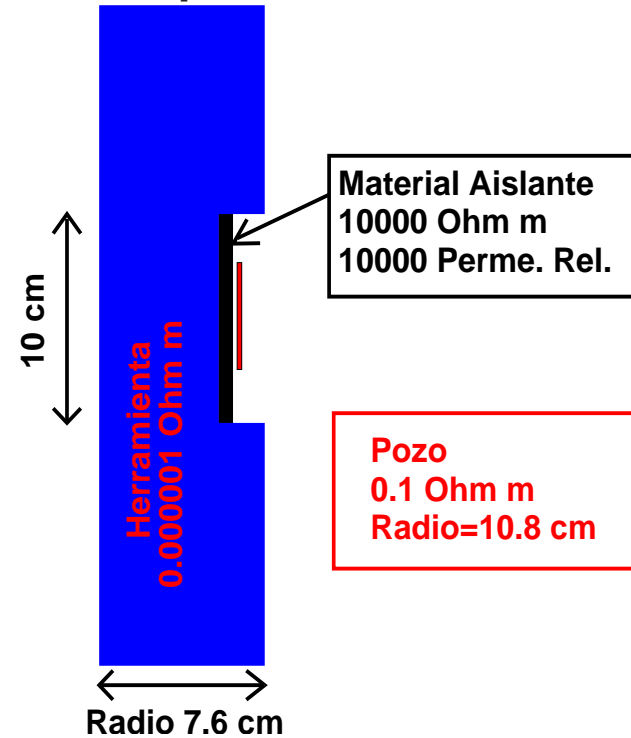
Refinamiento global hp

**MÉTODO DE SOL. EN MALLAS FINAS:
RESOLVEDOR DE DOS MALLAS**

simulaciones electromagnéticas en 2D



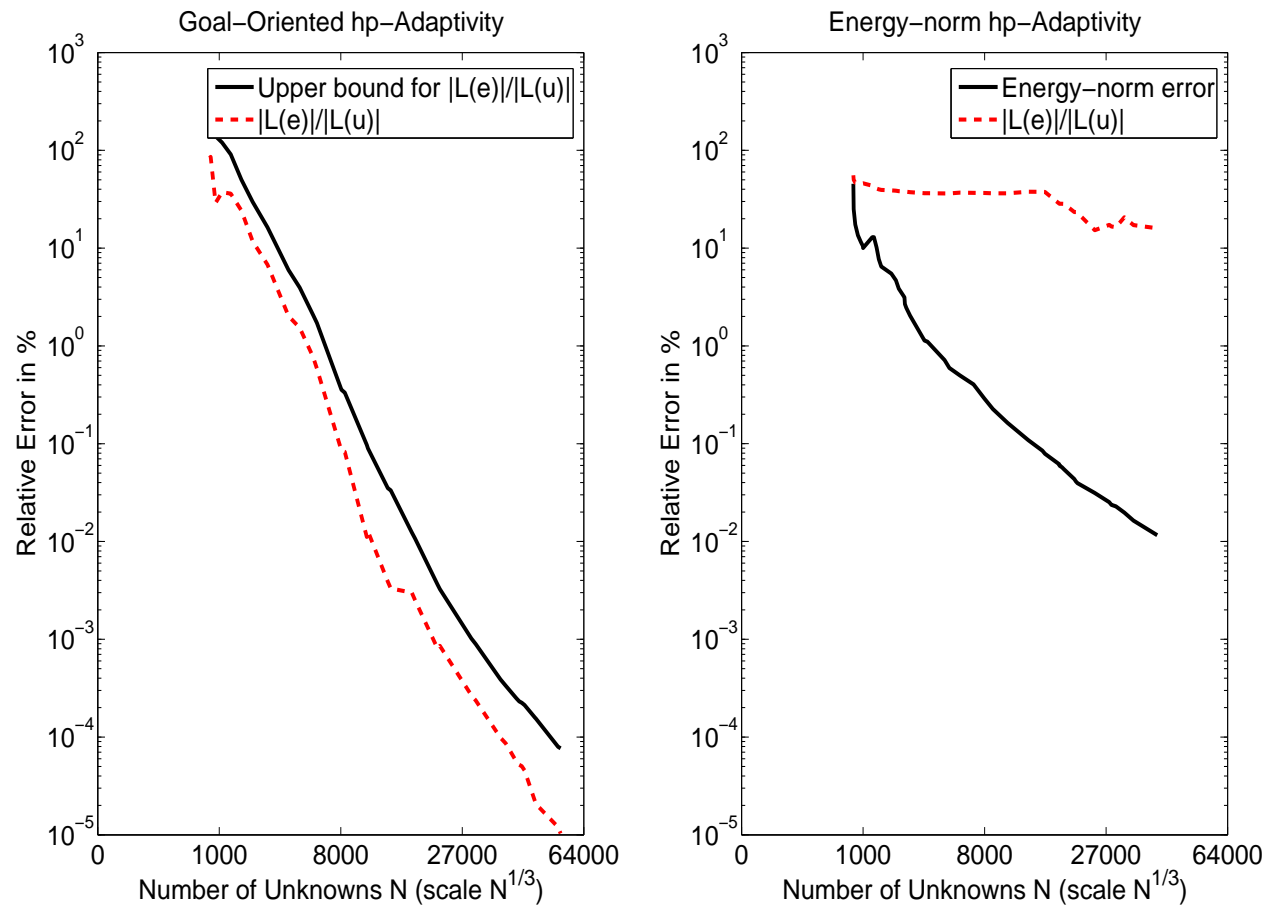
Descripción de las Antenas



Objetivo: Estudiar el efecto de la invasión, permeabilidad y anisotropía en las mediciones.

simulaciones electromagnéticas en 2D

Primera diferencia vertical de E_ϕ (solenoides). Posición: 0.475m



simulaciones electromagnéticas en 2D

Adaptatividad *hp* Orientada a un Objetivo vs. en Norma de la Energía

Problema con Herramienta Metálica a 2 Mhz.

Elementos Continuos (Adaptatividad Orientada a un Objetivo)

Quantity of Interest	Real Part	Imag Part
COARSE GRID	-0.1629862203E-01	-0.4016944732E-02
FINE GRID	-0.1629862347E-01	-0.4016944223E-02

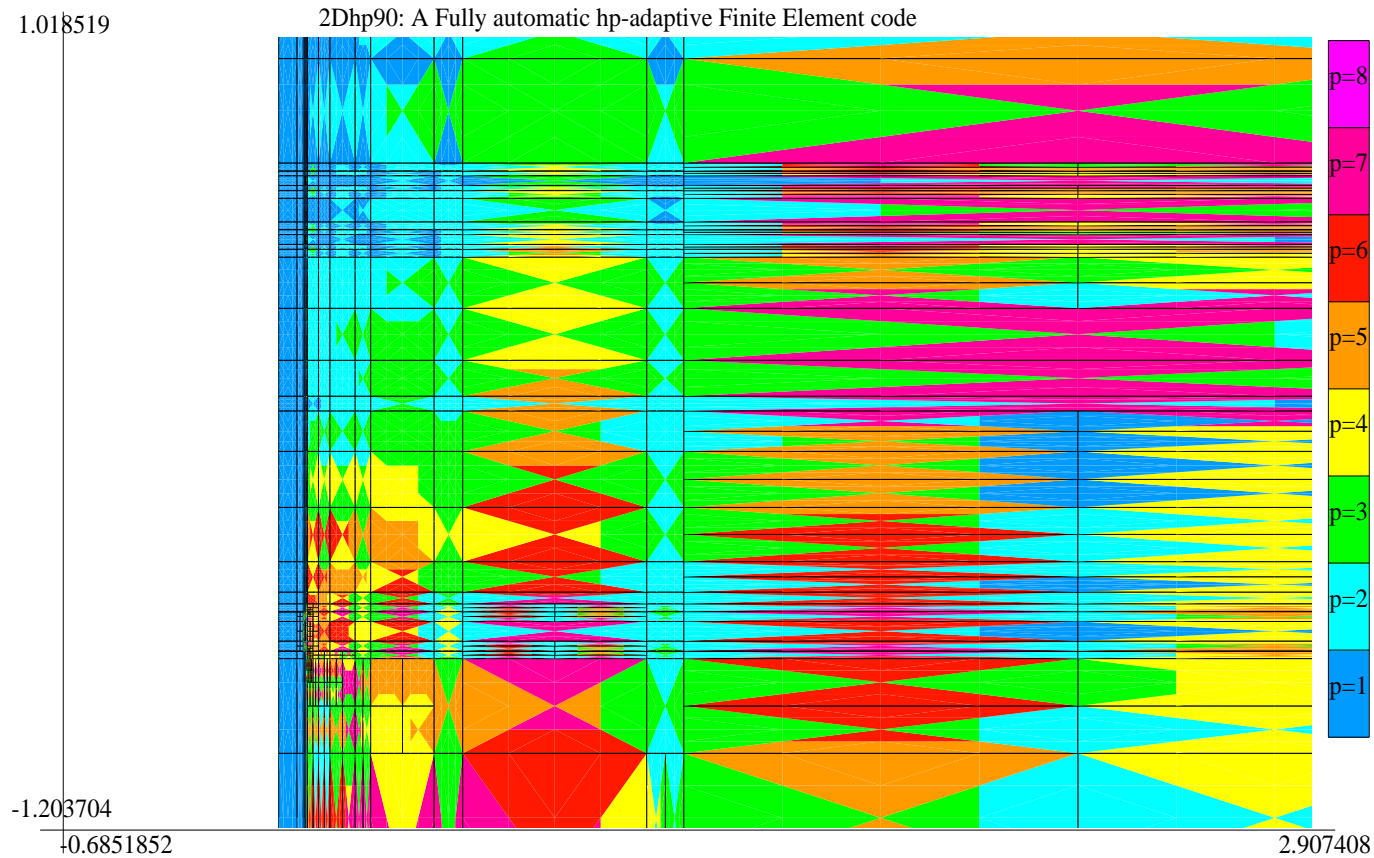
Elementos Continuos (Adaptatividad en Norma de la Energía)

Cantidad de Interés	Parte Real	Parte Imag.
0.01% ERROR EN ENERGÍA	-0.1382759158E-01	-0.2989492851E-02

Es fundamental utilizar adaptatividad ORIENTADA A UN OBJETIVO.

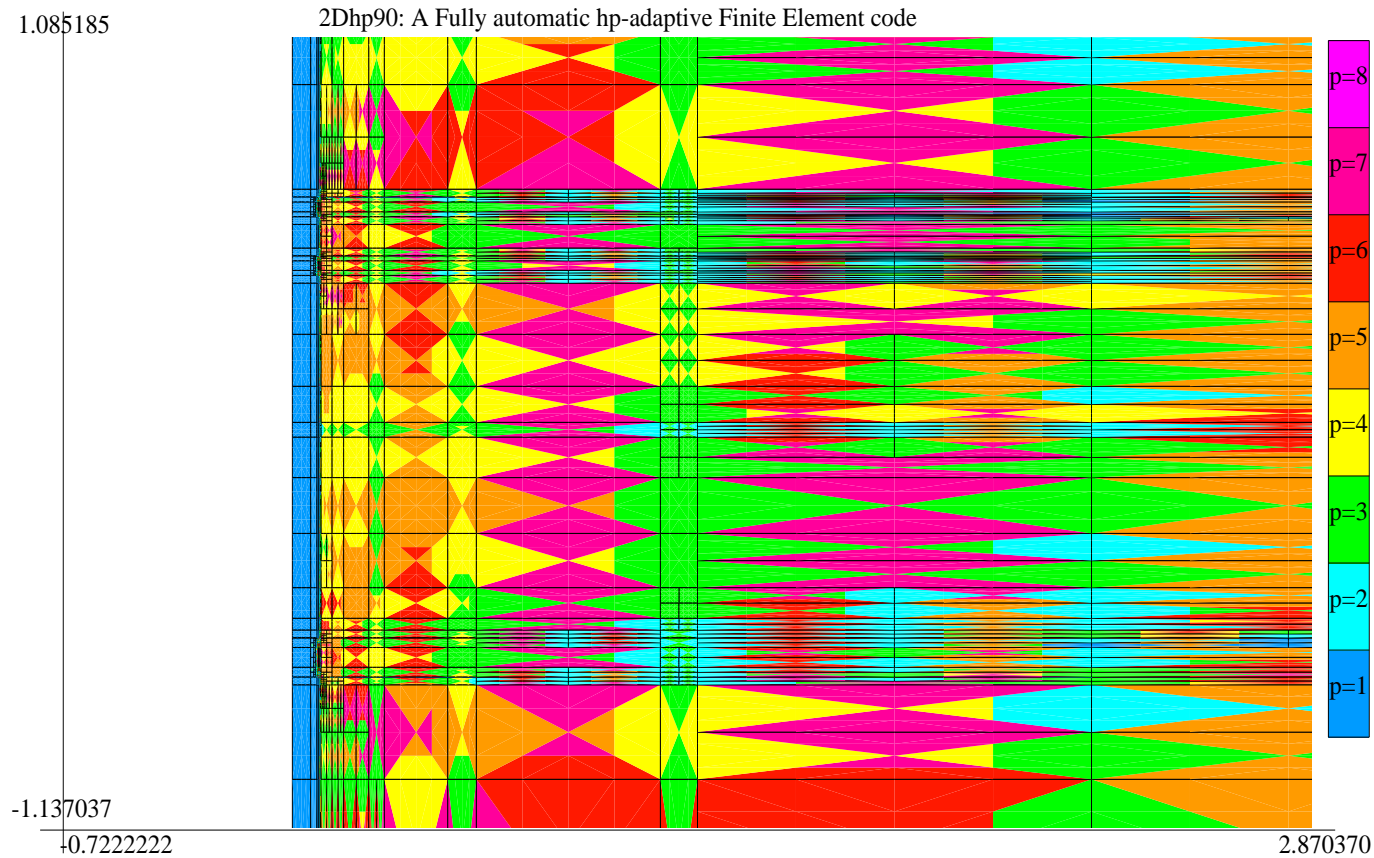
simulaciones electromagnéticas en 2D

Primera diferencia vertical de E_ϕ (solenoides). Posición: 0.475m
ADAPTATIVIDAD HP EN NORMA DE LA ENERGÍA



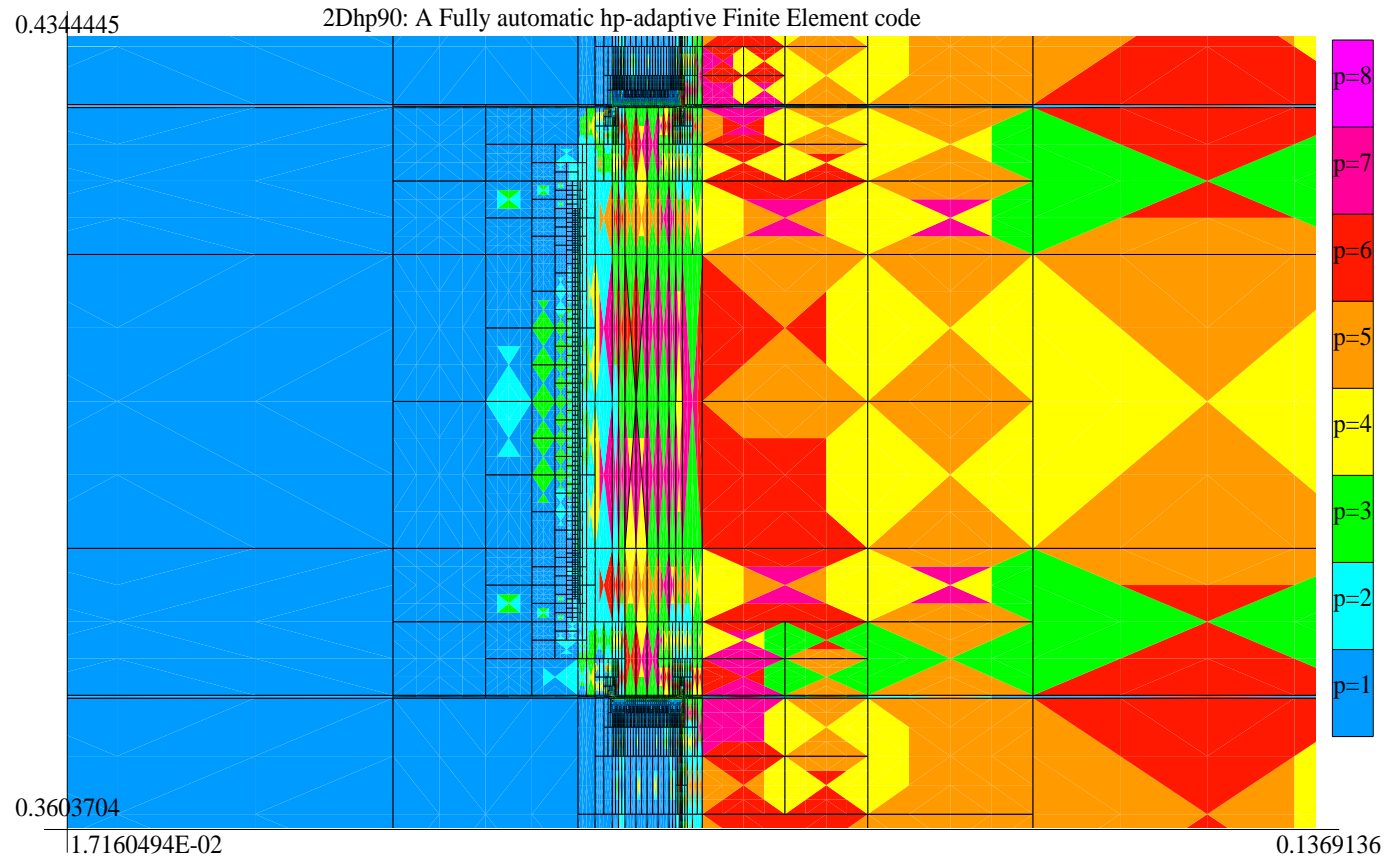
simulaciones electromagnéticas en 2D

Primera diferencia vertical de E_ϕ (solenoides). Posición: 0.475m
ADAPTATIVIDAD HP ORIENTADA A UN OBJETIVO



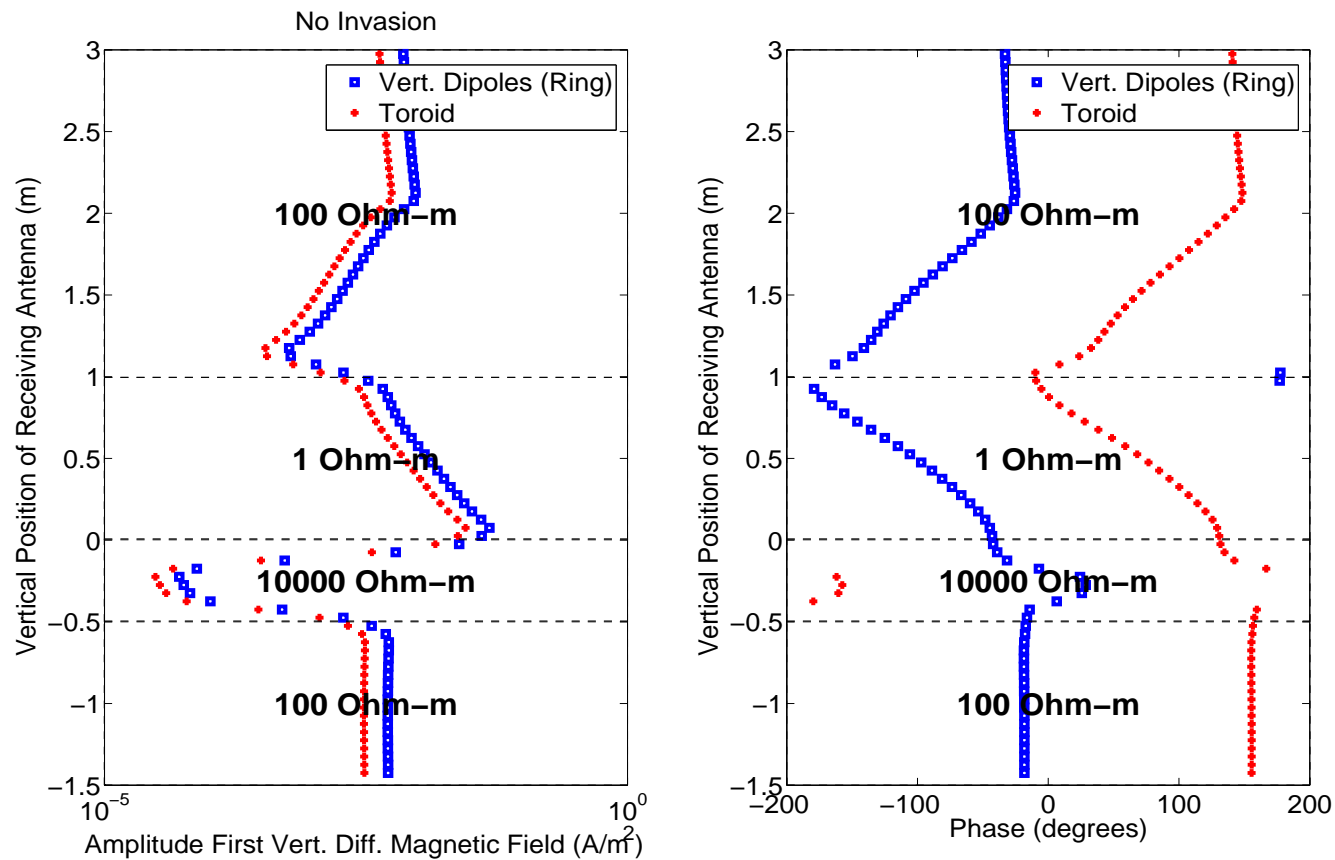
simulaciones electromagnéticas en 2D

Primera diferencia vertical de E_ϕ (solenoides). Posición: 0.475m
ADAPTATIVIDAD HP ORIENTADA A UN OBJETIVO (ZOOM)



simulaciones electromagnéticas en 2D

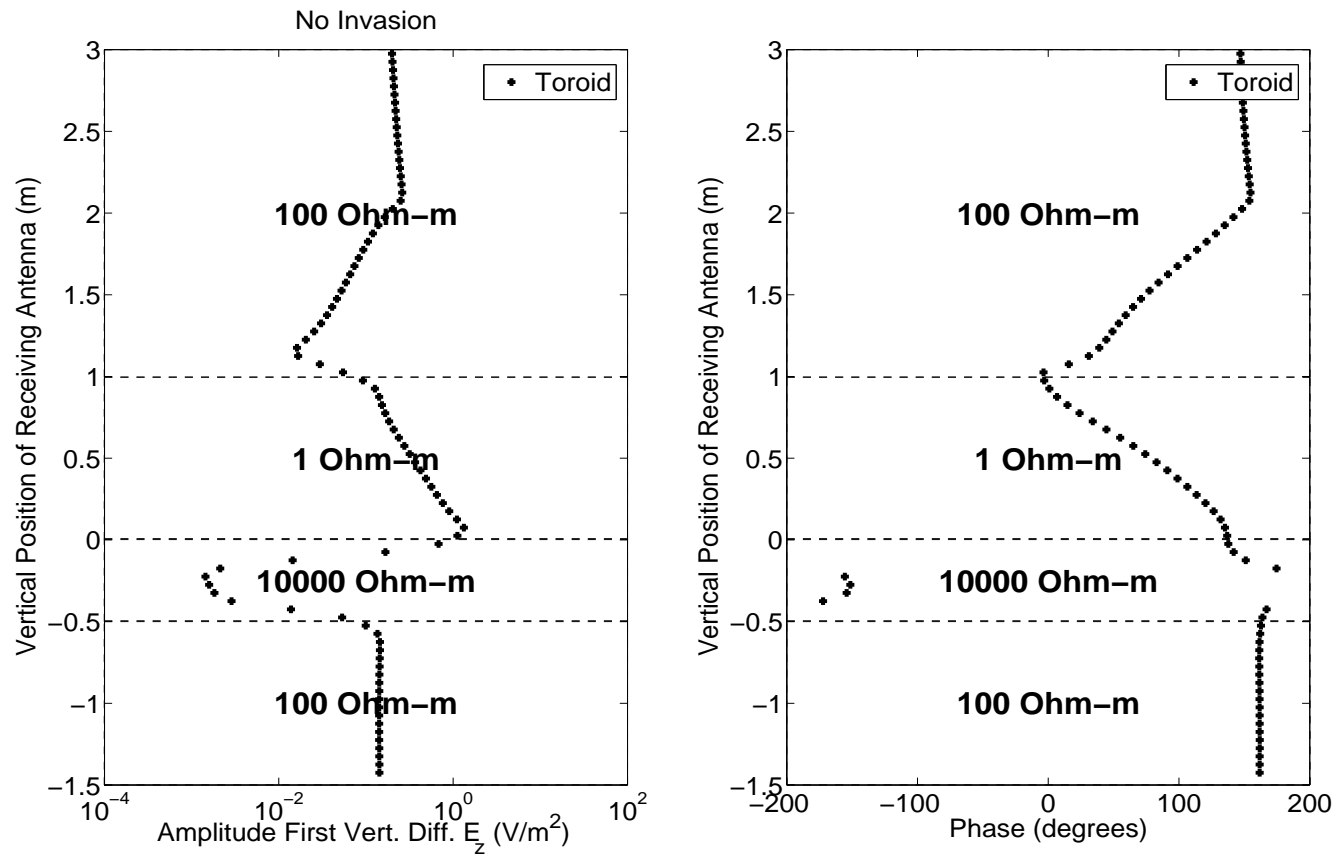
Diferencia de H_ϕ en las dos antenas receptoras



Utilizando dipolos verticales o toroides obtenemos resultados similares

simulaciones electromagnéticas en 2D

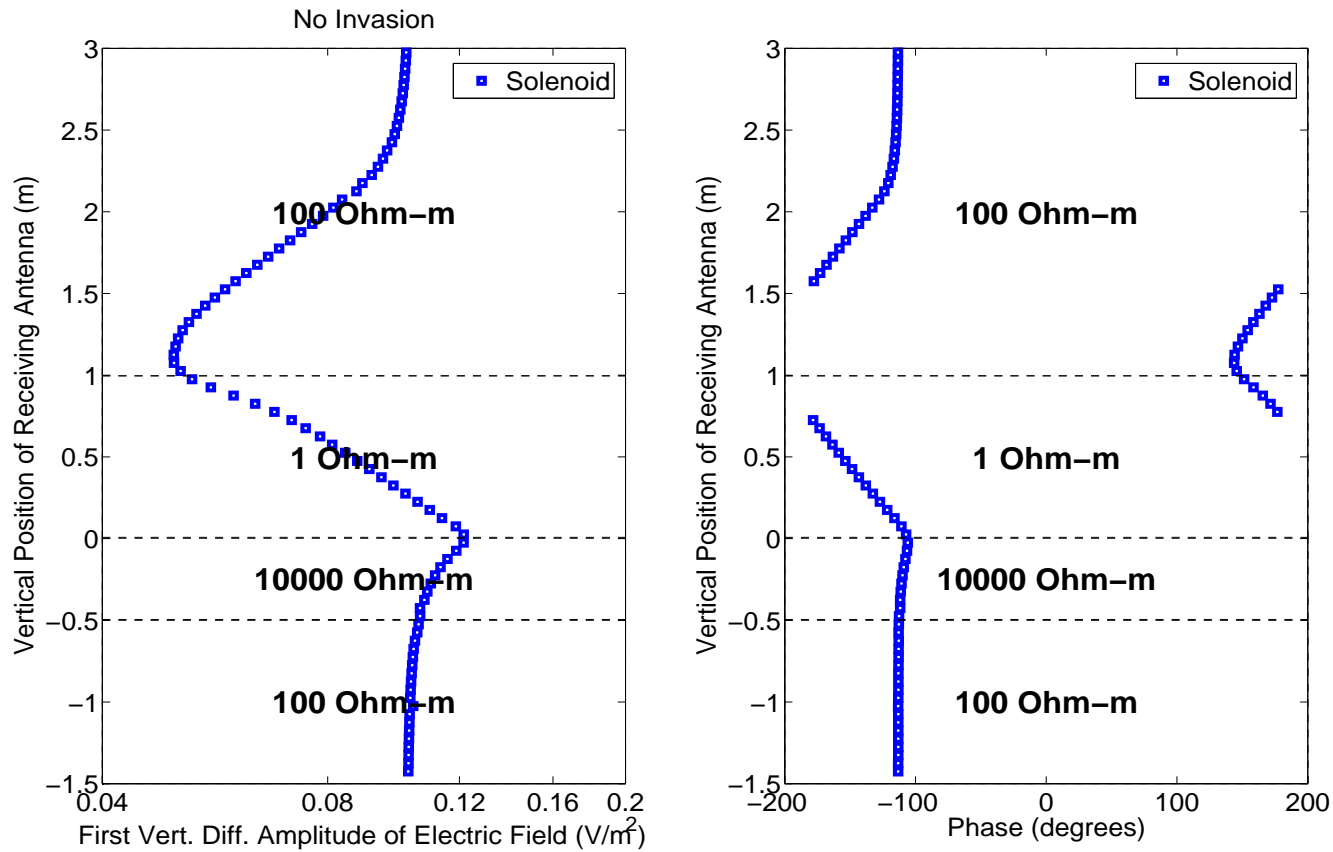
Diferencia de E_z para una antena toroidal



Las antenas toroidales son adecuadas para identificar los materiales resistivos

simulaciones electromagnéticas en 2D

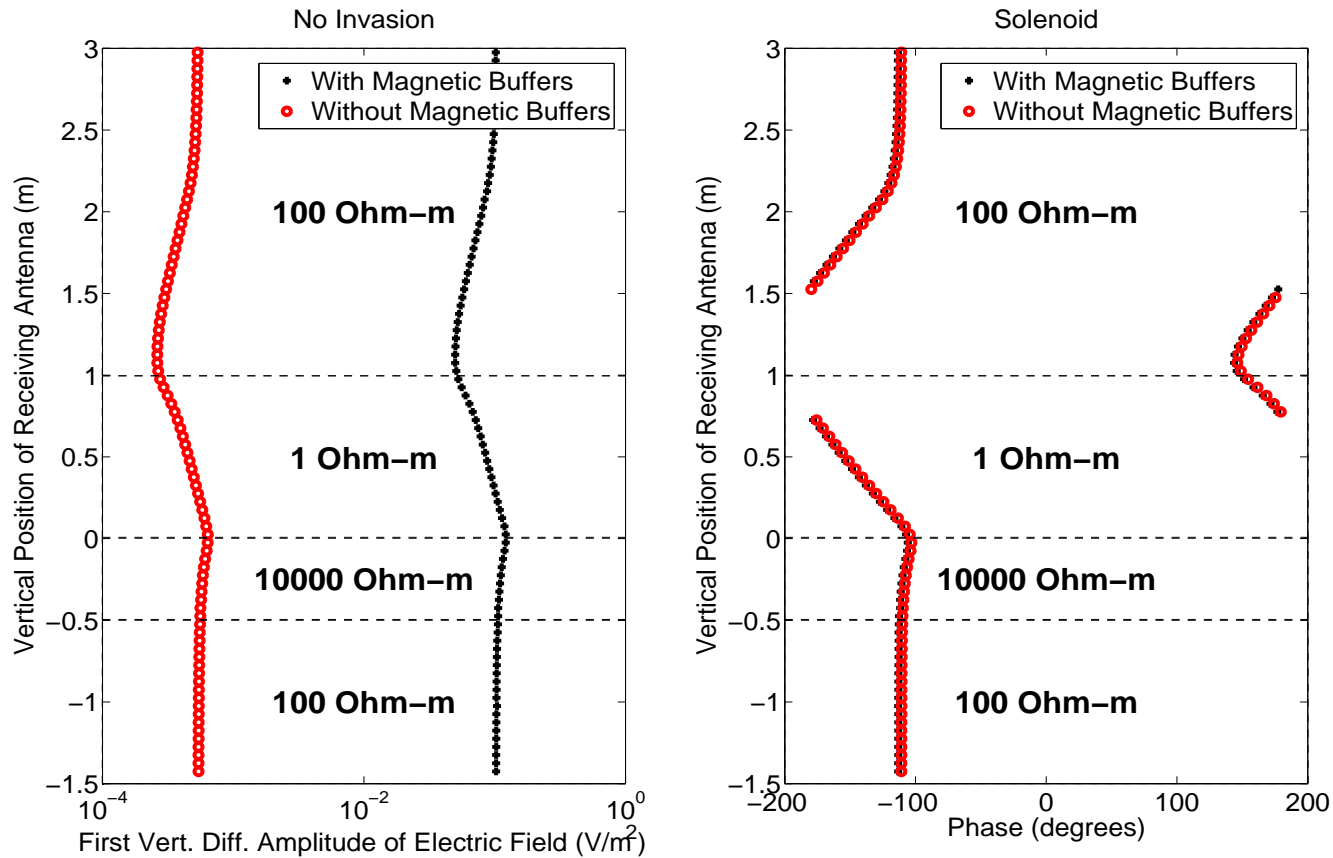
Diferencia de E_ϕ para un solenoide



Los solenoides son adecuados para identificar los materiales conductivos

simulaciones electromagnéticas en 2D

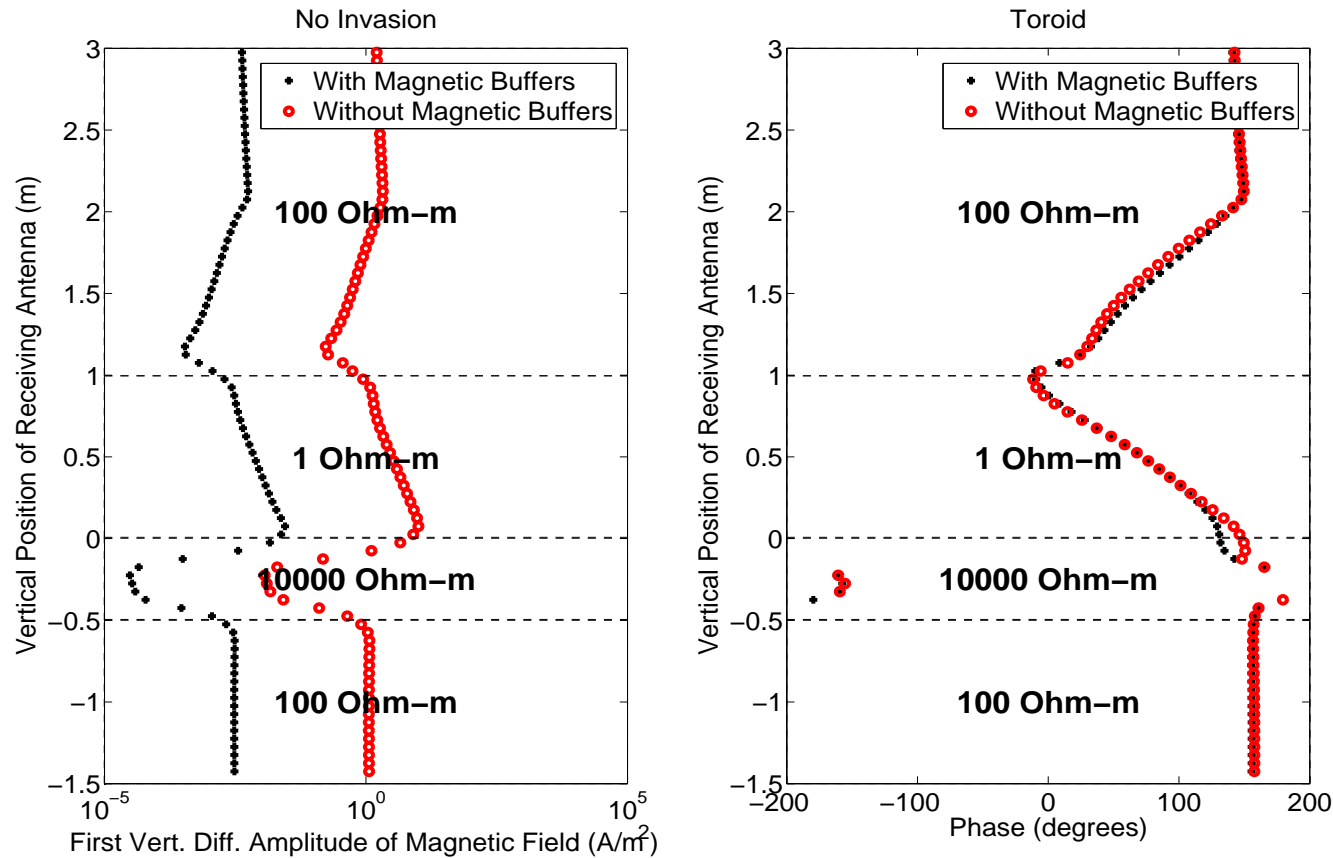
Materiales aislantes (E_ϕ usando un solenoide)



El uso de materiales aislantes y solenoides aumenta la intensidad de los campos electromagnéticos

simulaciones electromagnéticas en 2D

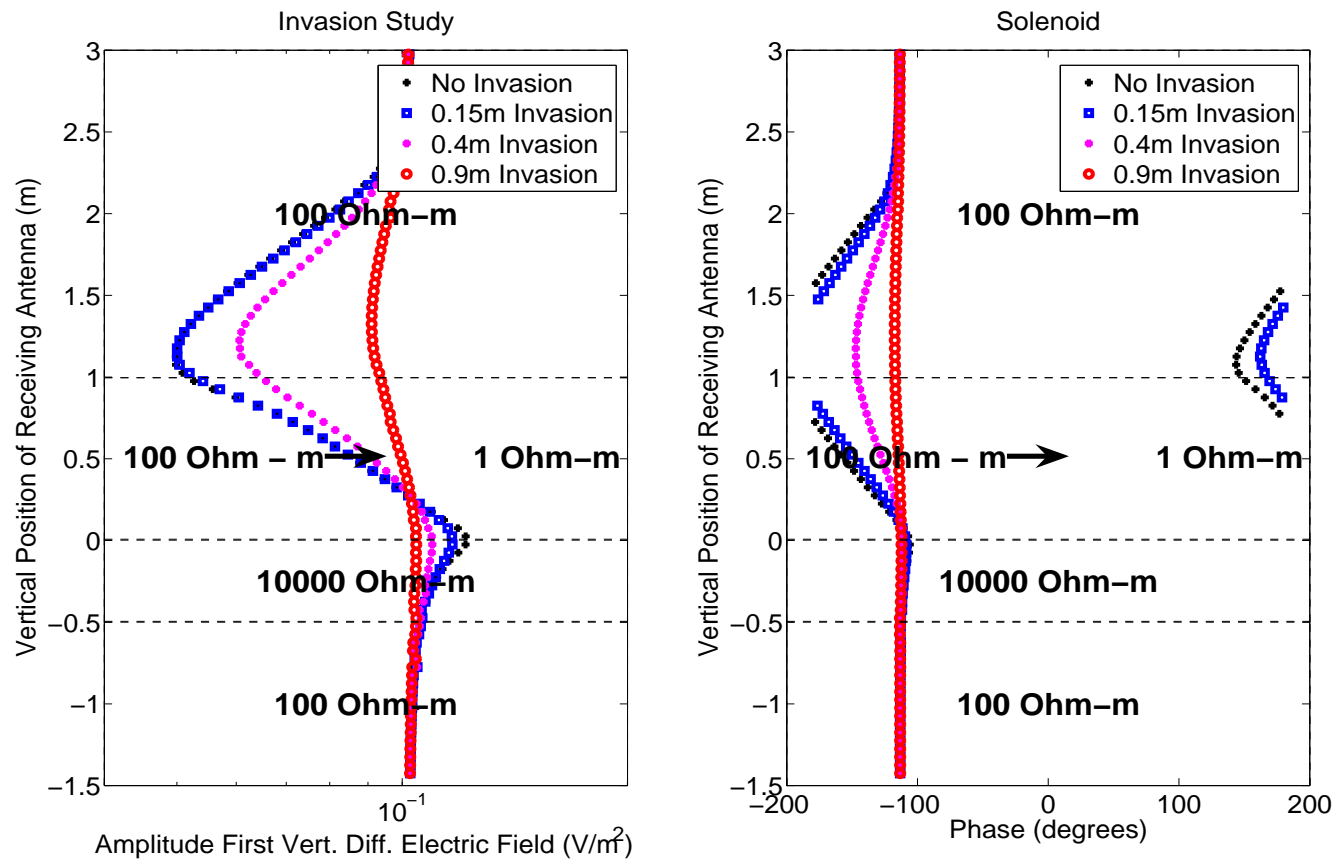
Materiales aislantes (H_ϕ usando una antena toroidal)



El uso de materiales aislantes con antenas toroidales disminuye la intensidad de los campos electromagnéticos

simulaciones electromagnéticas en 2D

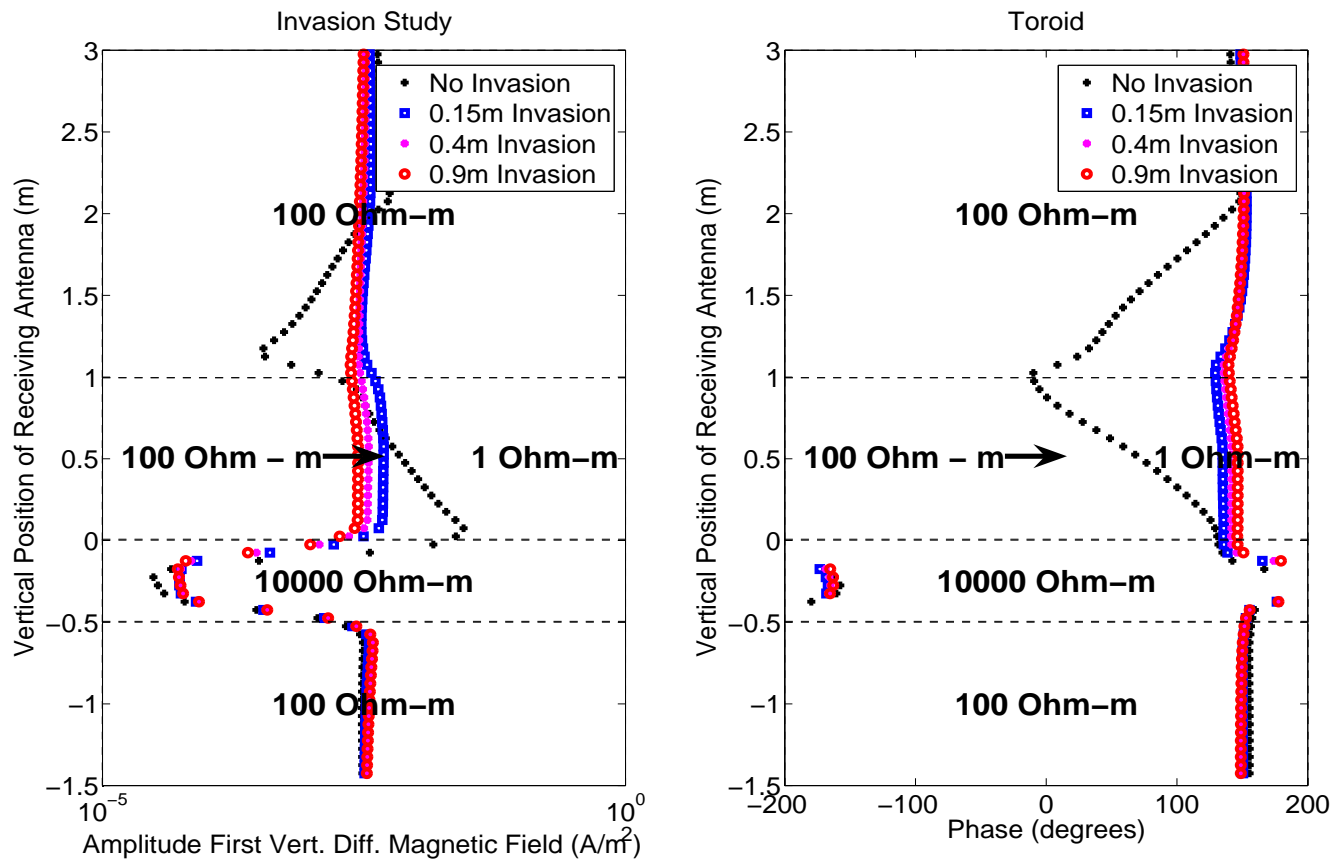
Invasión de agua (E_ϕ usando un solenoide)



Usando solenoides se puede estimar el efecto de la inyección de agua en la formación

simulaciones electromagnéticas en 2D

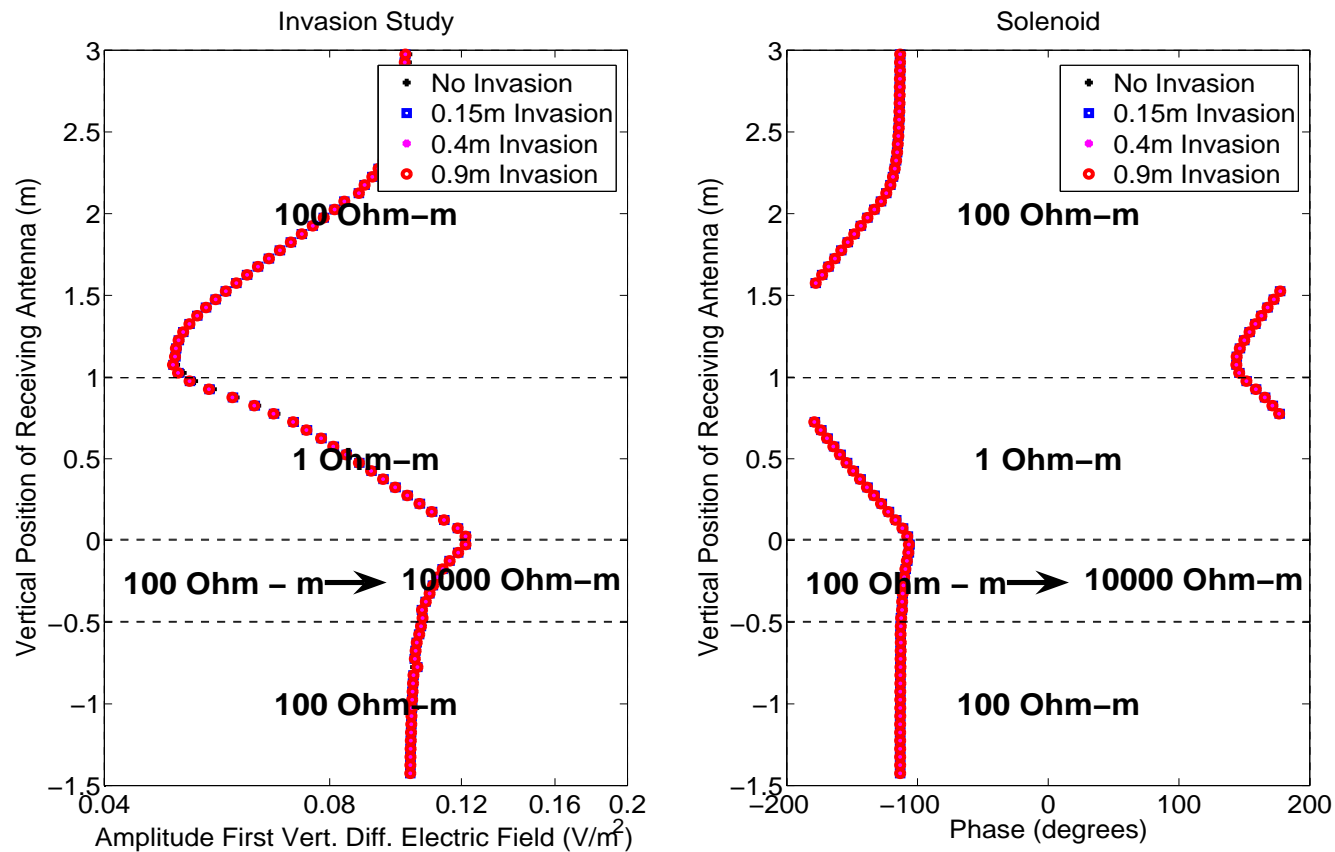
Invasión de agua (H_ϕ para una antena toroidal)



Los toroides son muy sensibles a la invasion de agua en la formación

simulaciones electromagnéticas en 2D

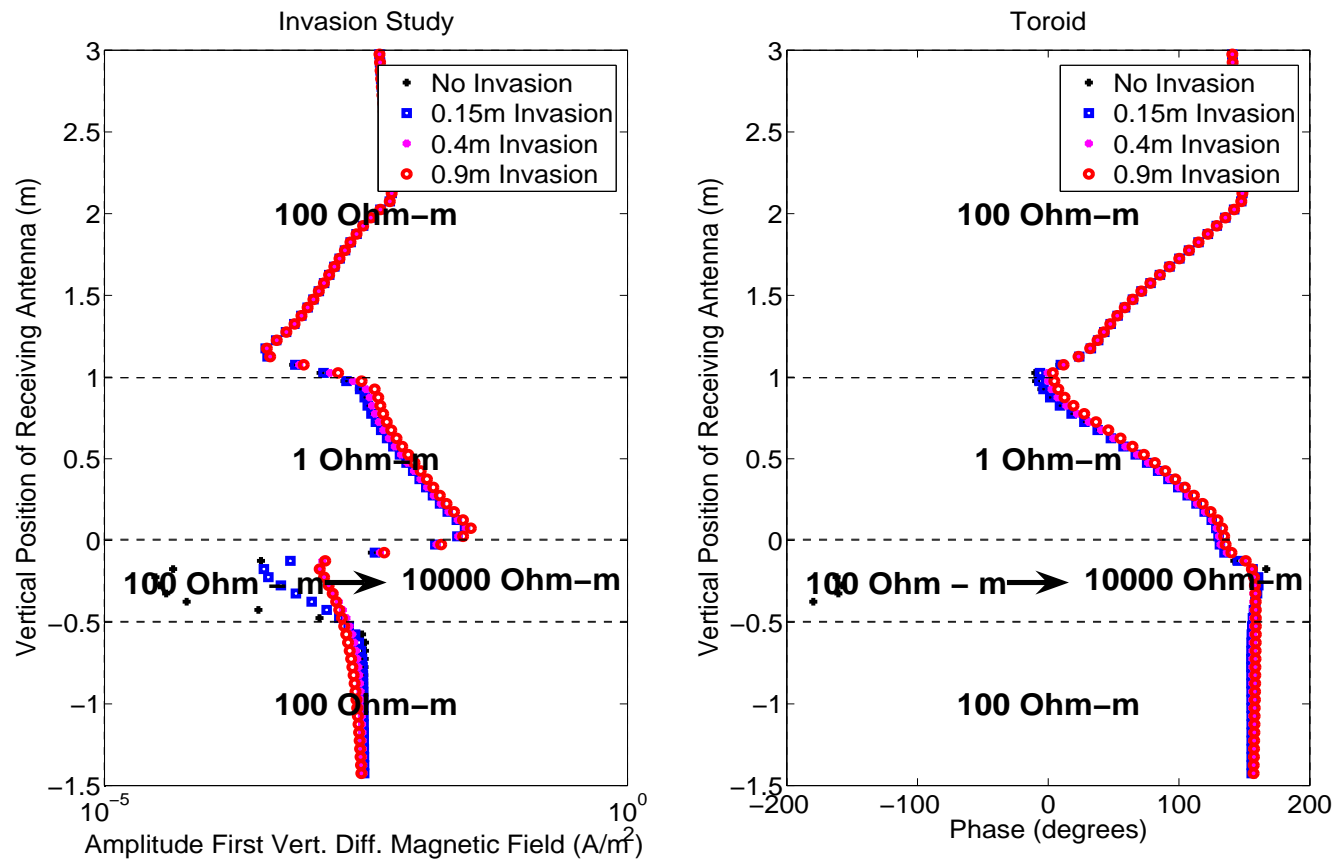
Invasión de agua (E_ϕ usando un solenoide)



Los solenoides son insensibles a la invasión de agua en formaciones resistivas

simulaciones electromagnéticas en 2D

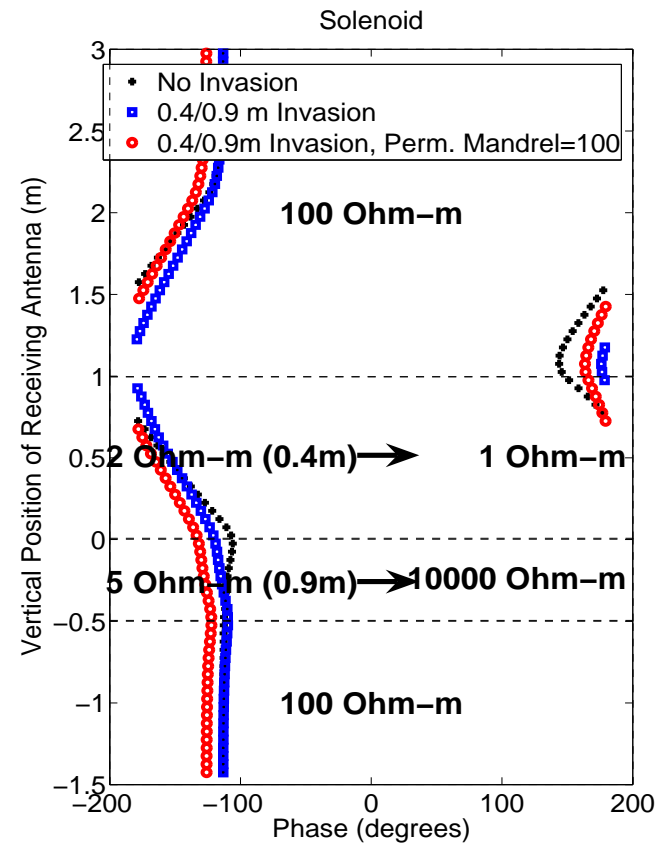
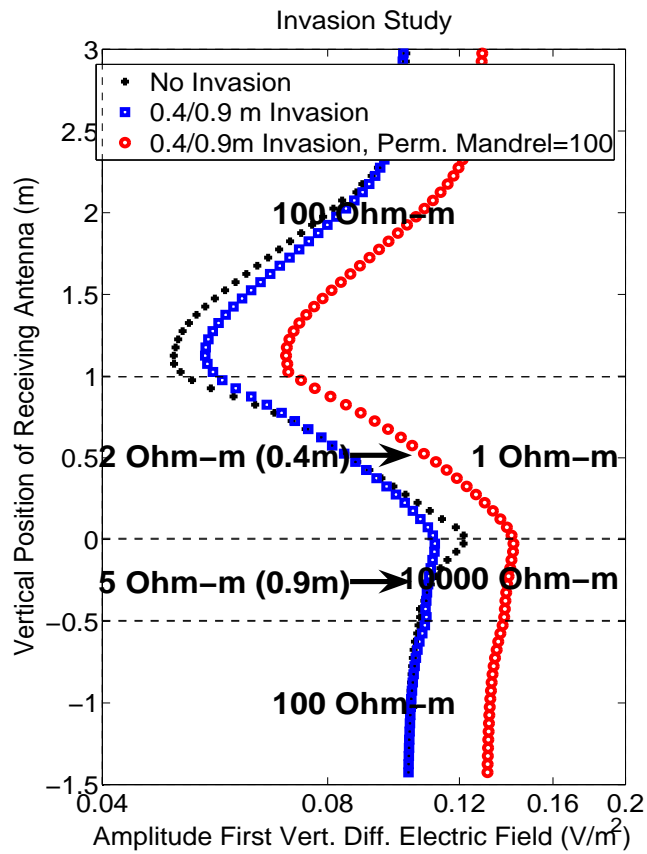
Invasión de agua (H_ϕ usando un toroide)



Debemos utilizar toroides para monitorear la invasión de agua en formaciones resistivas

simulaciones electromagnéticas en 2D

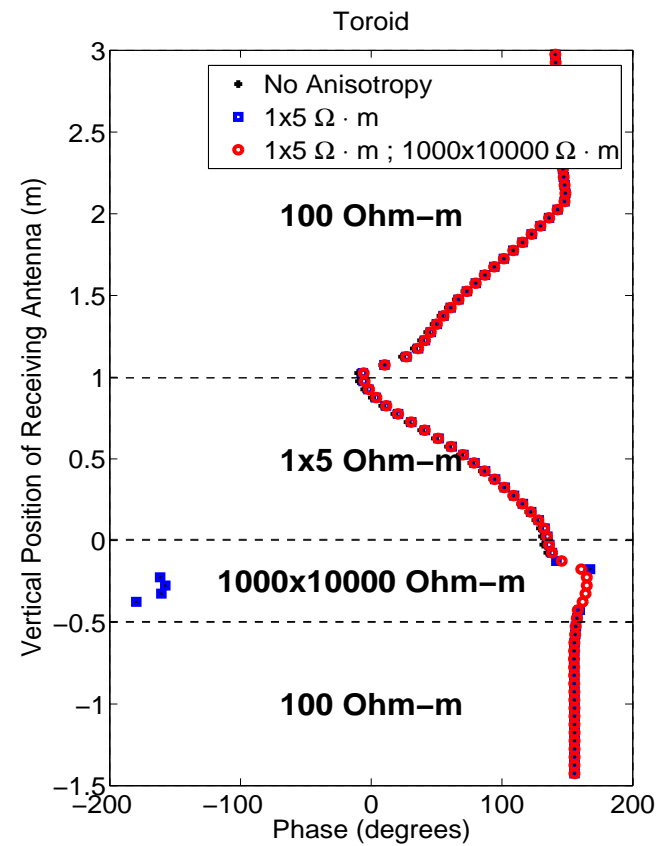
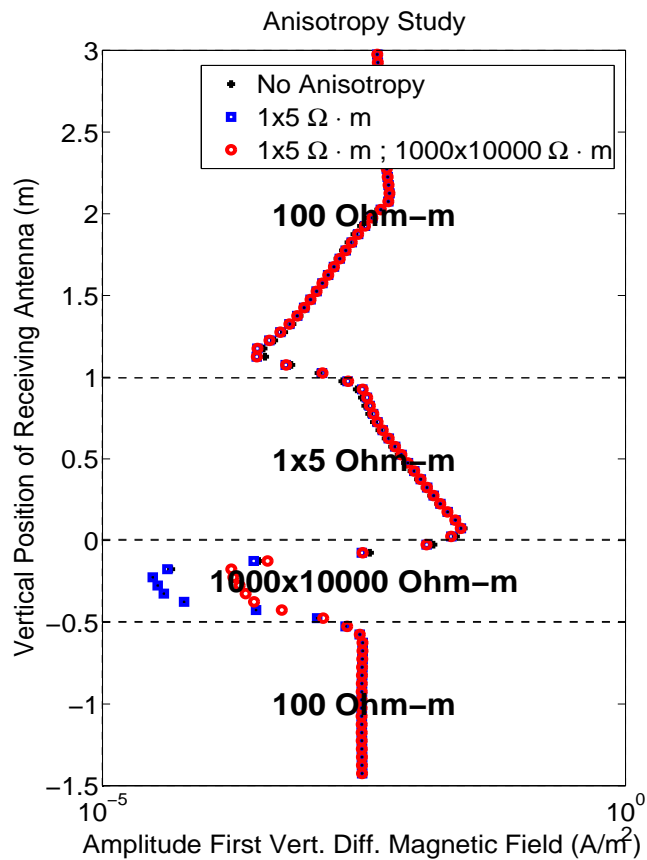
Herramientas con permeabilidad magnética (E_ϕ)



El efecto de la permeabilidad magnética de la herramienta es similar al de los materiales aislantes

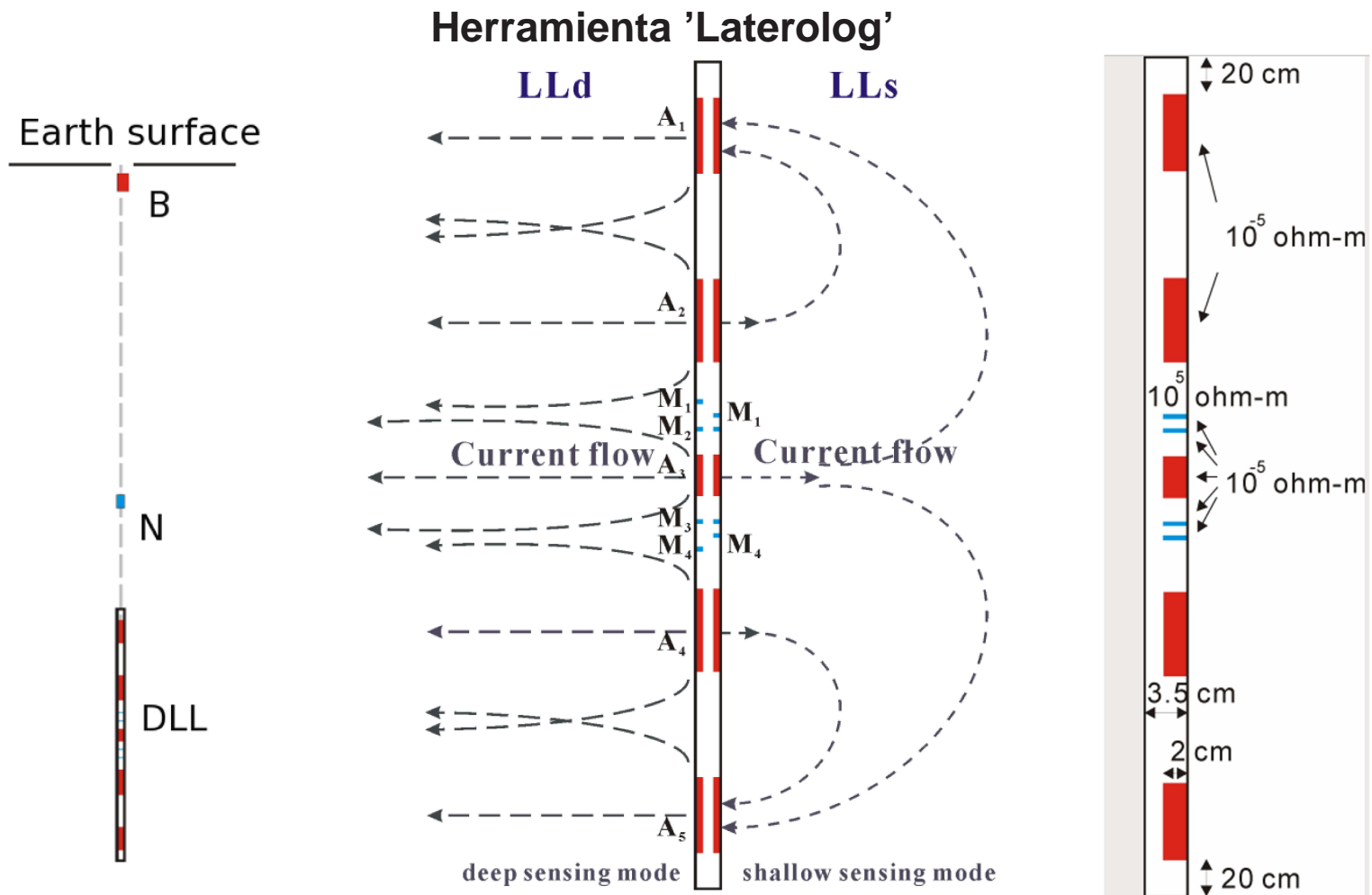
simulaciones electromagnéticas en 2D

Anisotropía (H_ϕ)



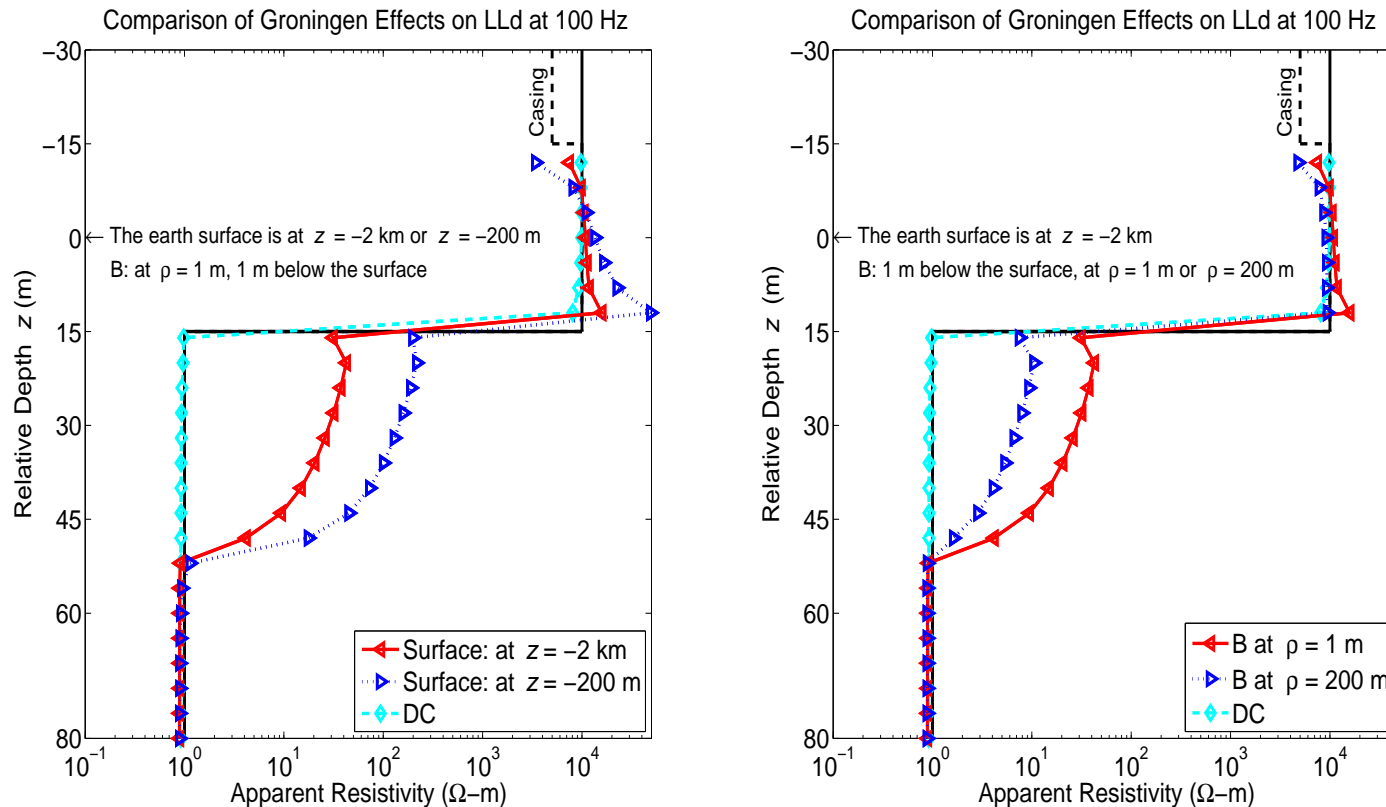
La anisotropía puede ser importante al estudiar formaciones resistivas

simulaciones electromagnéticas en 2D



simulaciones electromagnéticas en 2D

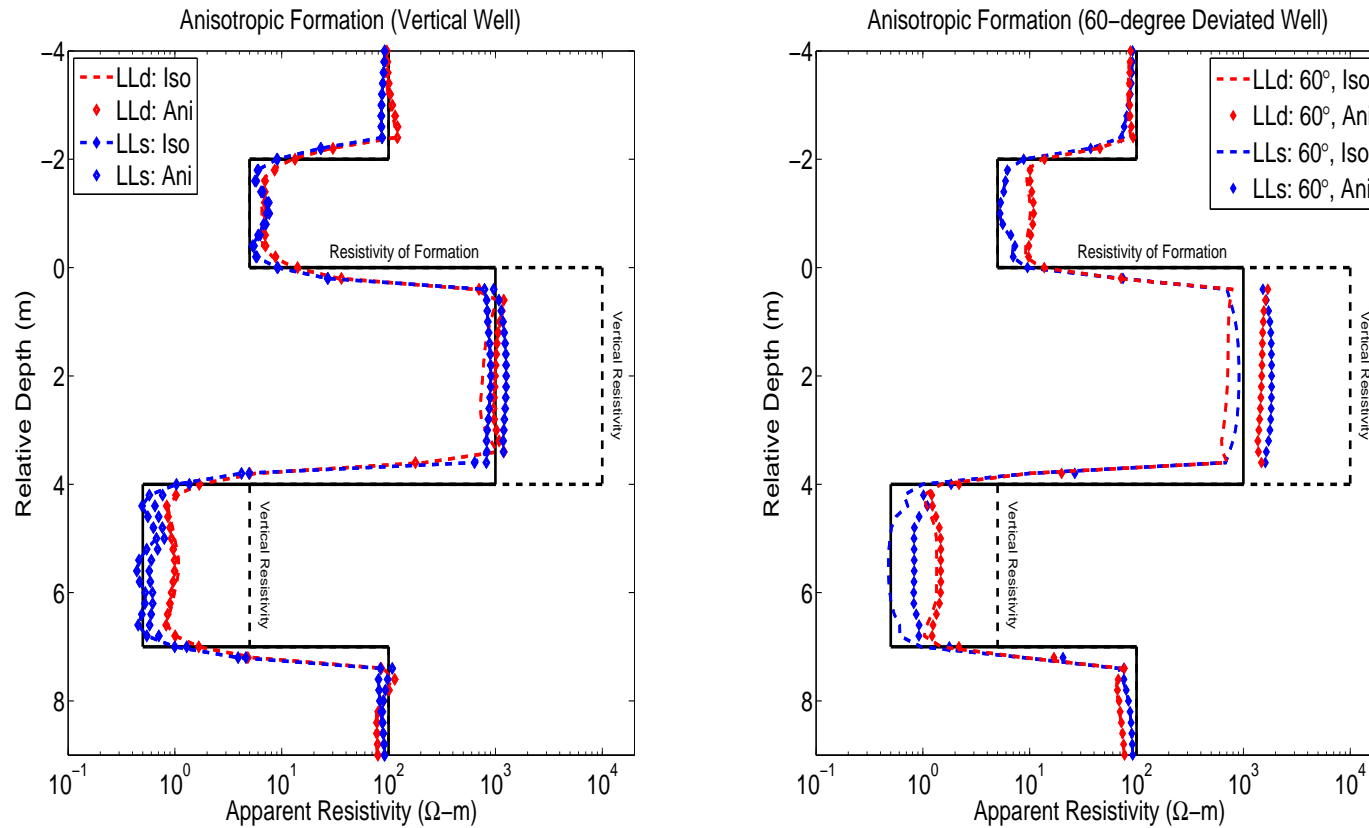
Efecto de Groningen



El efecto de Groningen se incrementa a medida que alejamos el instrumento de medición del electrodo B

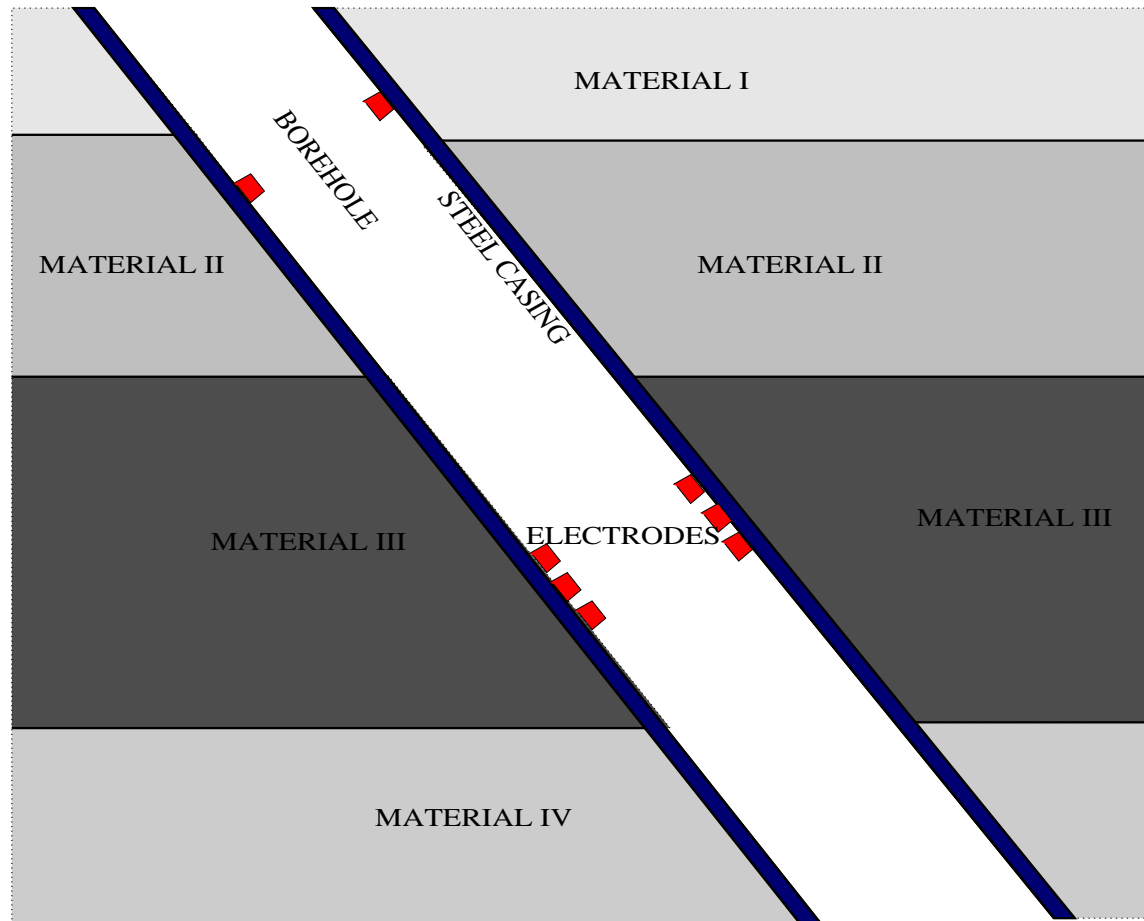
simulaciones electromagnéticas en 2D

Herramientas 'Laterolog' en Pozos Desviados



En pozos desviados es más fácil identificar la anisotropía

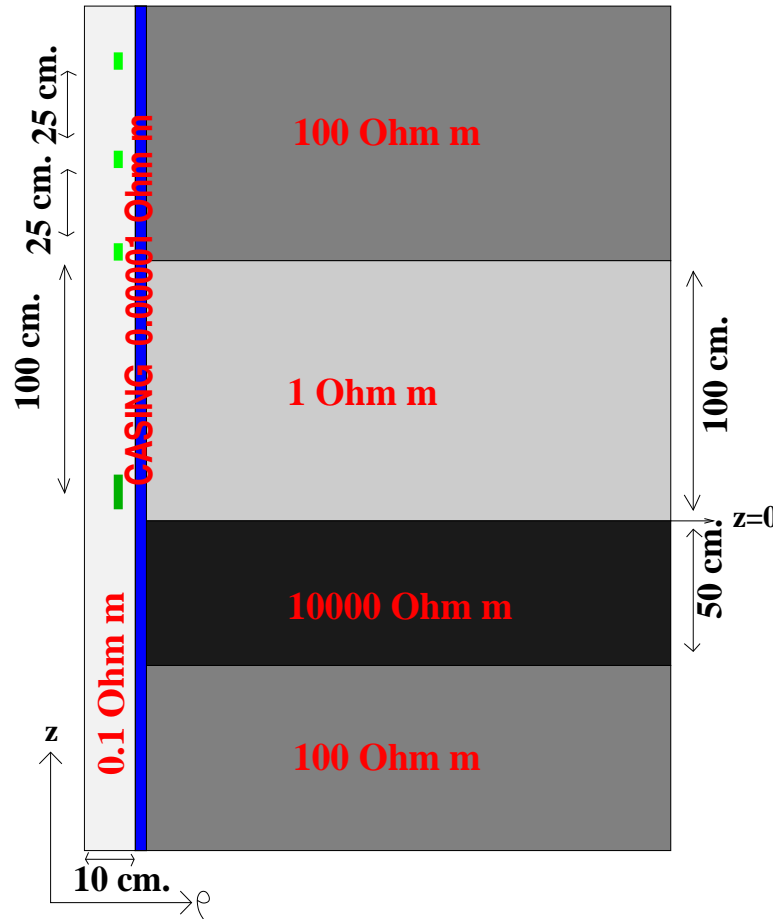
simulaciones electromagnéticas en 2.5D y 3D



Objetivo: Determinación del campo electromagnético en las antenas receptoras.

simulaciones electromagnéticas en 2.5D y 3D

Mediciones a Través de una Tubería (Problema Modelo)



Frecuencia: 0 Hz.

Resistividad de la tubería: 10^{-5} Ohm · m.

Ancho de la tubería: 0.01127 m

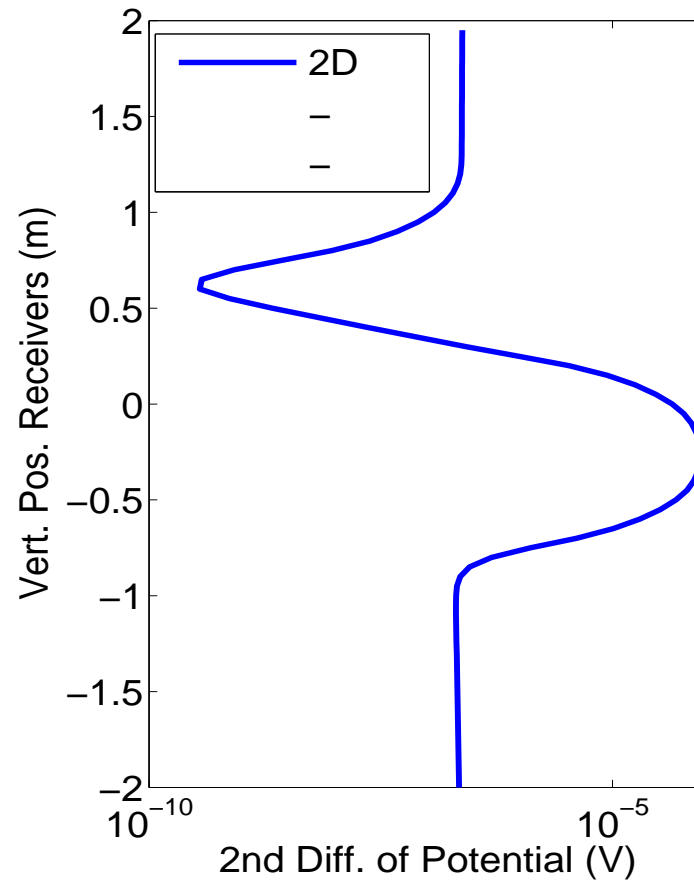
Gran contraste en resistividad

Electrodos

Tamaño del dominio: 1000m x 2000m

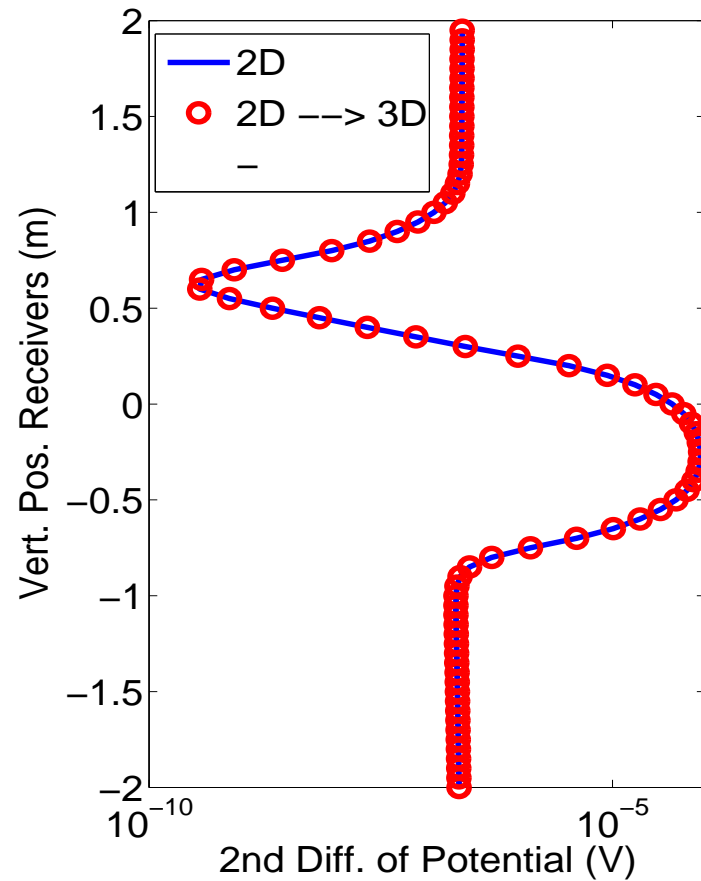
simulaciones electromagnéticas en 2.5D y 3D

Problema con simetría axial



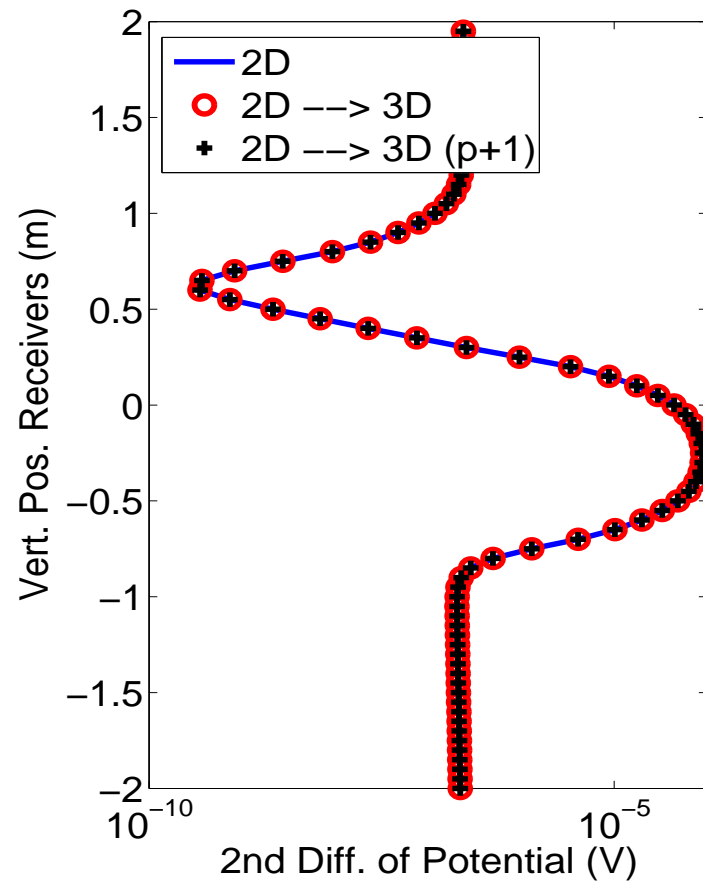
simulaciones electromagnéticas en 2.5D y 3D

Problema con simetría axial



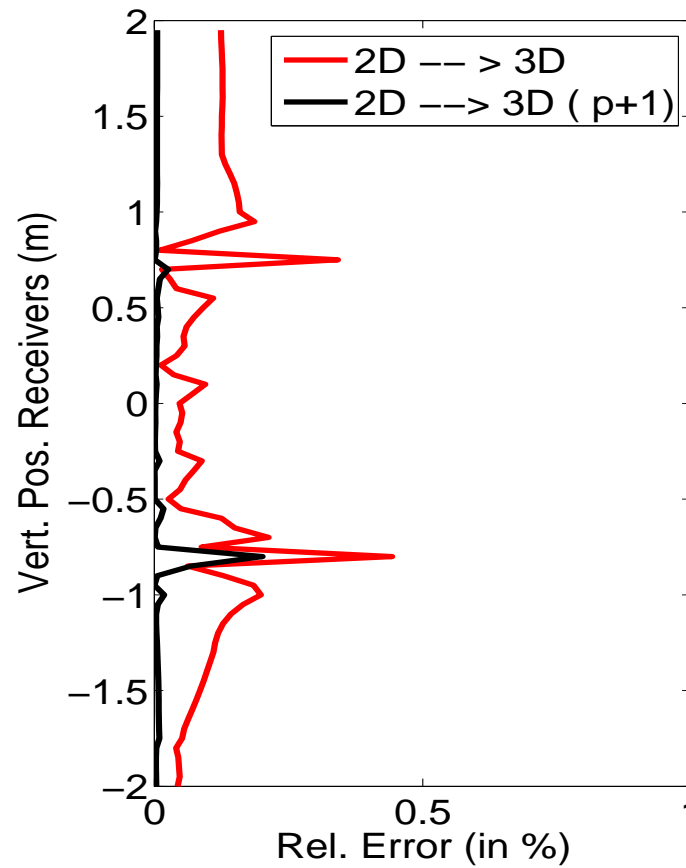
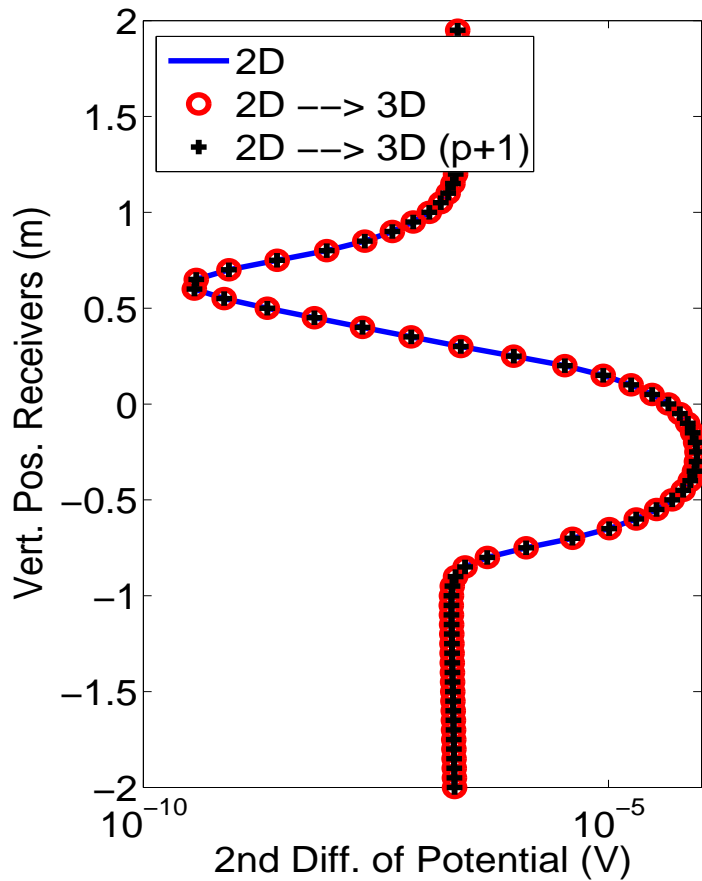
simulaciones electromagnéticas en 2.5D y 3D

Problema con simetría axial



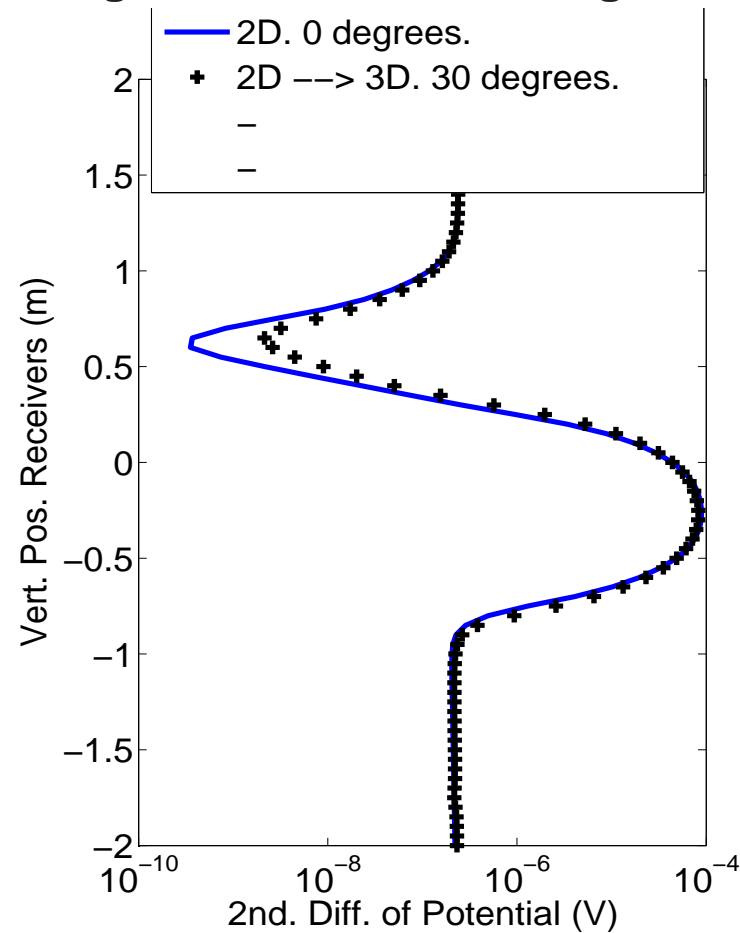
simulaciones electromagnéticas en 2.5D y 3D

Problema con simetría axial



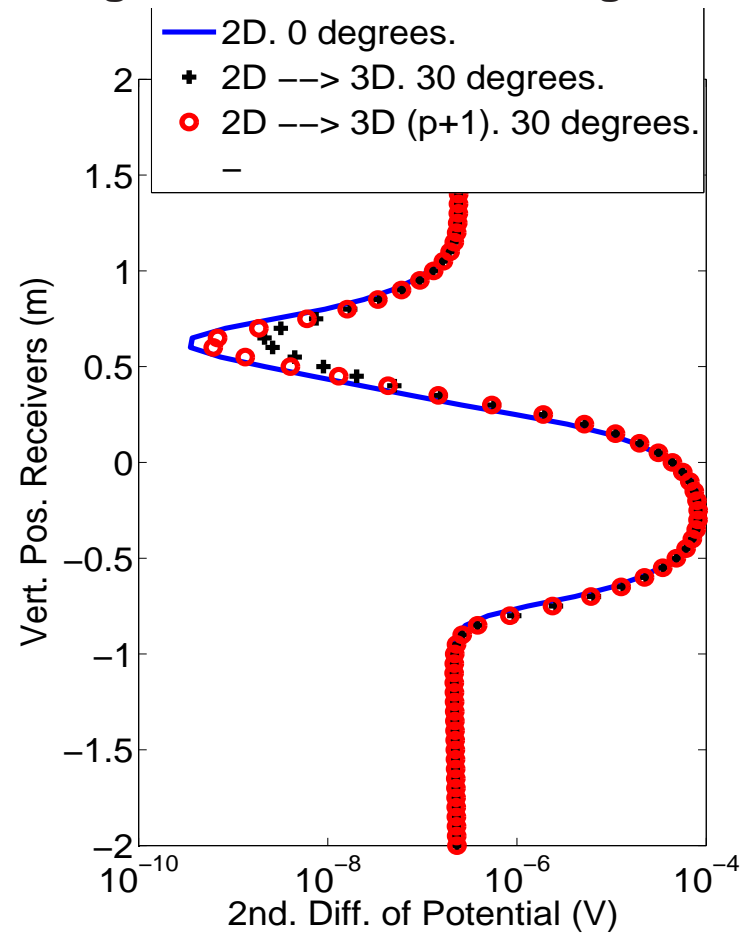
simulaciones electromagnéticas en 2.5D y 3D

Ángulo de incidencia: 30 grados



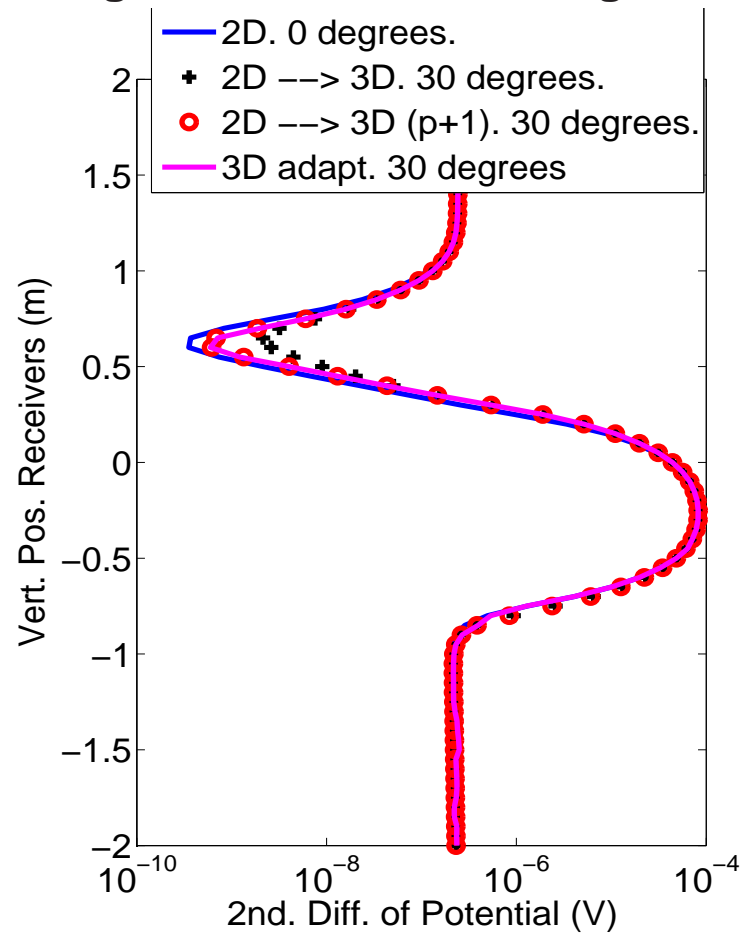
simulaciones electromagnéticas en 2.5D y 3D

Ángulo de incidencia: 30 grados



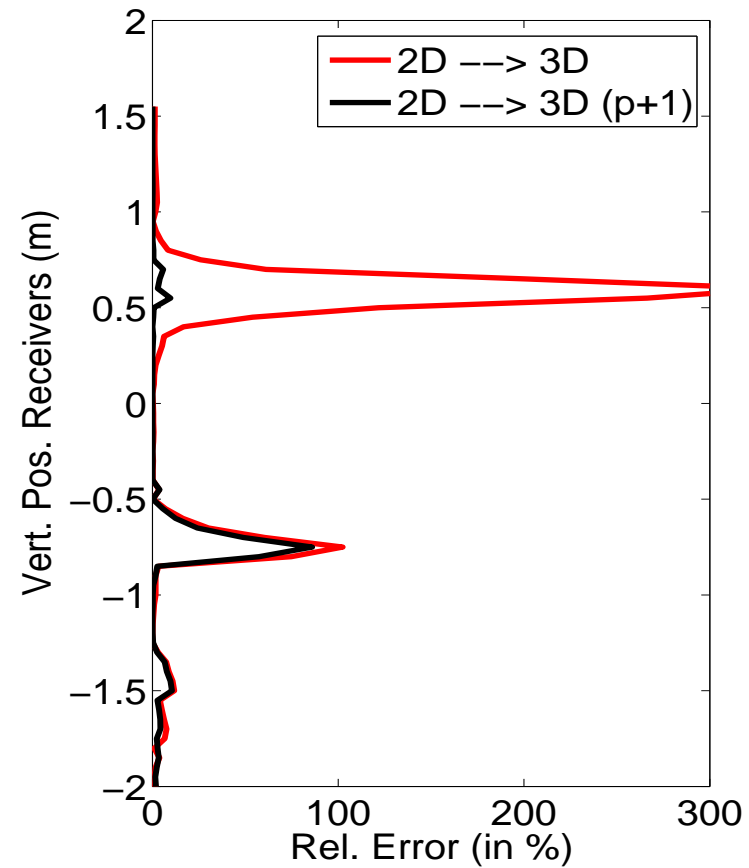
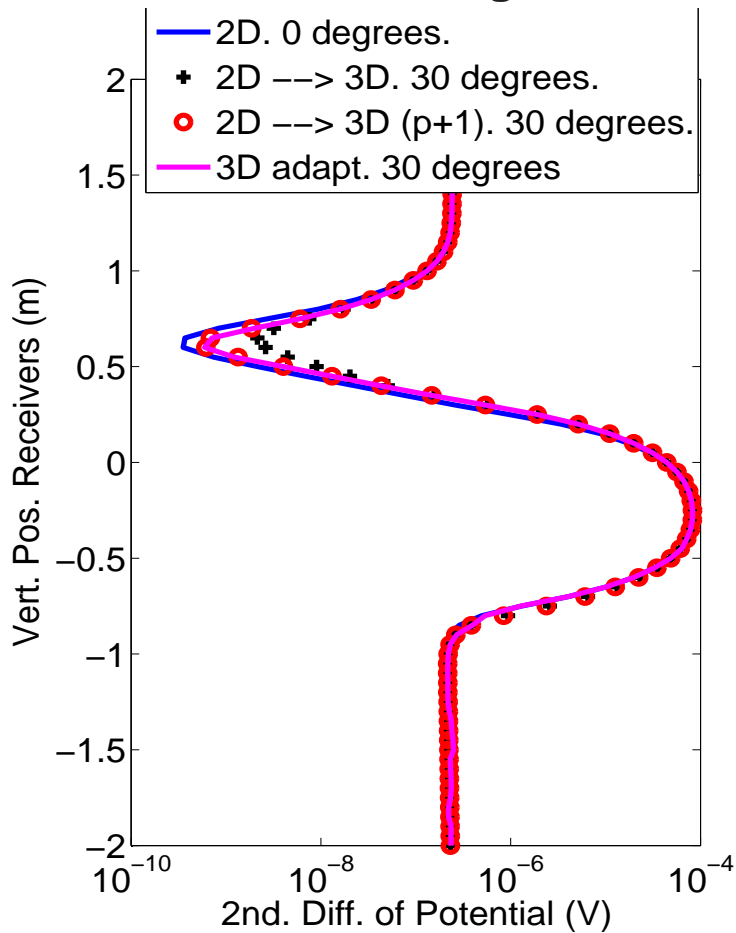
simulaciones electromagnéticas en 2.5D y 3D

Ángulo de incidencia: 30 grados



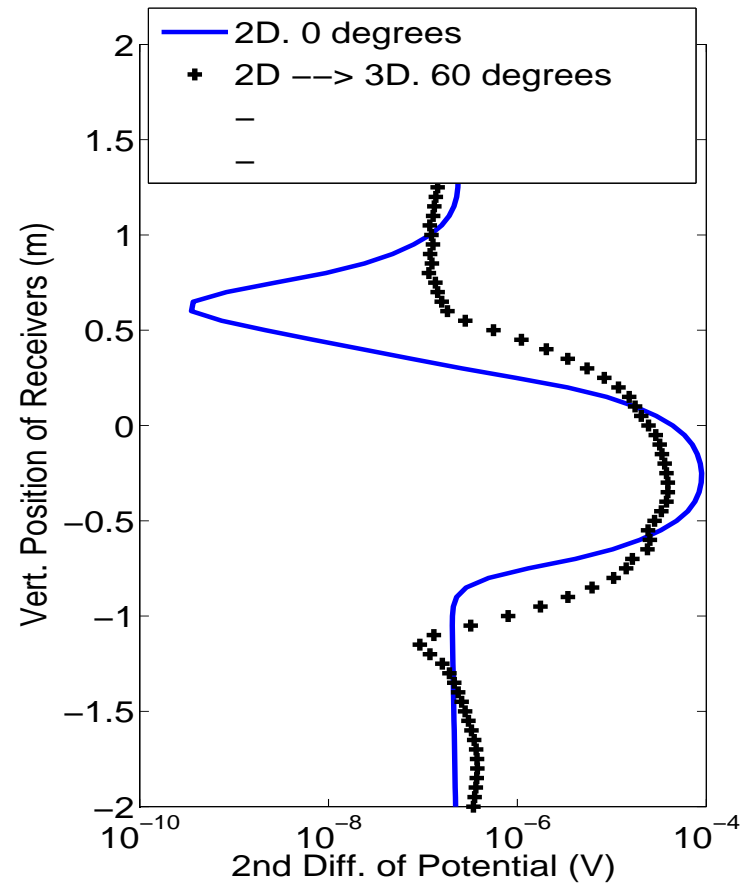
simulaciones electromagnéticas en 2.5D y 3D

Ángulo de incidencia: 30 grados



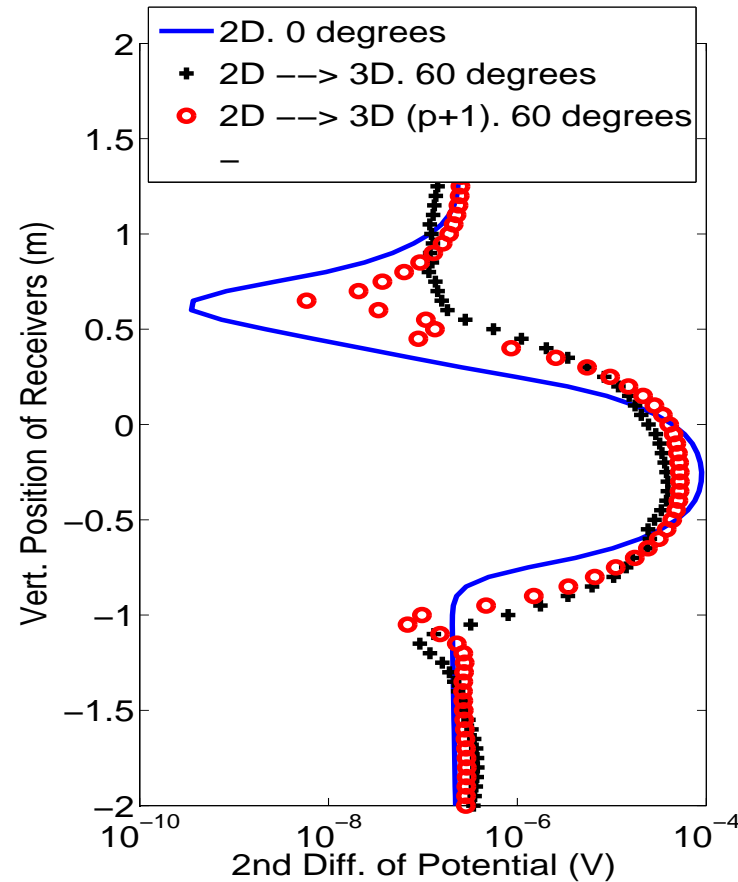
simulaciones electromagnéticas en 2.5D y 3D

Ángulo de incidencia: 60 grados



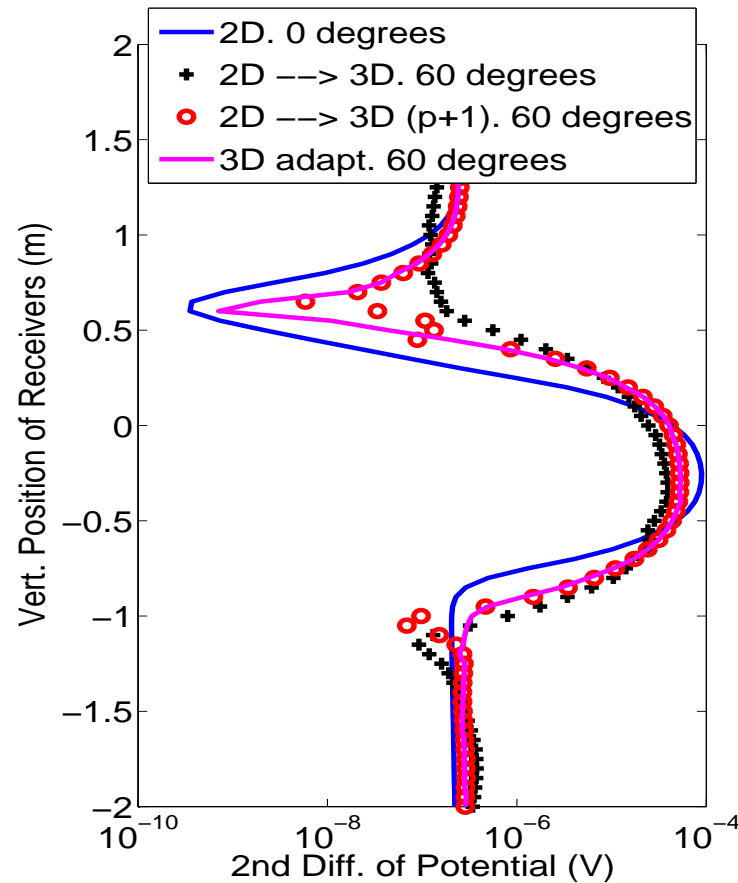
simulaciones electromagnéticas en 2.5D y 3D

Ángulo de incidencia: 60 grados



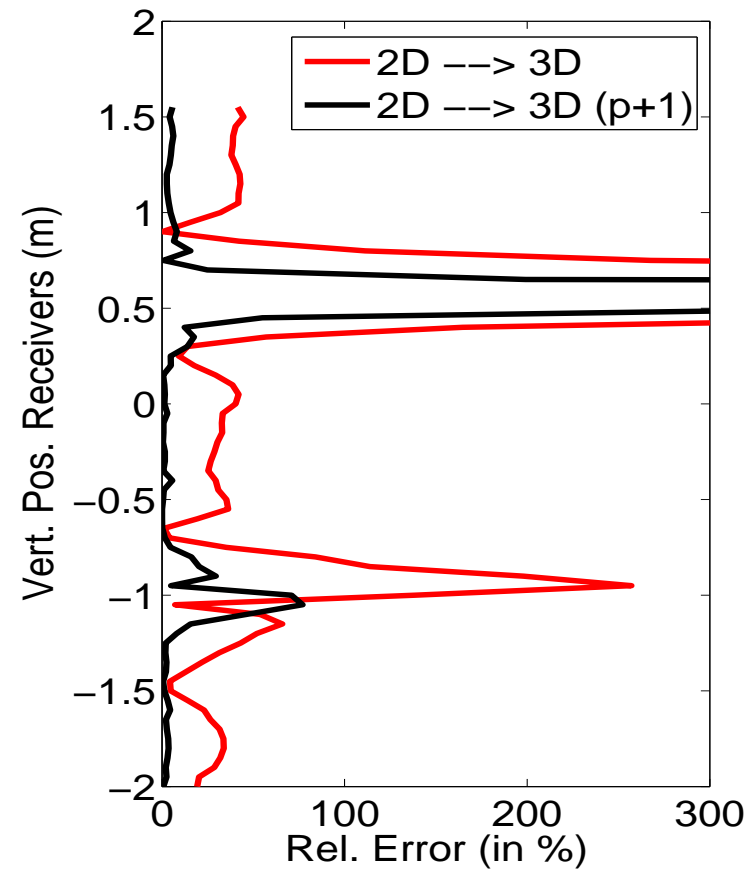
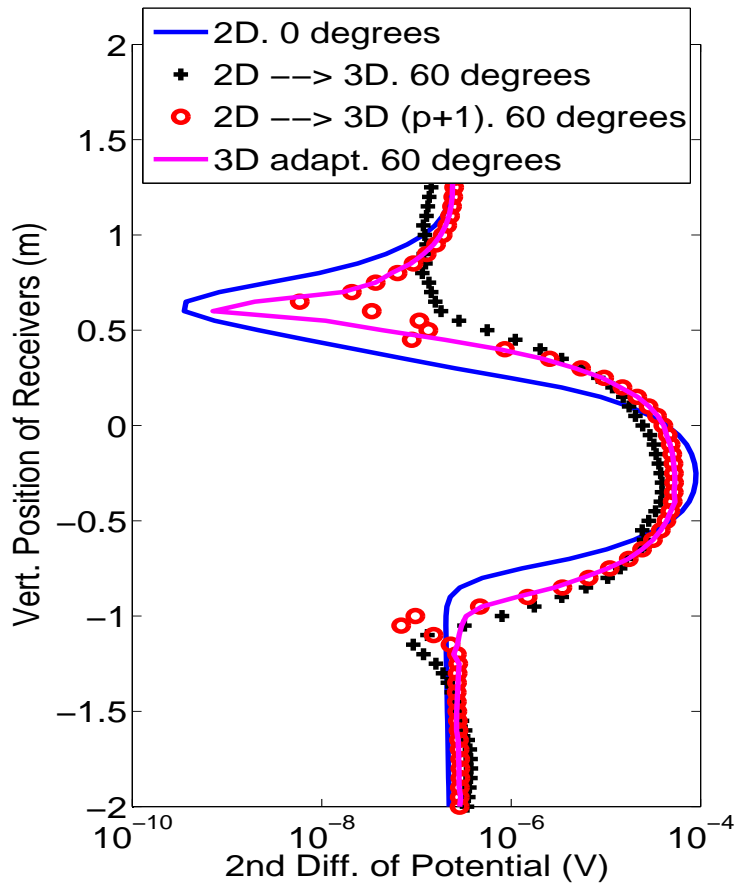
simulaciones electromagnéticas en 2.5D y 3D

Ángulo de incidencia: 60 grados



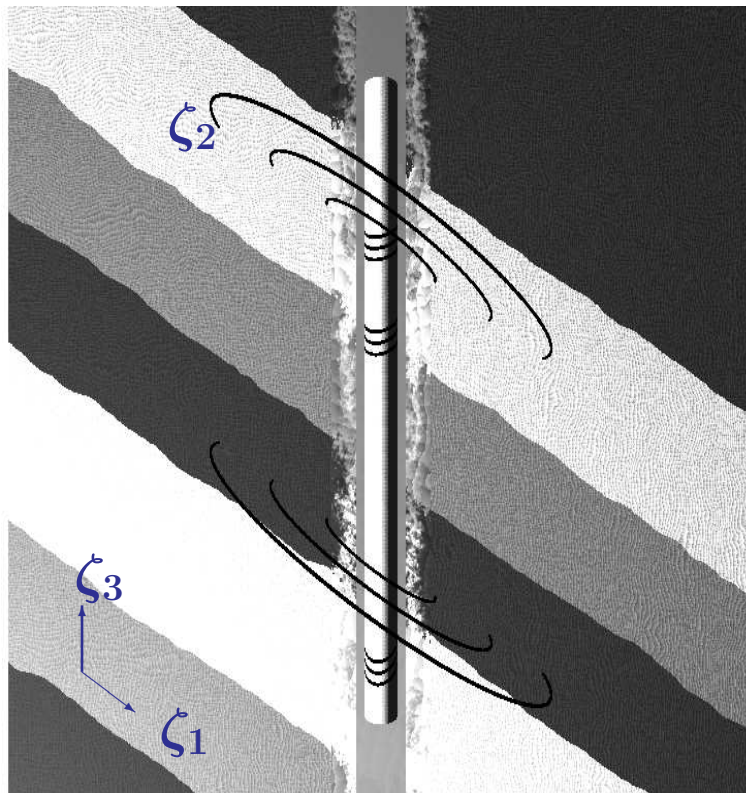
simulaciones electromagnéticas en 2.5D y 3D

Ángulo de incidencia: 60 grados



simulaciones electromagnéticas en 2.5D y 3D

Sistema de Coordenadas NO Ortogonal



Expansión de Fourier en ζ_2

Cero Frecuencia: $-\nabla \sigma \nabla u = f$

$$u(\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3) = \sum_{l=-\infty}^{l=\infty} u_l(\zeta_1, \zeta_3) e^{jl\zeta_2}$$

$$\sigma(\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3) = \sum_{m=-\infty}^{m=\infty} \sigma_m(\zeta_1, \zeta_3) e^{jm\zeta_2}$$

$$f(\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3) = \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} f_n(\zeta_1, \zeta_3) e^{jn\zeta_2}$$

Los modos de Fourier $e^{jl\zeta_2}$ constituyen una base ortogonal (en L^2) de orden superior.

simulaciones electromagnéticas en 2.5D y 3D

Simulación de Mediciones a Través de una Tubería

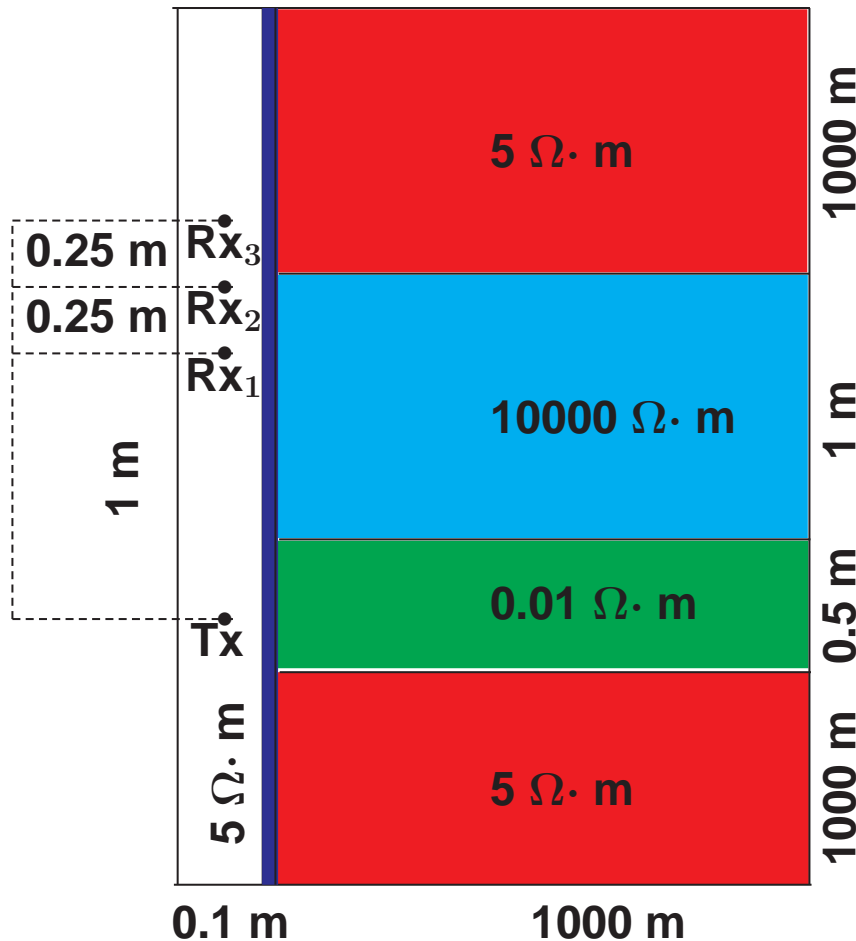


Figura:

Simetría axial

Un electrodo de corriente (fuente)

Tres electrodos de voltaje (receptores)

Objetivo:

Calcular la segunda diferencia del potencial para varios ángulos y con invasión de agua

Metodología:

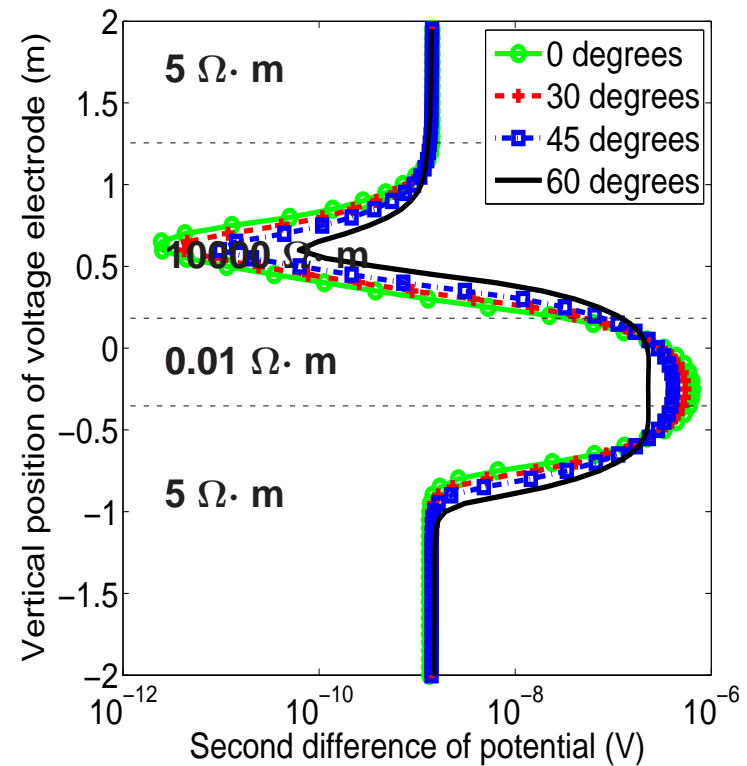
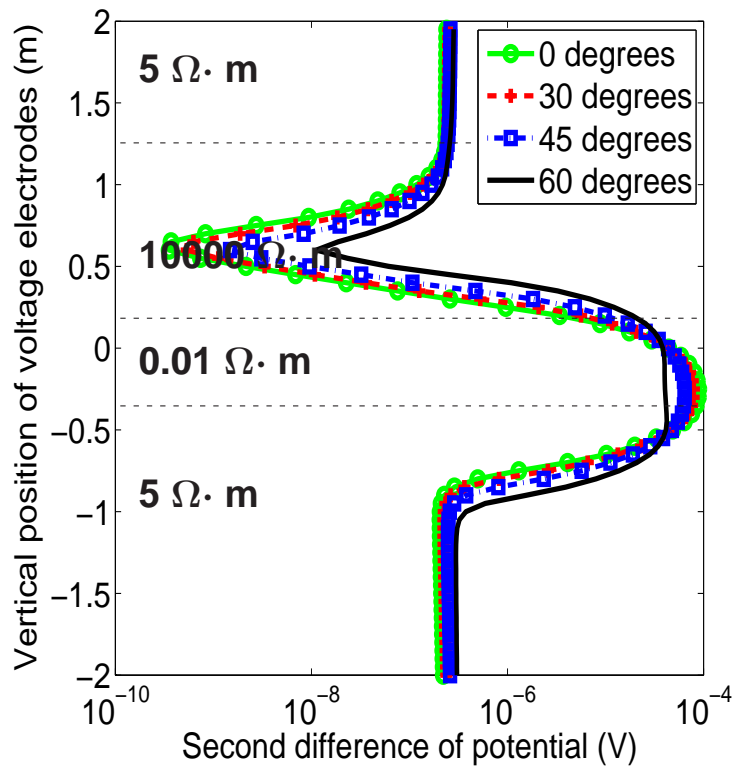
Expansión de Fourier +
cambio de coordenadas +
MEF hp en 2D

simulaciones electromagnéticas en 2.5D y 3D

Sensibilidad con Respecto a la Conductividad de la Tubería

Resistividad Tubería= $10^{-5} \Omega \cdot m$

Resistividad Tubería= $2.3 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$

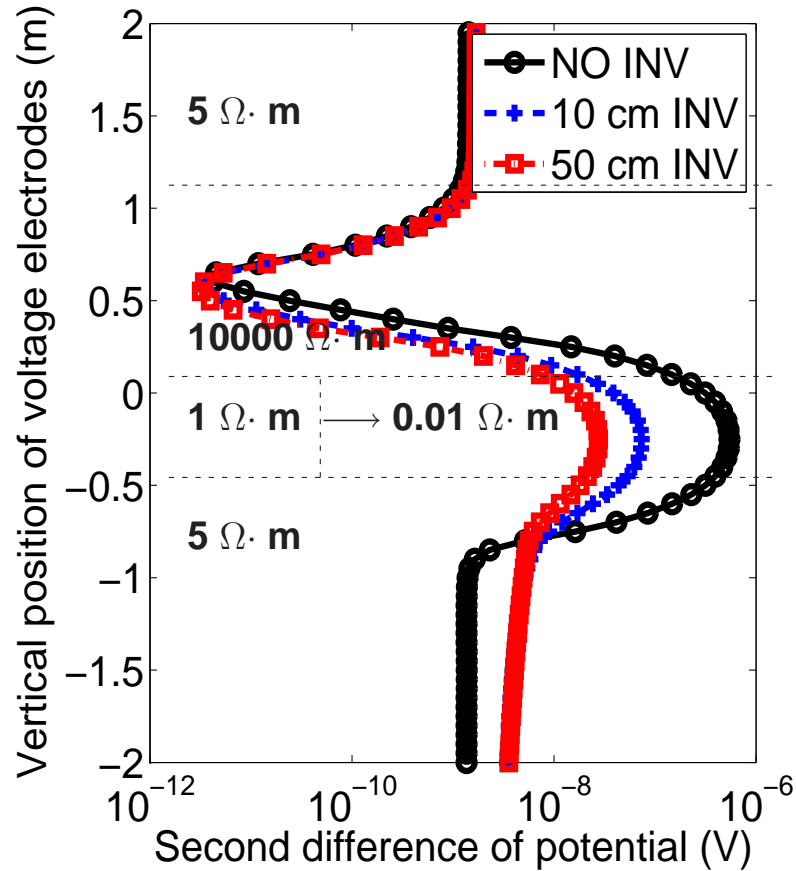


Cualitativamente, los resultados son independientes de la resistividad de la tubería.

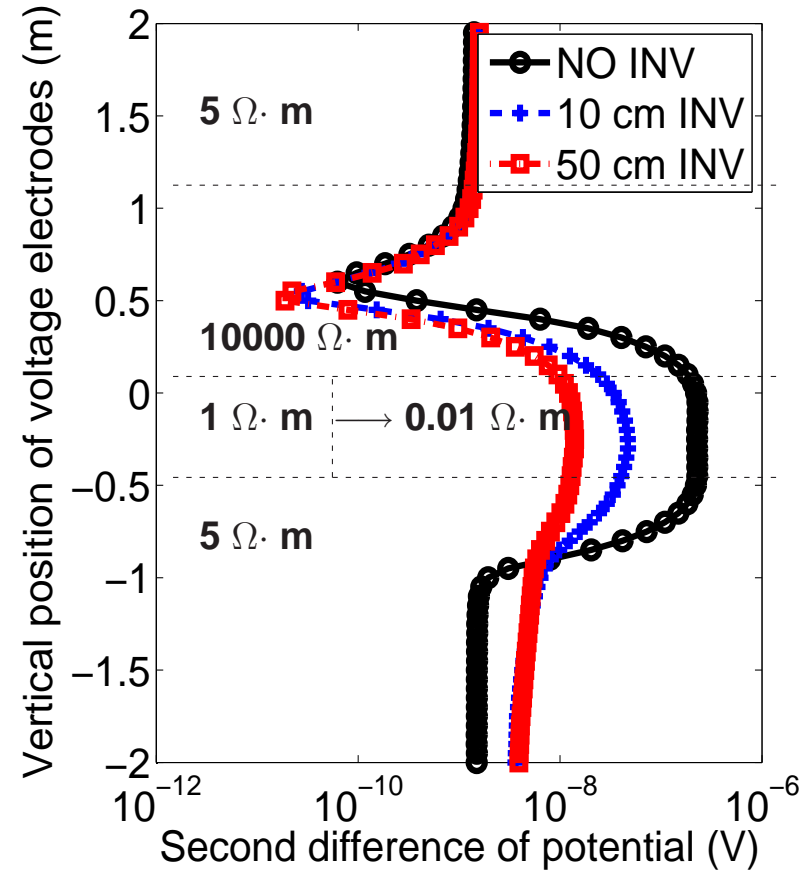
simulaciones electromagnéticas en 2.5D y 3D

Mediciones a Través de una Tubería (Invasión)

30 degrees

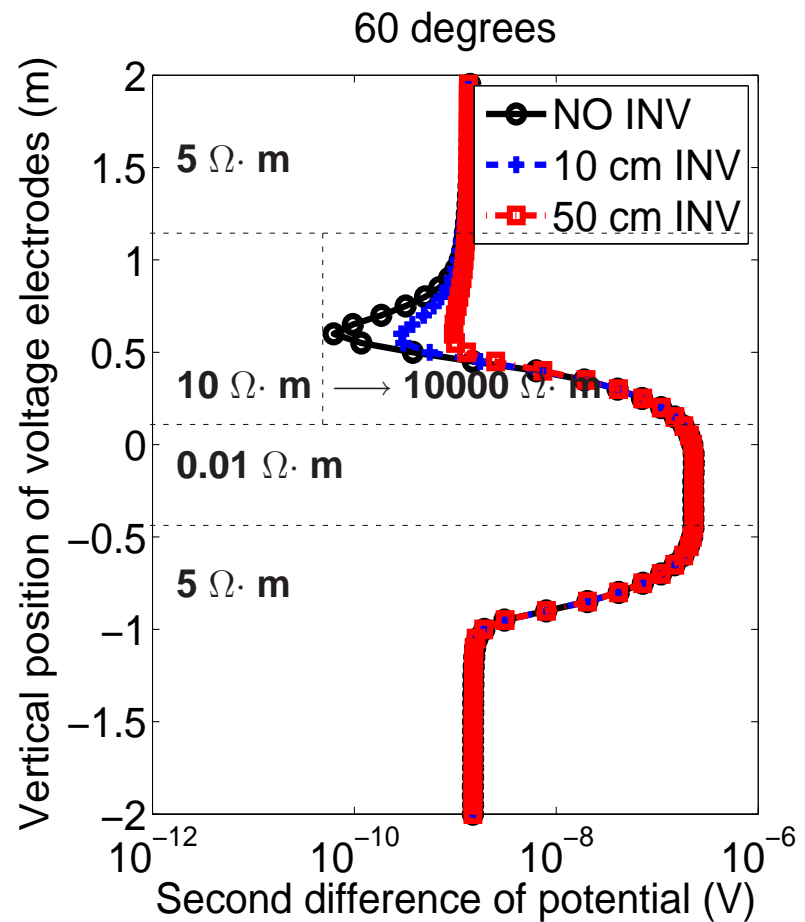
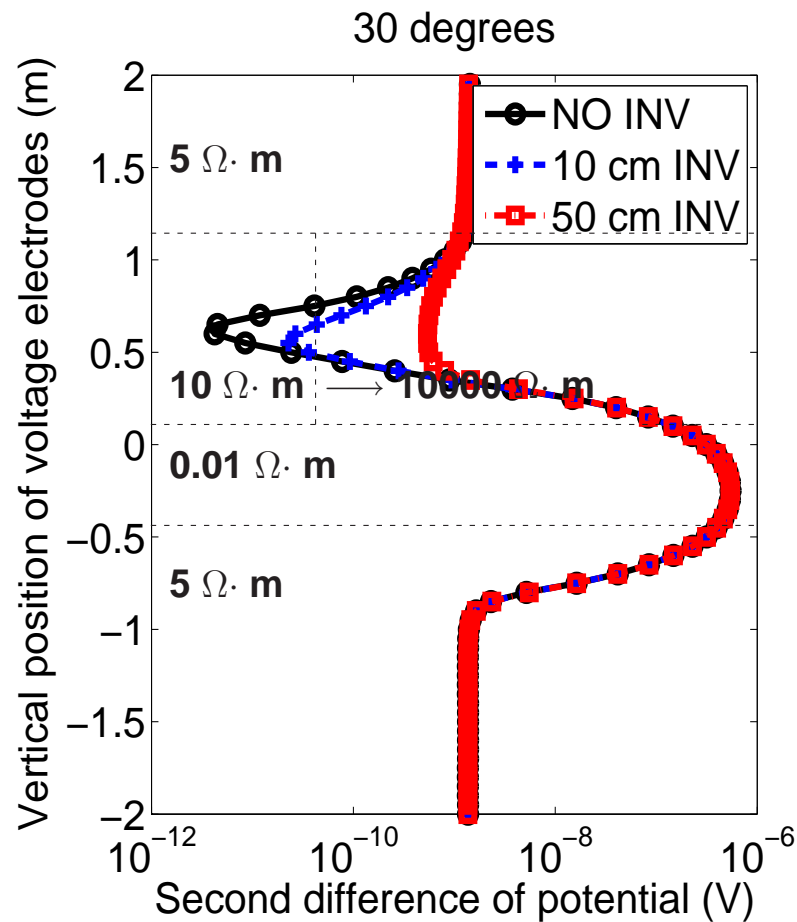


60 degrees

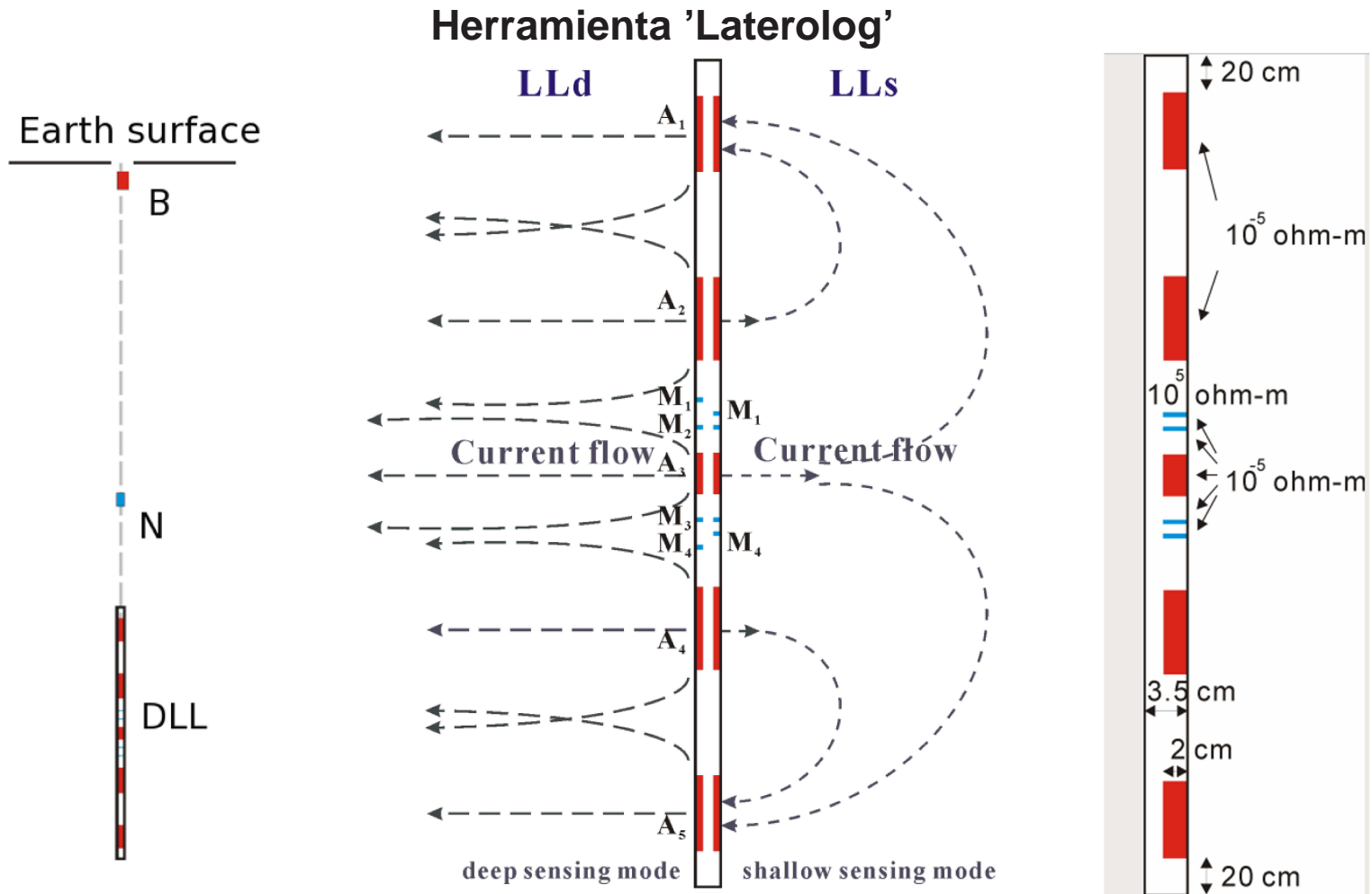


simulaciones electromagnéticas en 2.5D y 3D

Mediciones a Través de una Tubería (Invasión)

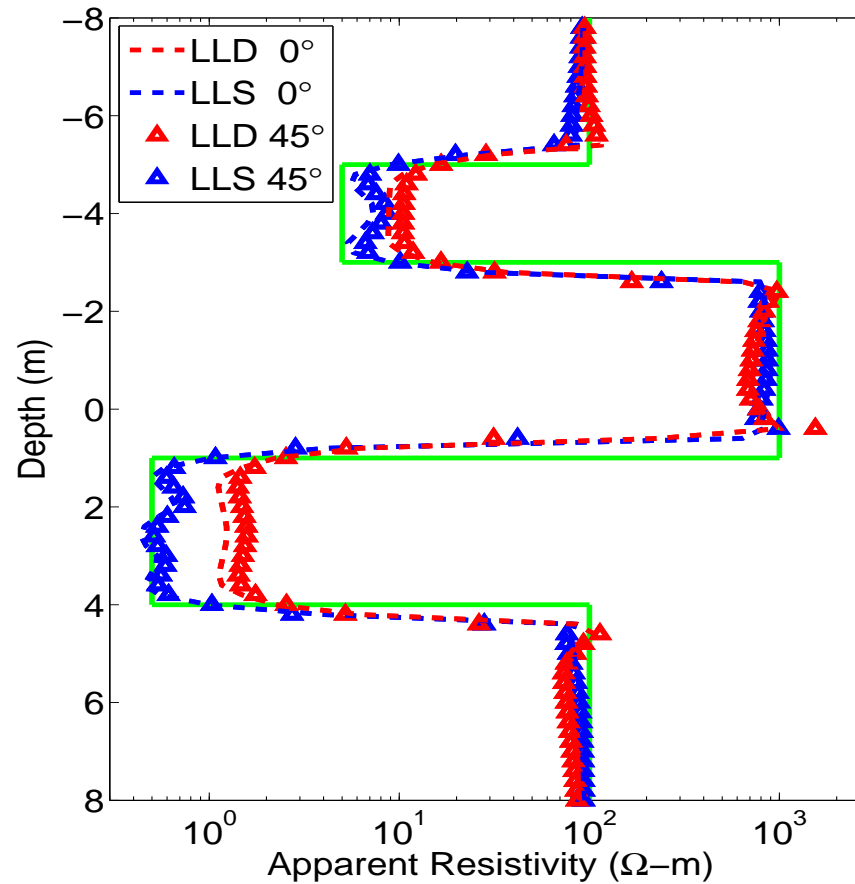


simulaciones electromagnéticas en 2.5D y 3D



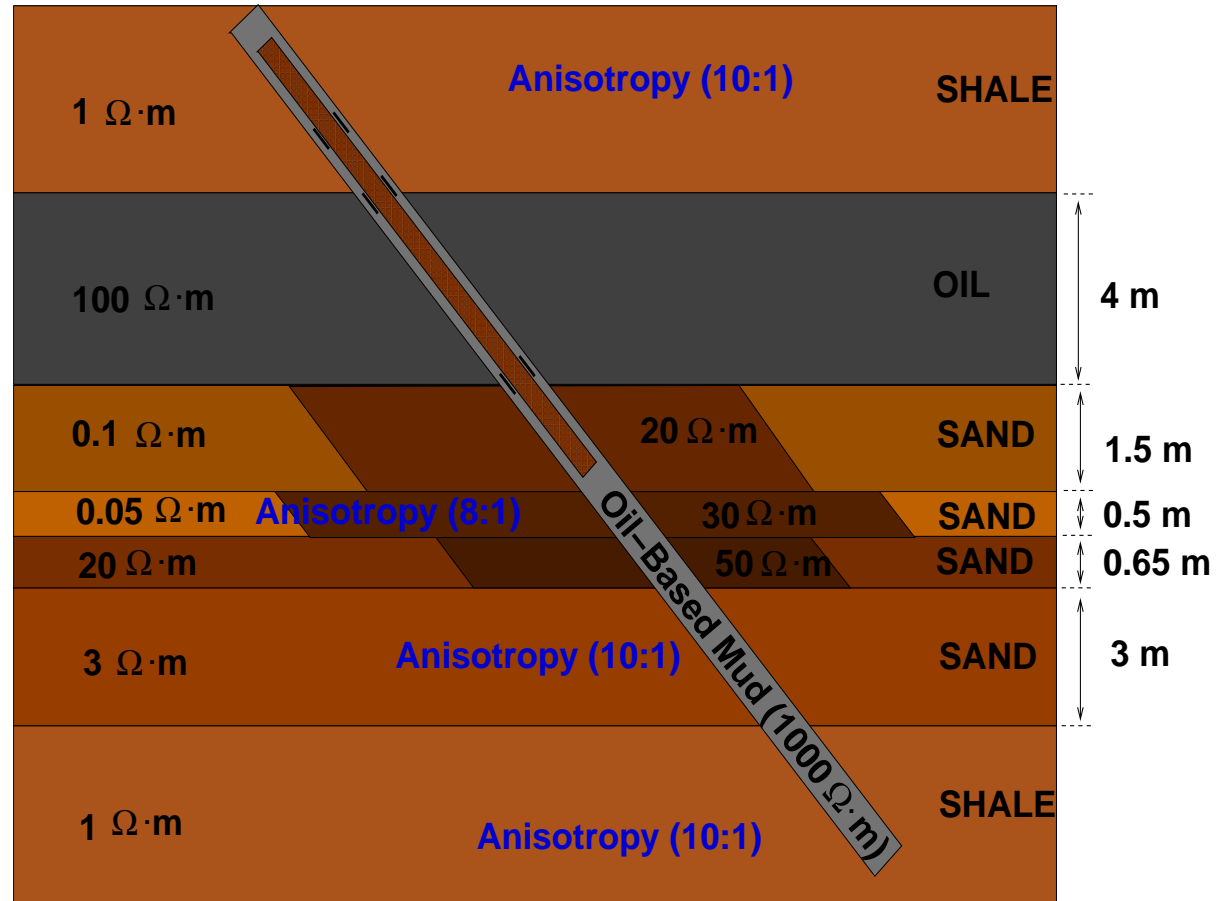
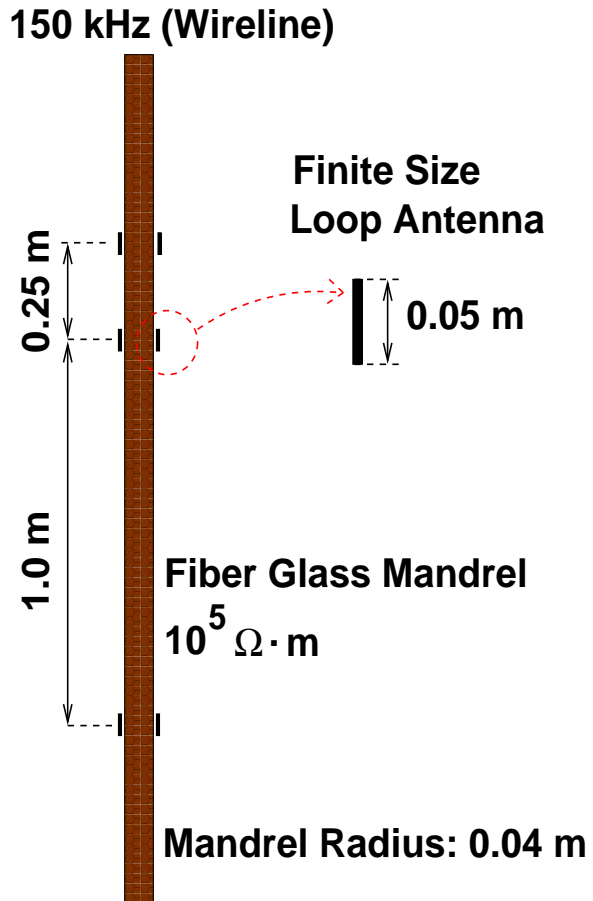
simulaciones electromagnéticas en 2.5D y 3D

Mediciones Utilizando una Herramienta 'Laterolog'



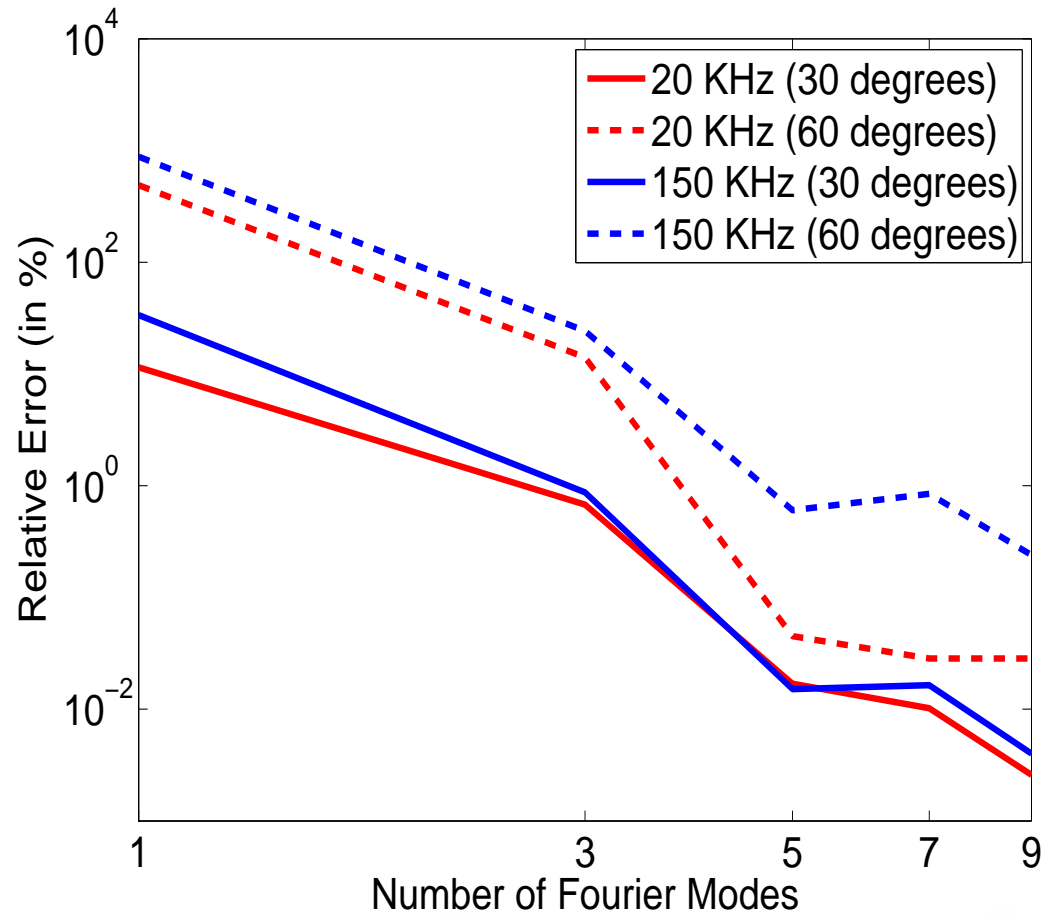
simulaciones electromagnéticas en 2.5D y 3D

Problema Modelo



simulaciones electromagnéticas en 2.5D y 3D

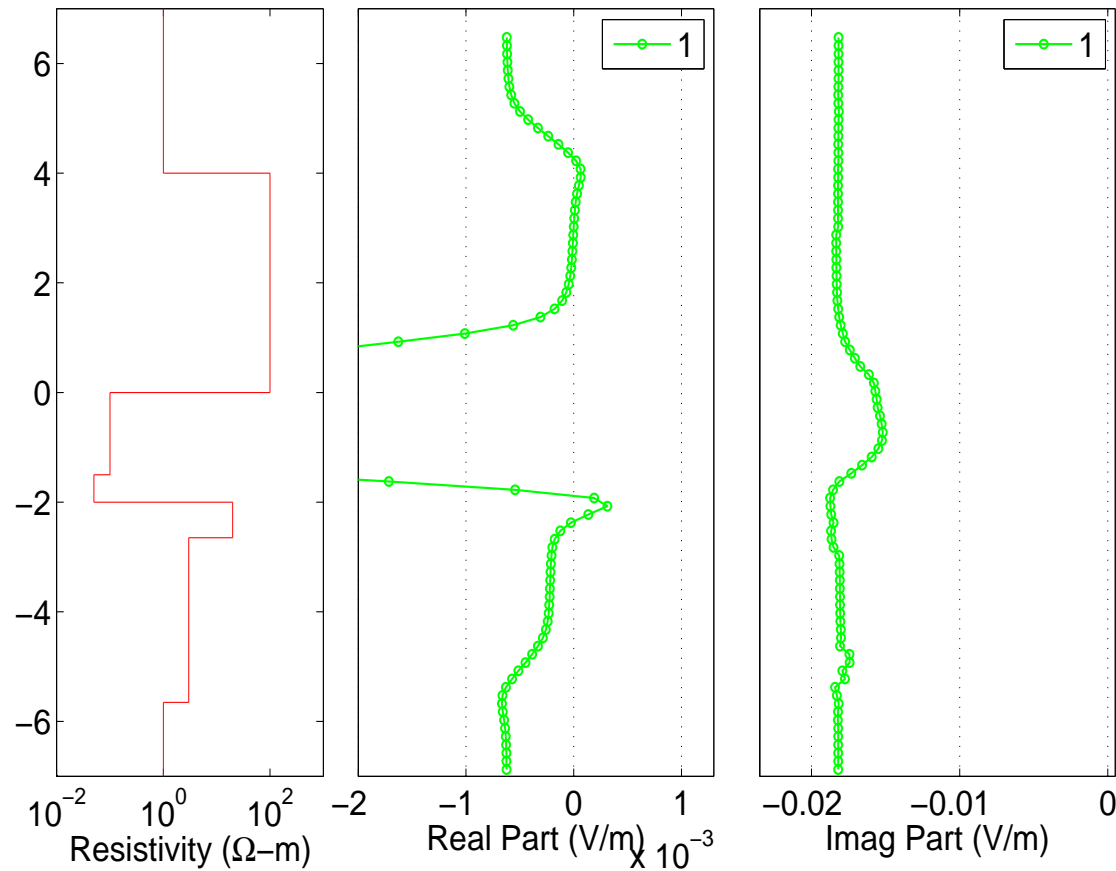
Verificación del código: Herramienta en un medio homogéneo



simulaciones electromagnéticas en 2.5D y 3D

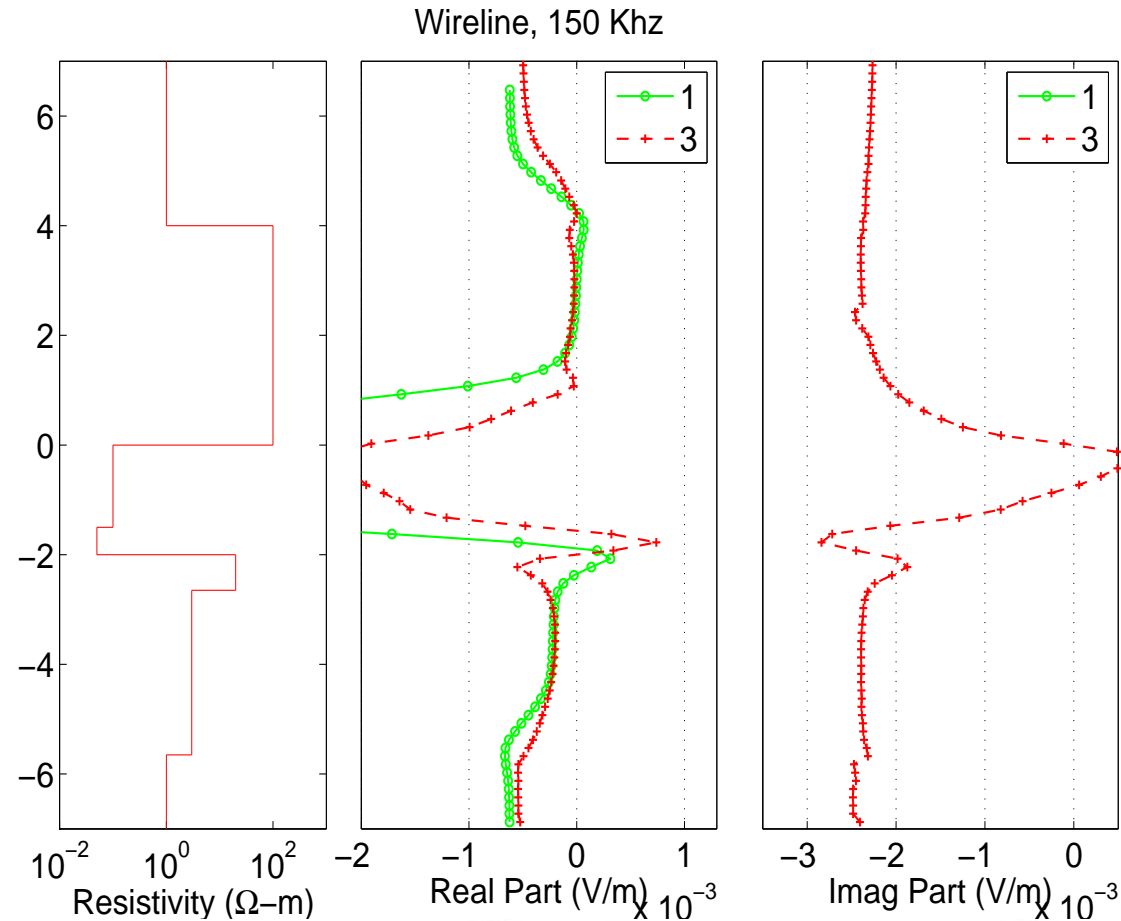
Verificación del código: Herramienta en un medio homogéneo

Wireline, 150 Khz



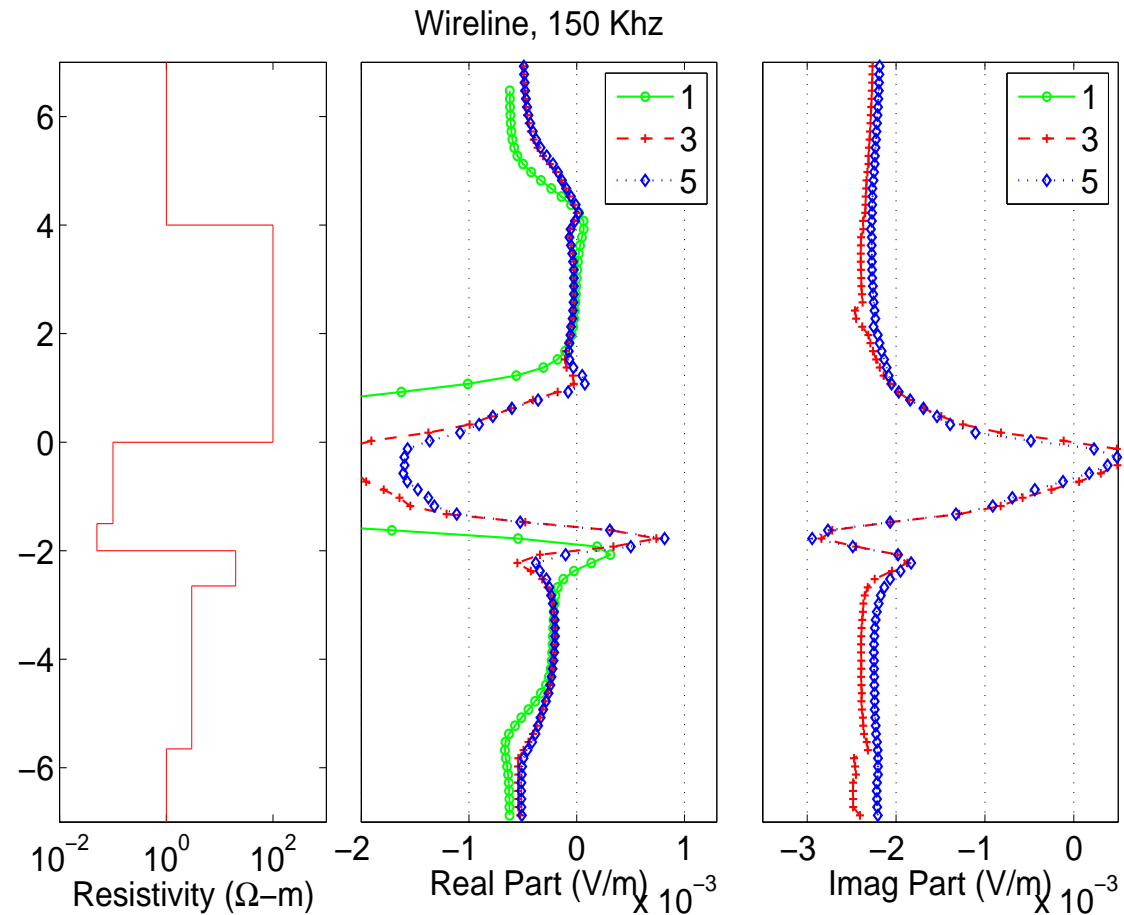
simulaciones electromagnéticas en 2.5D y 3D

Verificación del código: Herramienta en un medio homogéneo



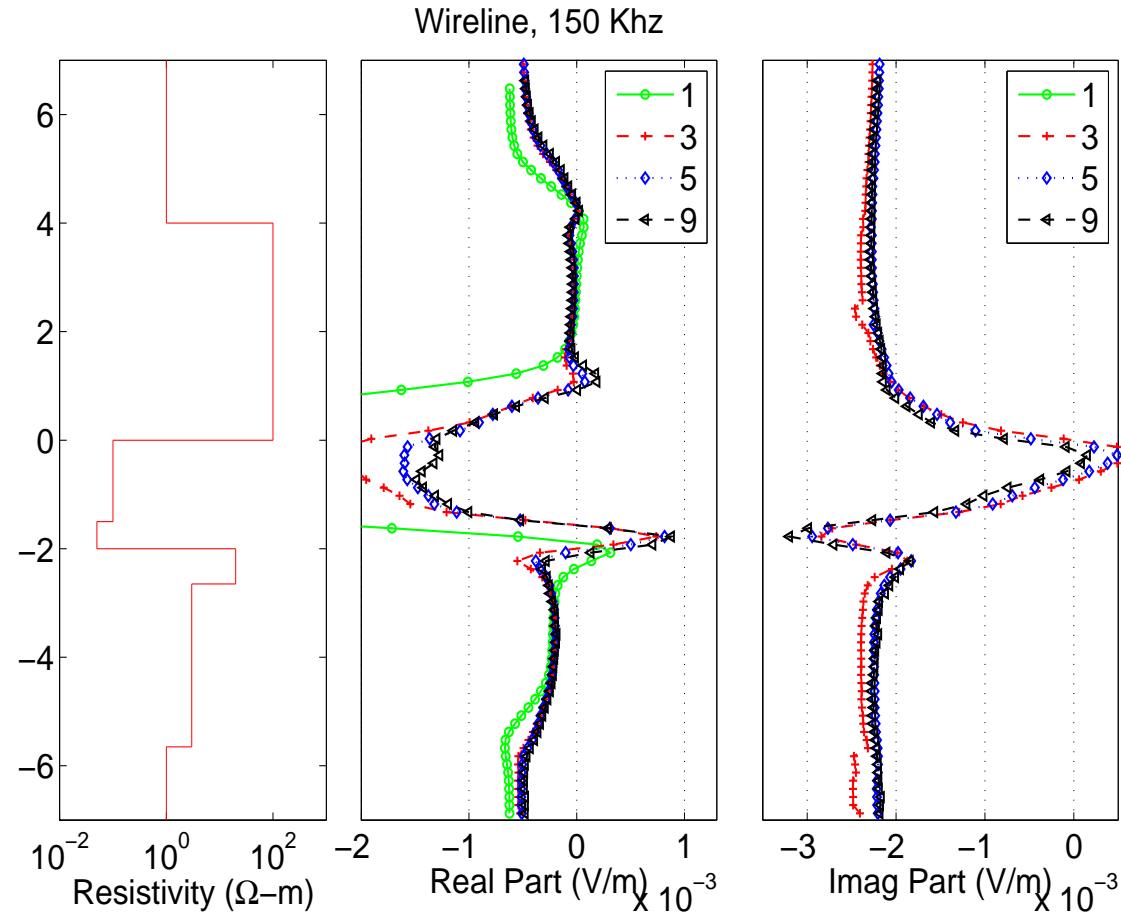
simulaciones electromagnéticas en 2.5D y 3D

Verificación del código: Herramienta en un medio homogéneo



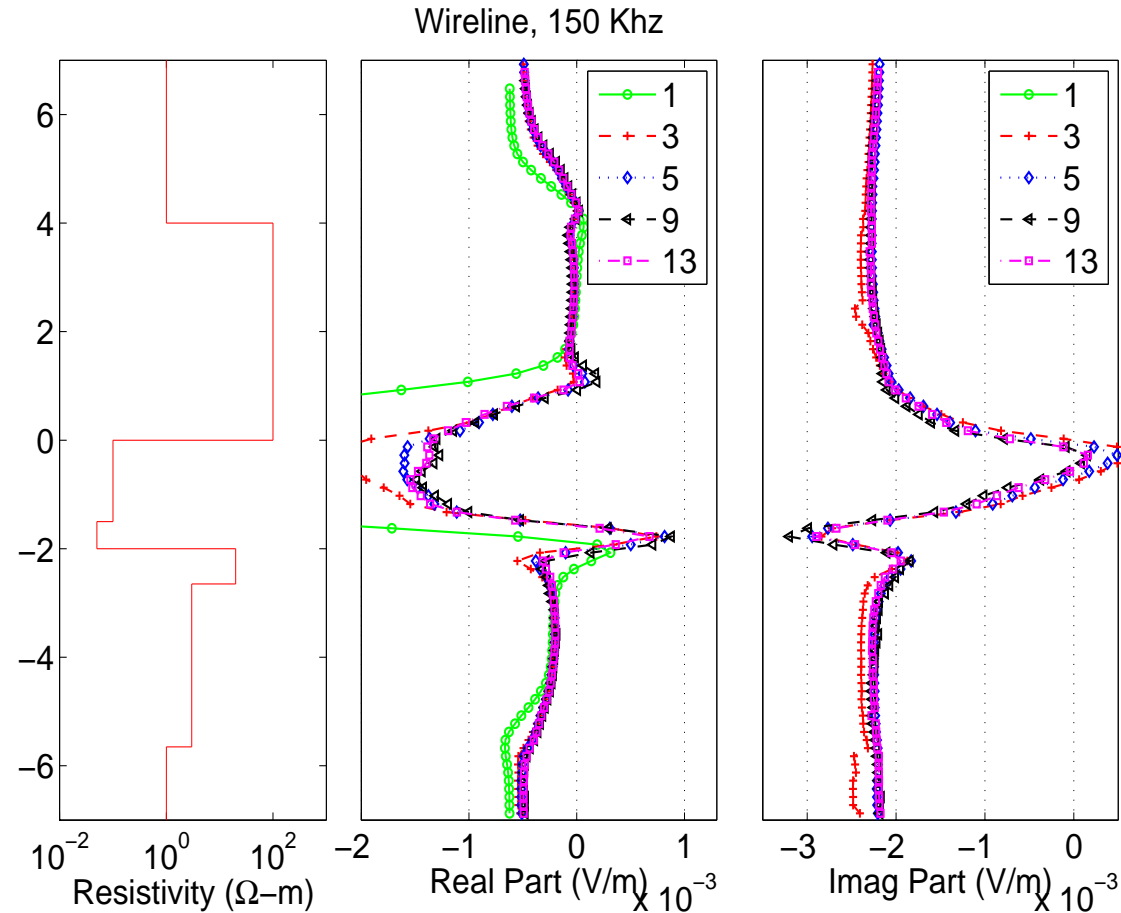
simulaciones electromagnéticas en 2.5D y 3D

Verificación del código: Herramienta en un medio homogéneo



simulaciones electromagnéticas en 2.5D y 3D

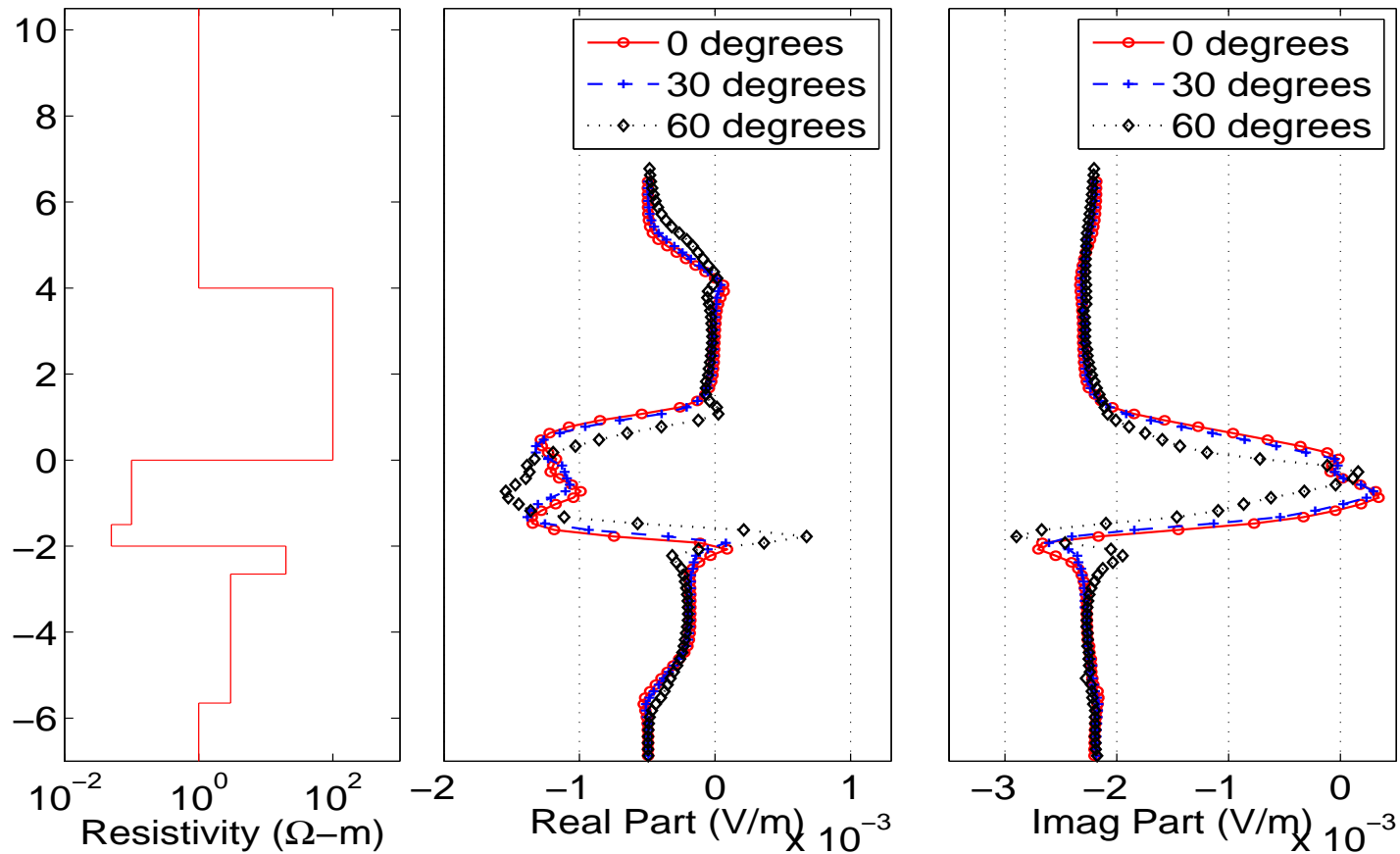
Verificación del código: Herramienta en un medio homogéneo



simulaciones electromagnéticas en 2.5D y 3D

Ángulo de Incidencia

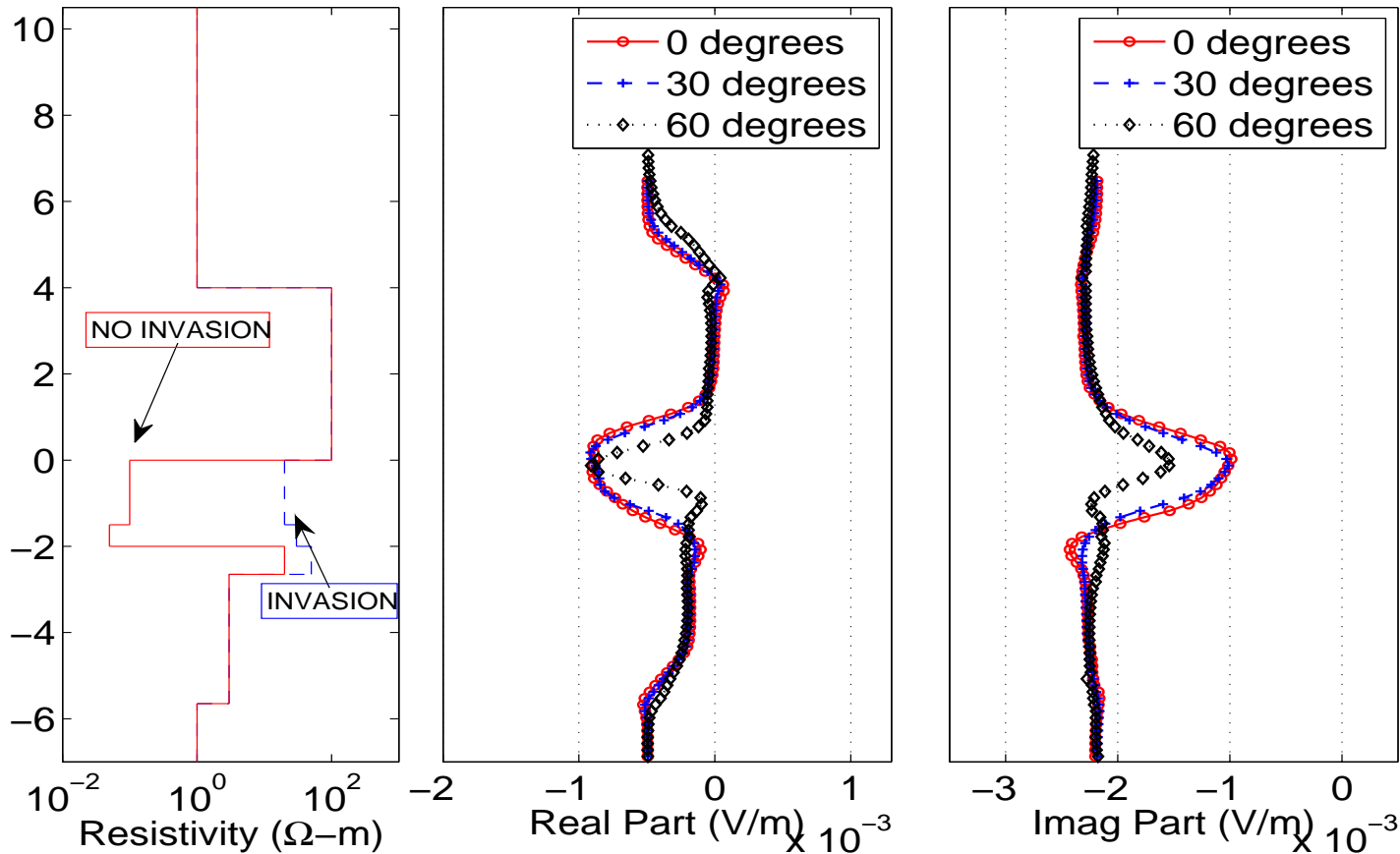
Wireline, 150 Khz



simulaciones electromagnéticas en 2.5D y 3D

Ángulo de Incidencia e Invasión

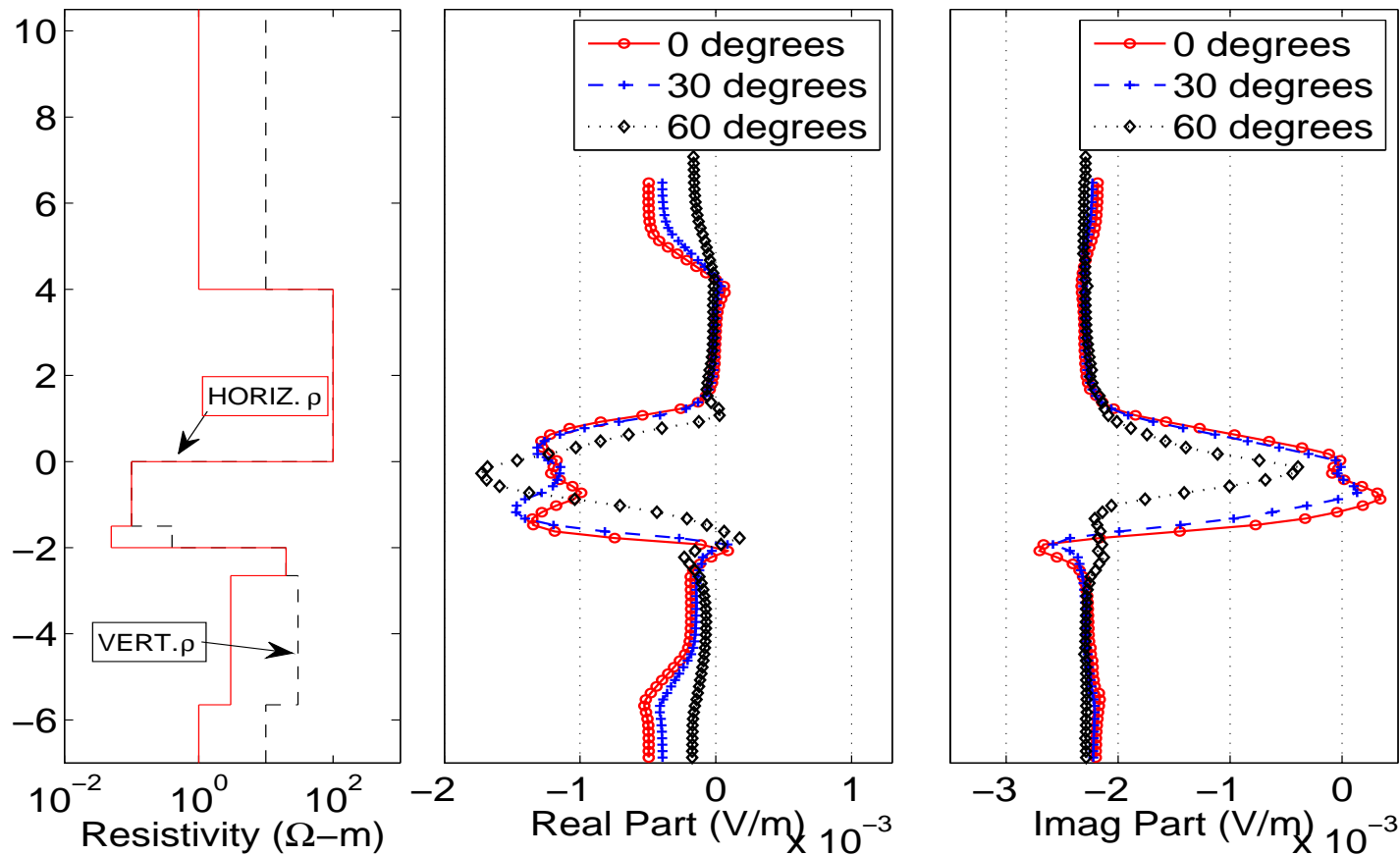
Wireline, 150 Khz



simulaciones electromagnéticas en 2.5D y 3D

Ángulo de Incidencia y Anisotropía

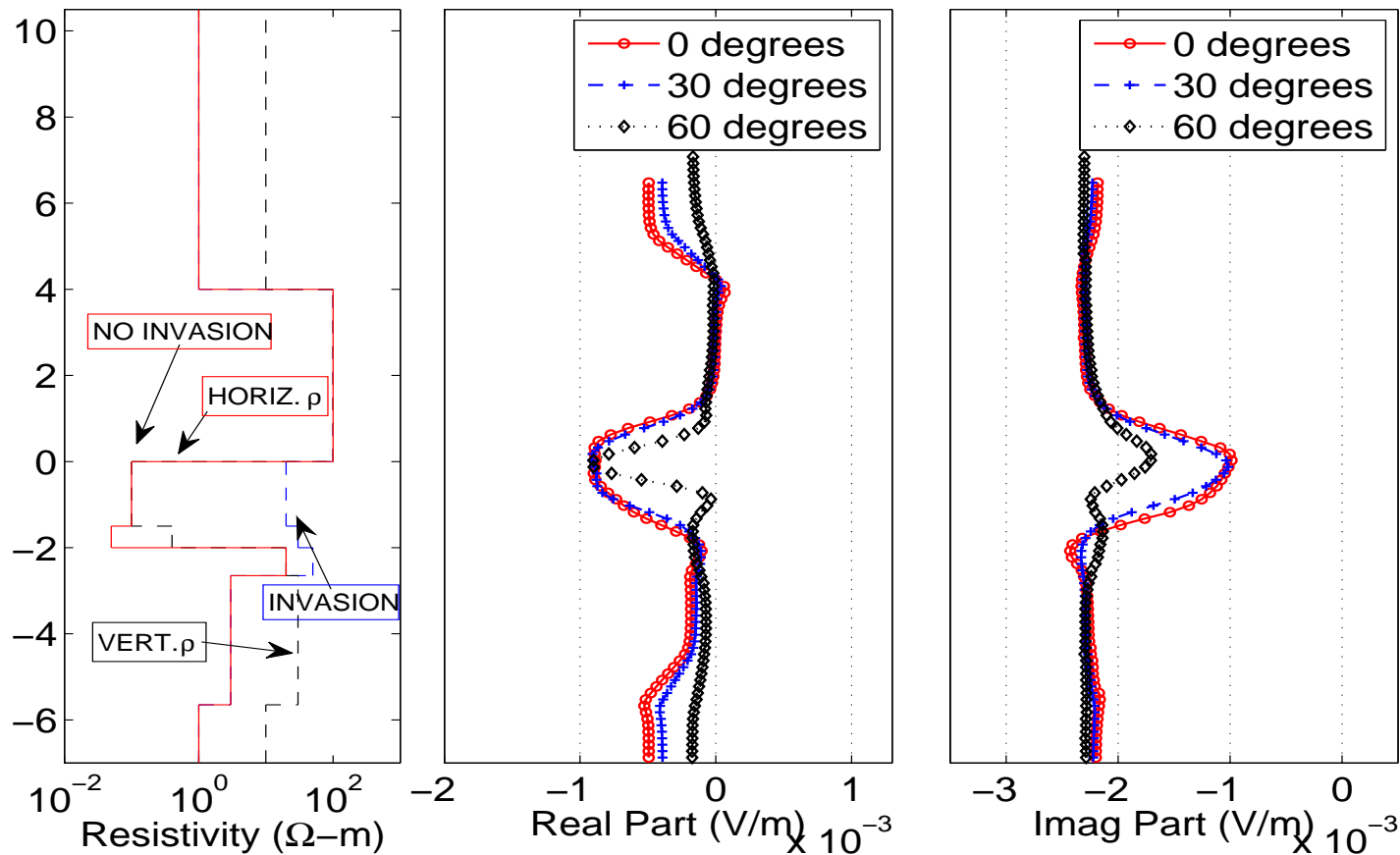
Wireline, 150 Khz



simulaciones electromagnéticas en 2.5D y 3D

Ángulo de Incidencia, Invasión y Anisotropía

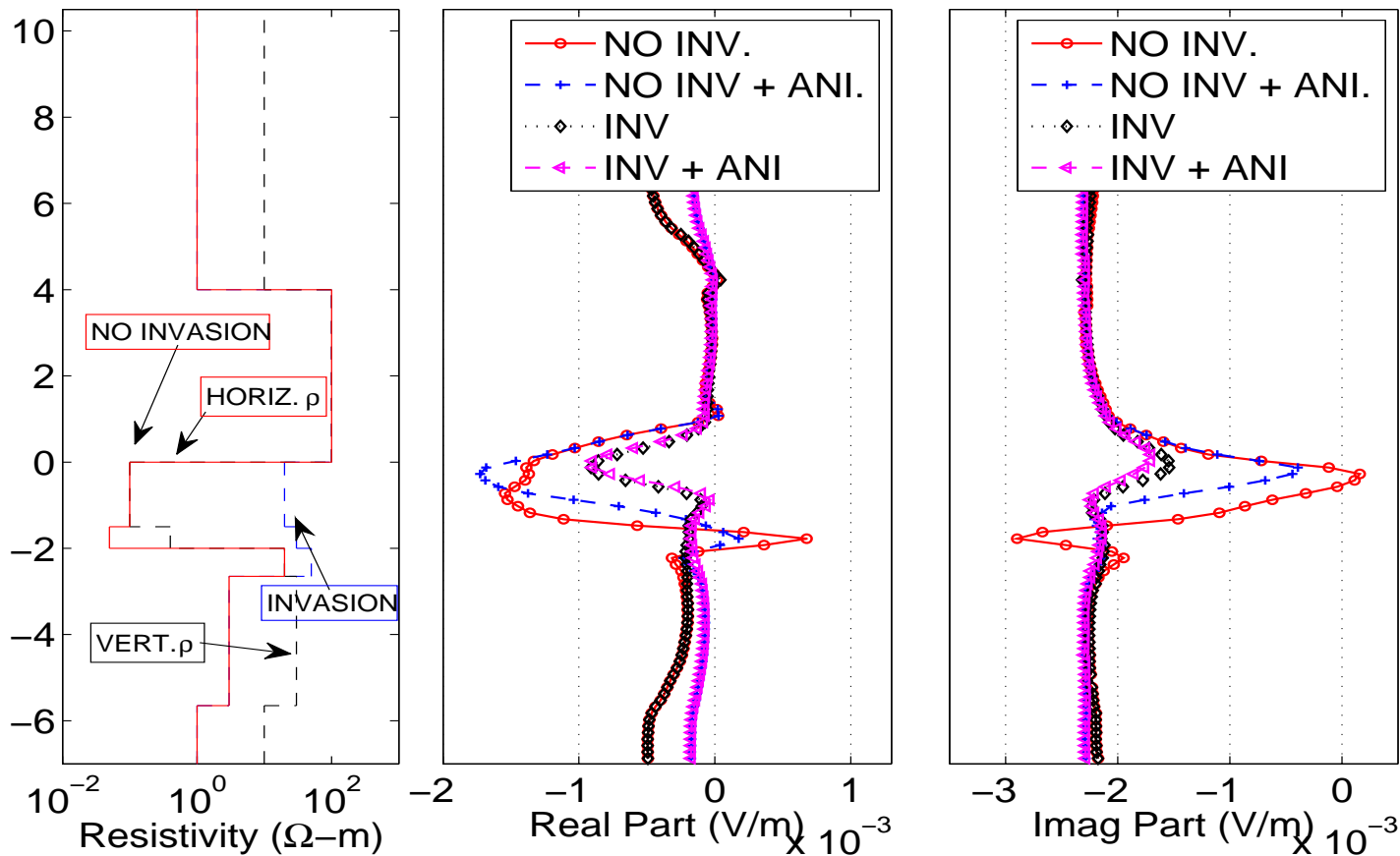
Wireline, 150 Khz



simulaciones electromagnéticas en 2.5D y 3D

Ángulo de Incidencia = 60 grados

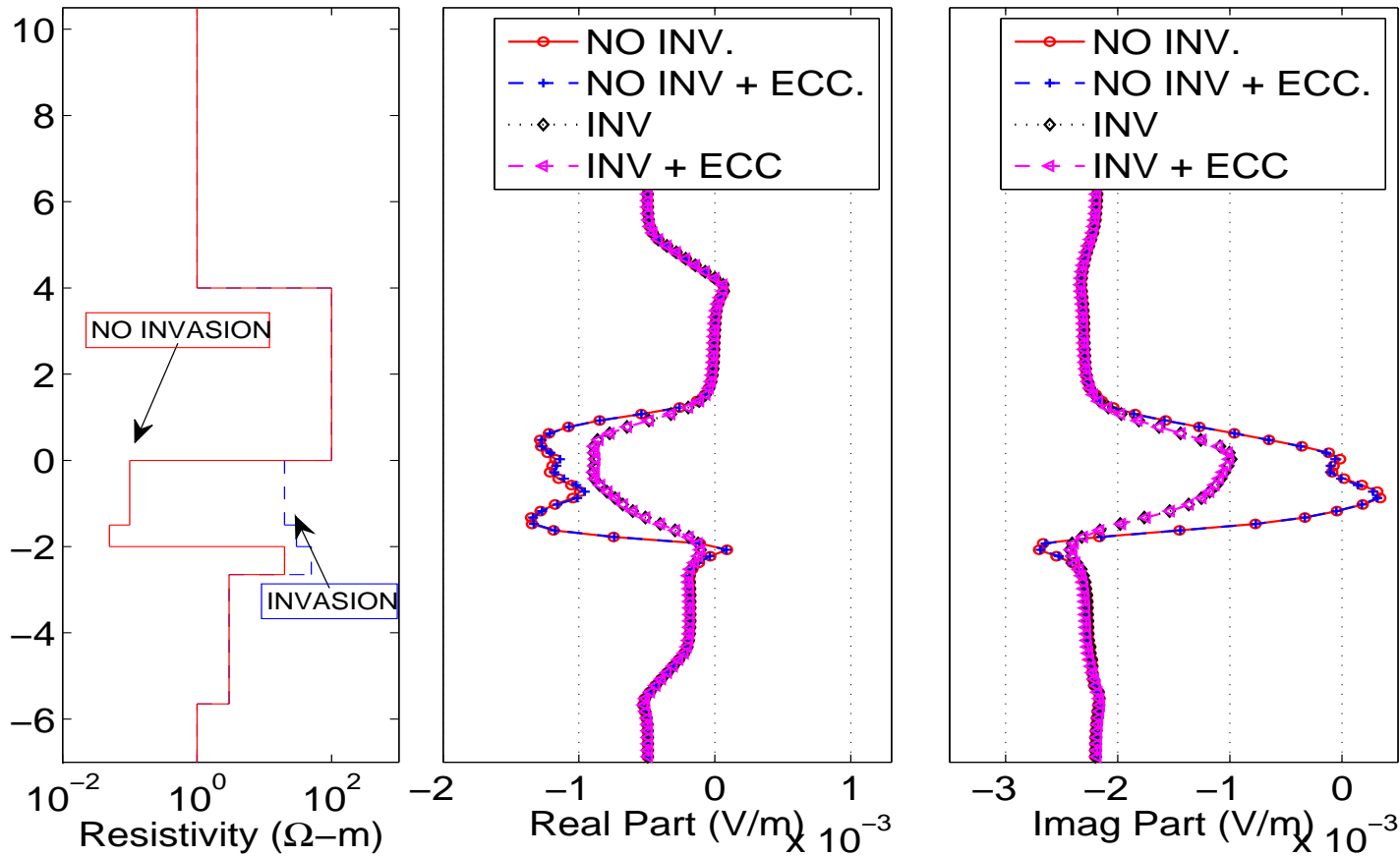
Wireline, 150 Khz



simulaciones electromagnéticas en 2.5D y 3D

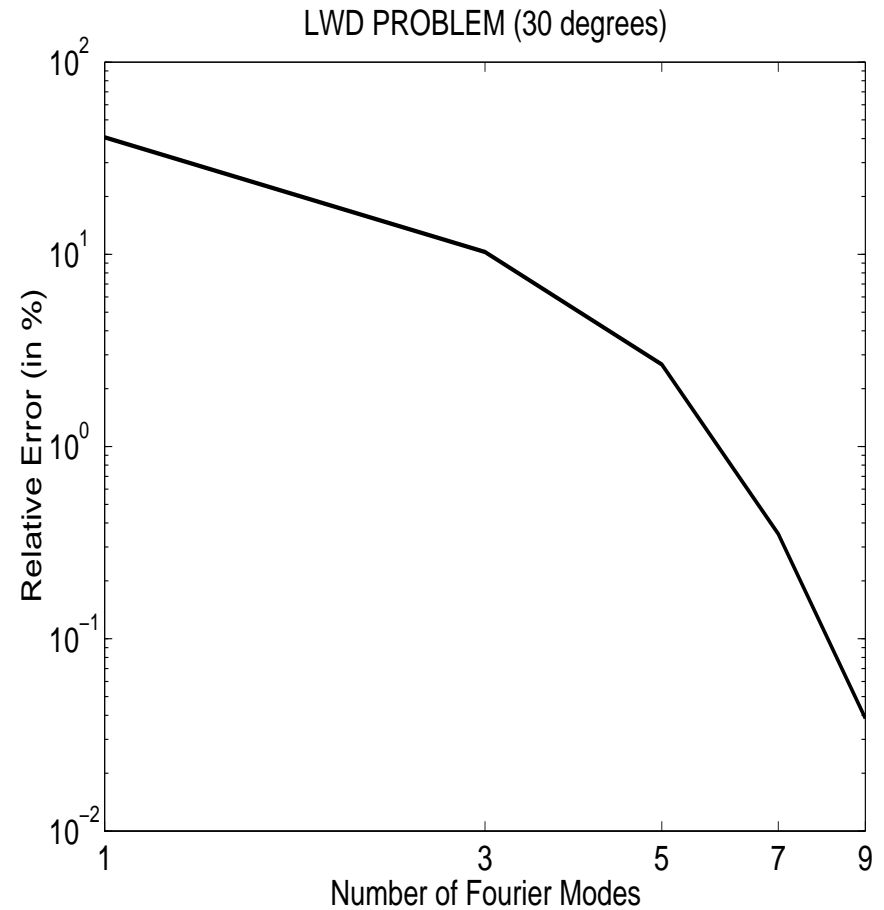
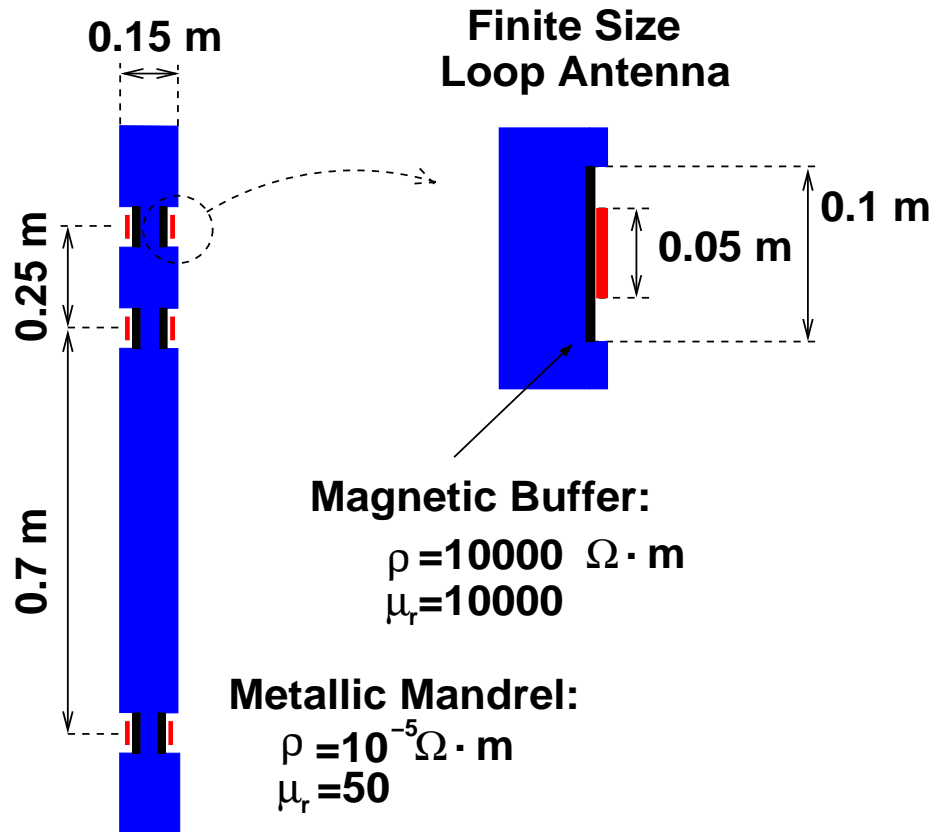
Pozo Vertical con la Herramienta Descentrada

Wireline, 150 Khz



simulaciones electromagnéticas en 2.5D y 3D

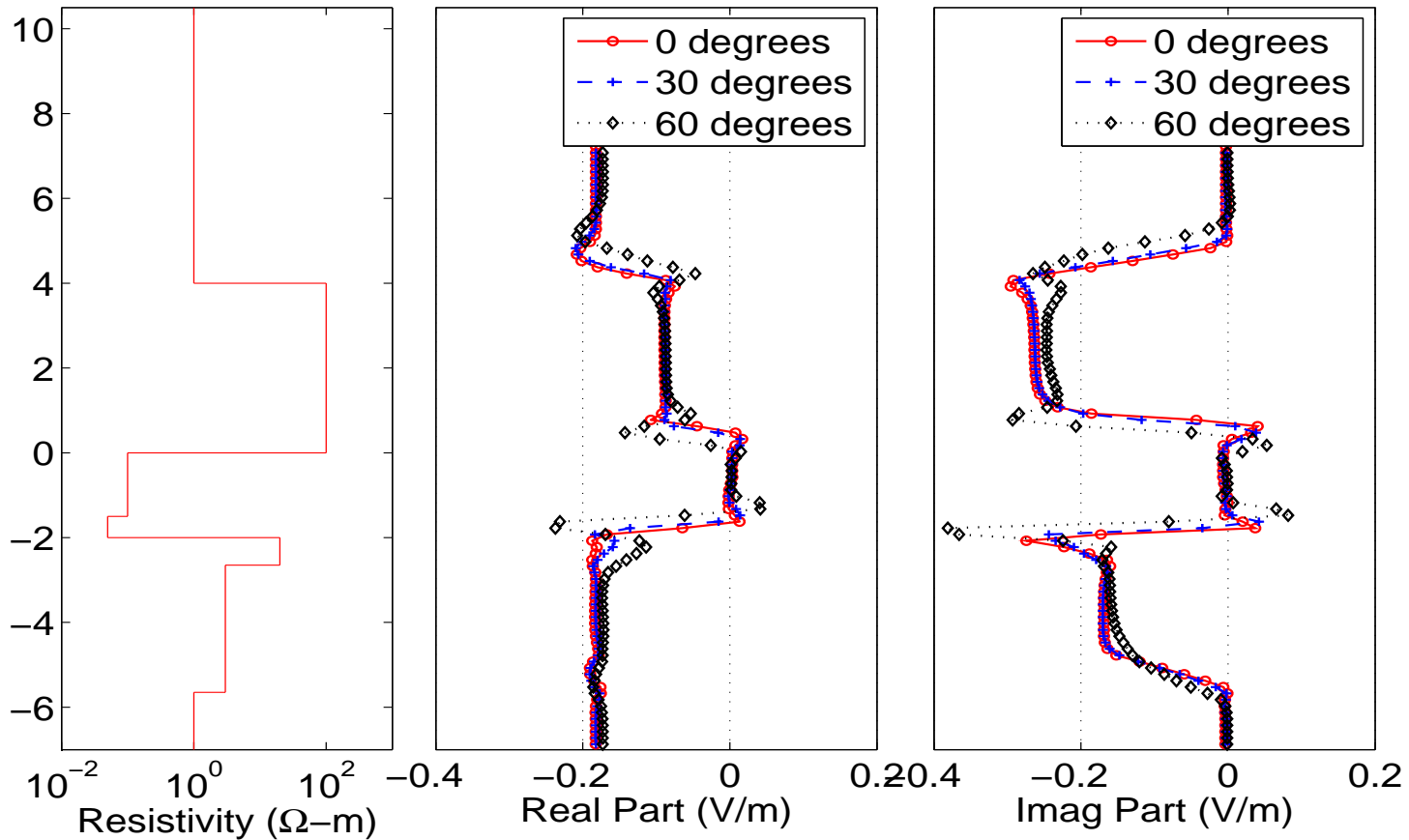
Verificación del Software



simulaciones electromagnéticas en 2.5D y 3D

Pozo Inclinado

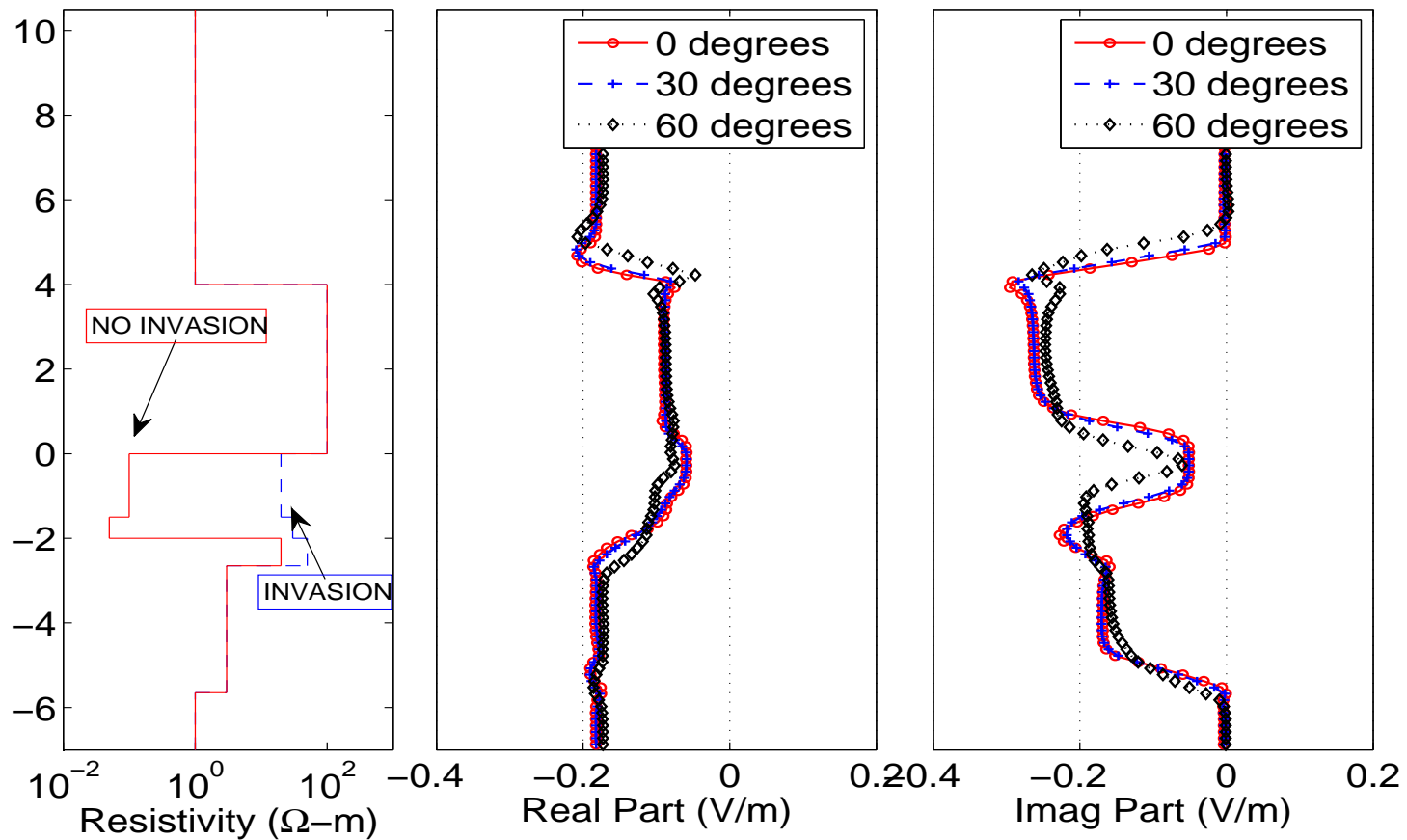
LWD, 2 Mhz



simulaciones electromagnéticas en 2.5D y 3D

Pozo Inclinado + Invasión

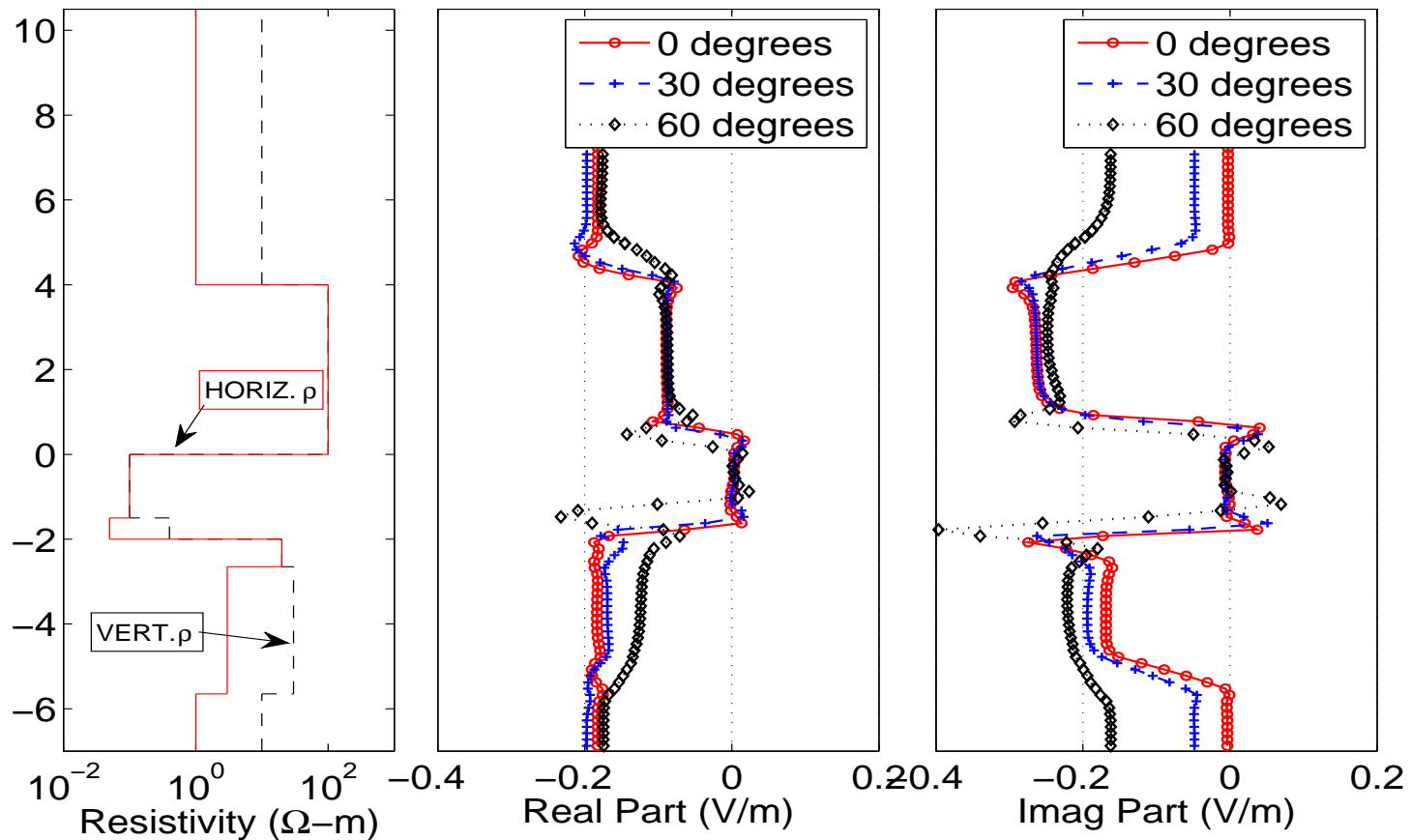
LWD, 2 Mhz



simulaciones electromagnéticas en 2.5D y 3D

Pozo Inclinado + Anisotropía

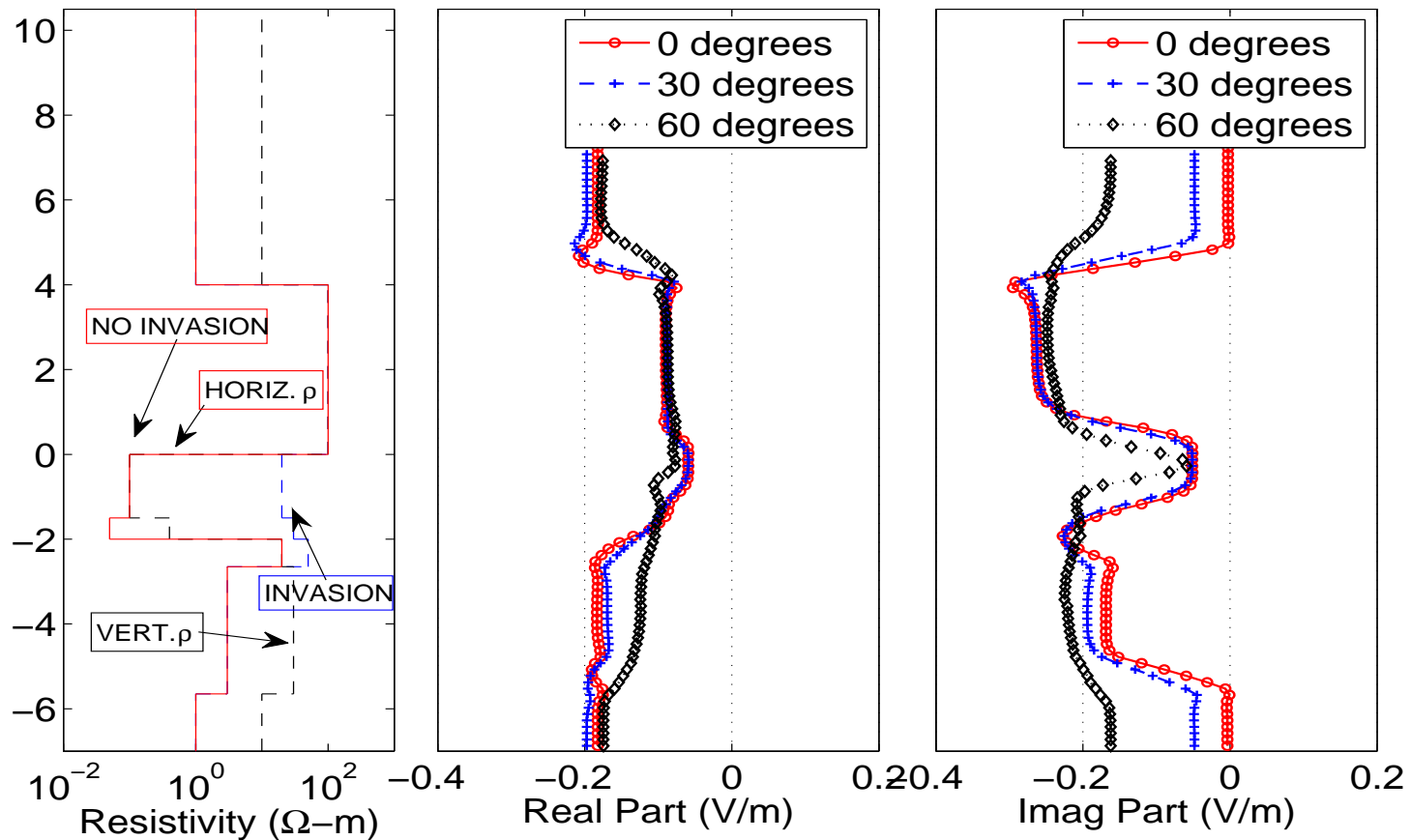
LWD, 2 Mhz



simulaciones electromagnéticas en 2.5D y 3D

Pozo Inclinado + Invasión + Anisotropía

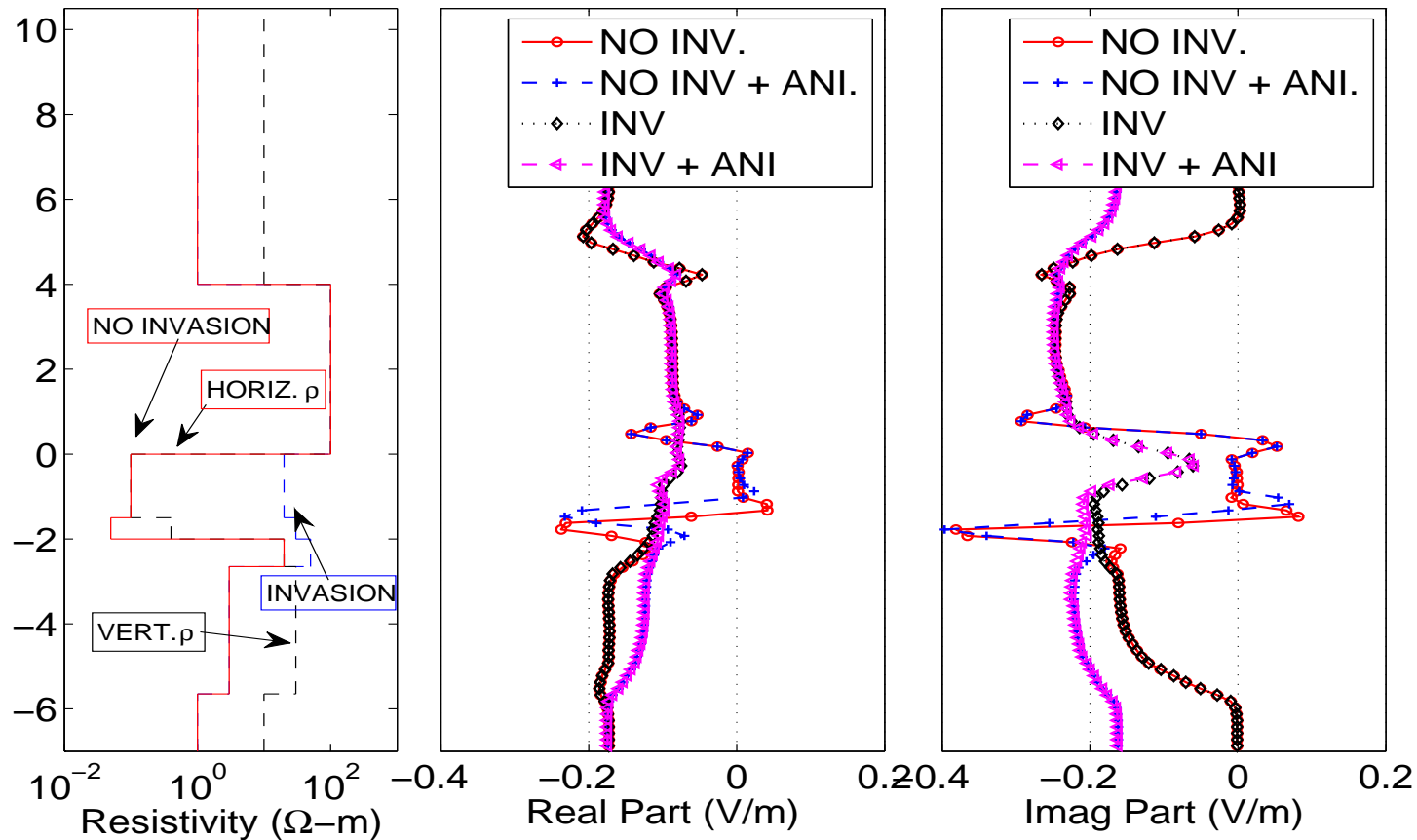
LWD, 2 Mhz



simulaciones electromagnéticas en 2.5D y 3D

Ángulo de Inclinación = 60 grados

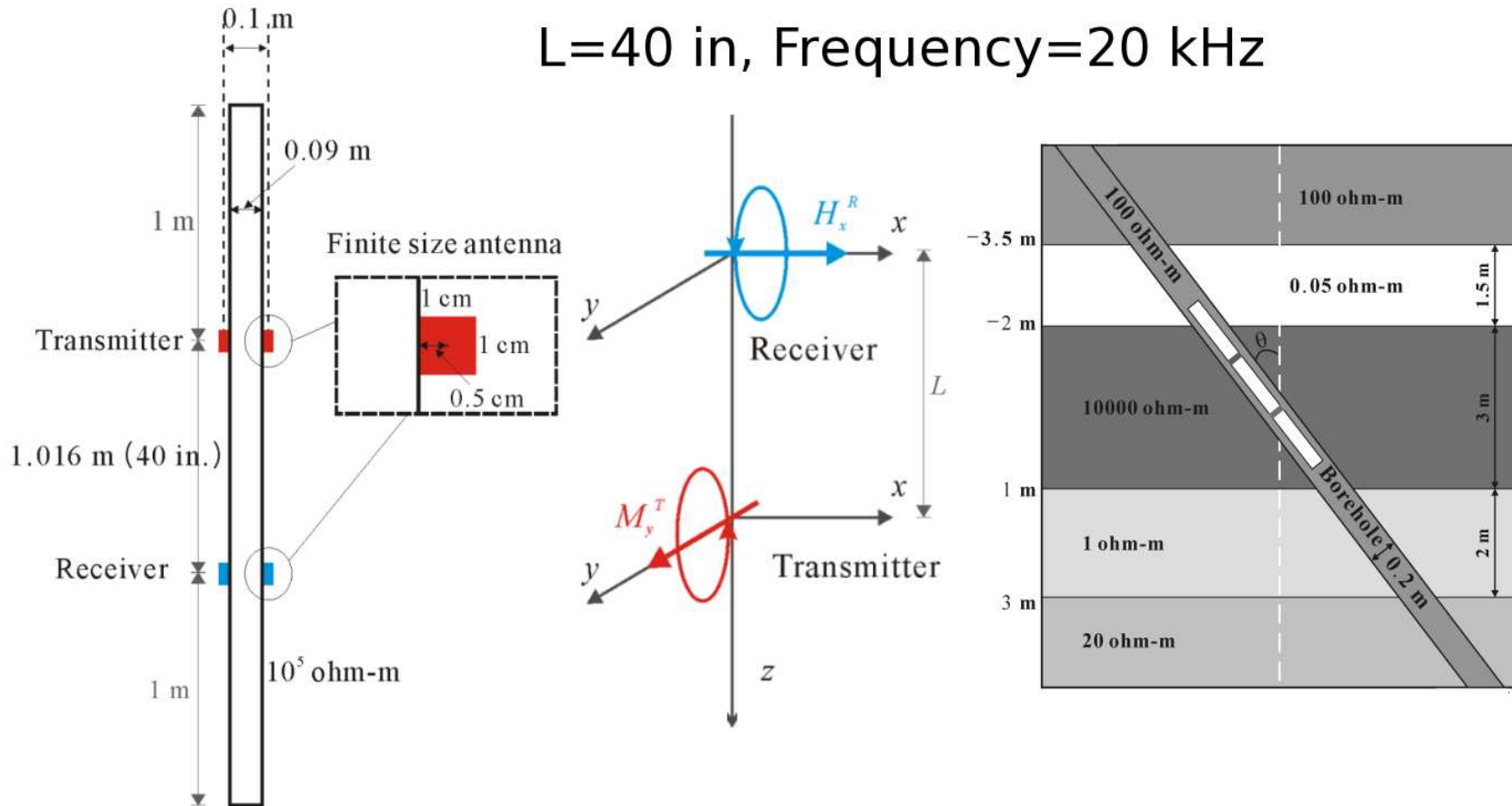
LWD, 2 Mhz



simulaciones electromagnéticas en 2.5D y 3D

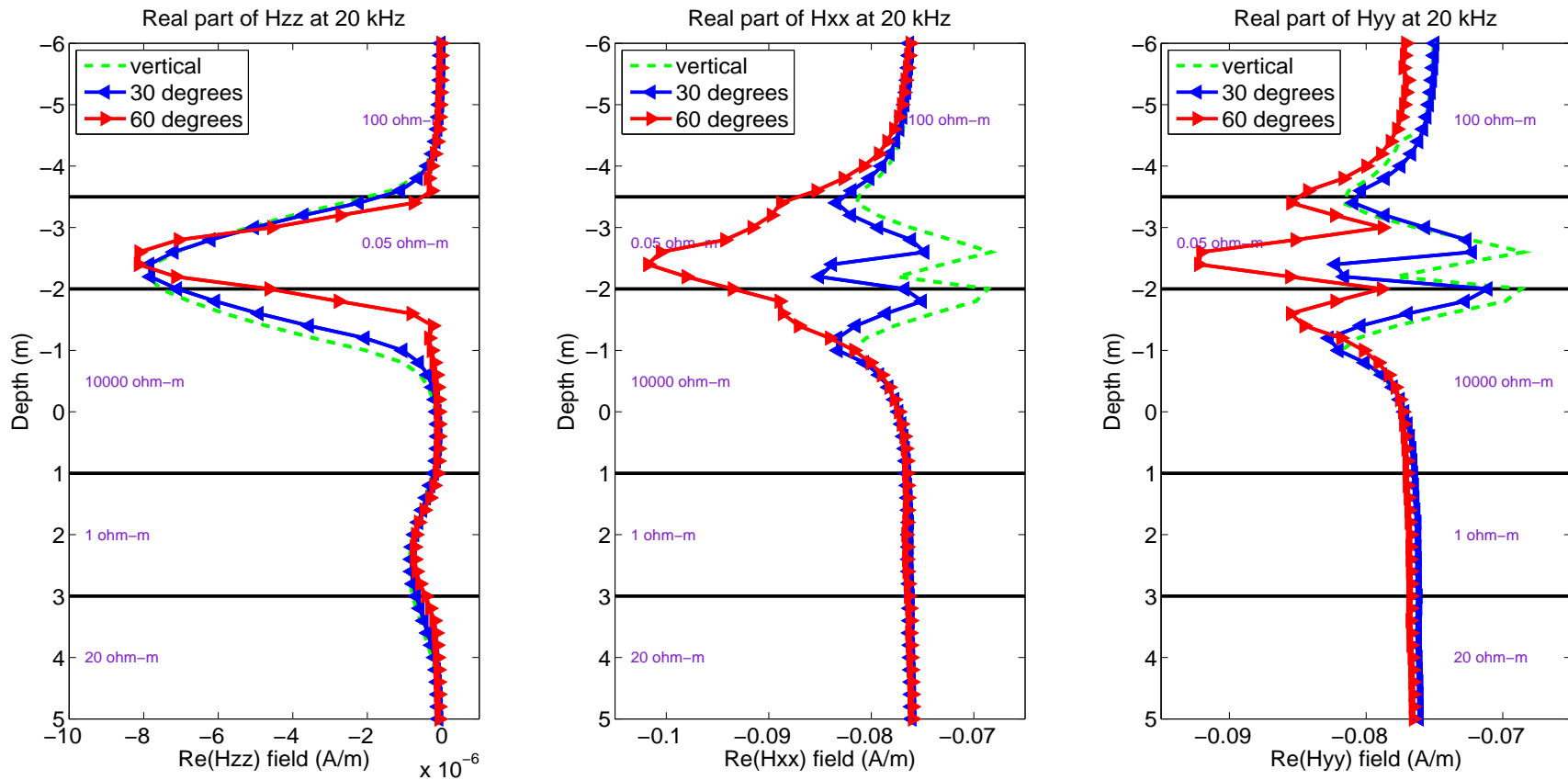
Herramienta Tri-axial de Inducción

$L=40$ in, Frequency=20 kHz



simulaciones electromagnéticas en 2.5D y 3D

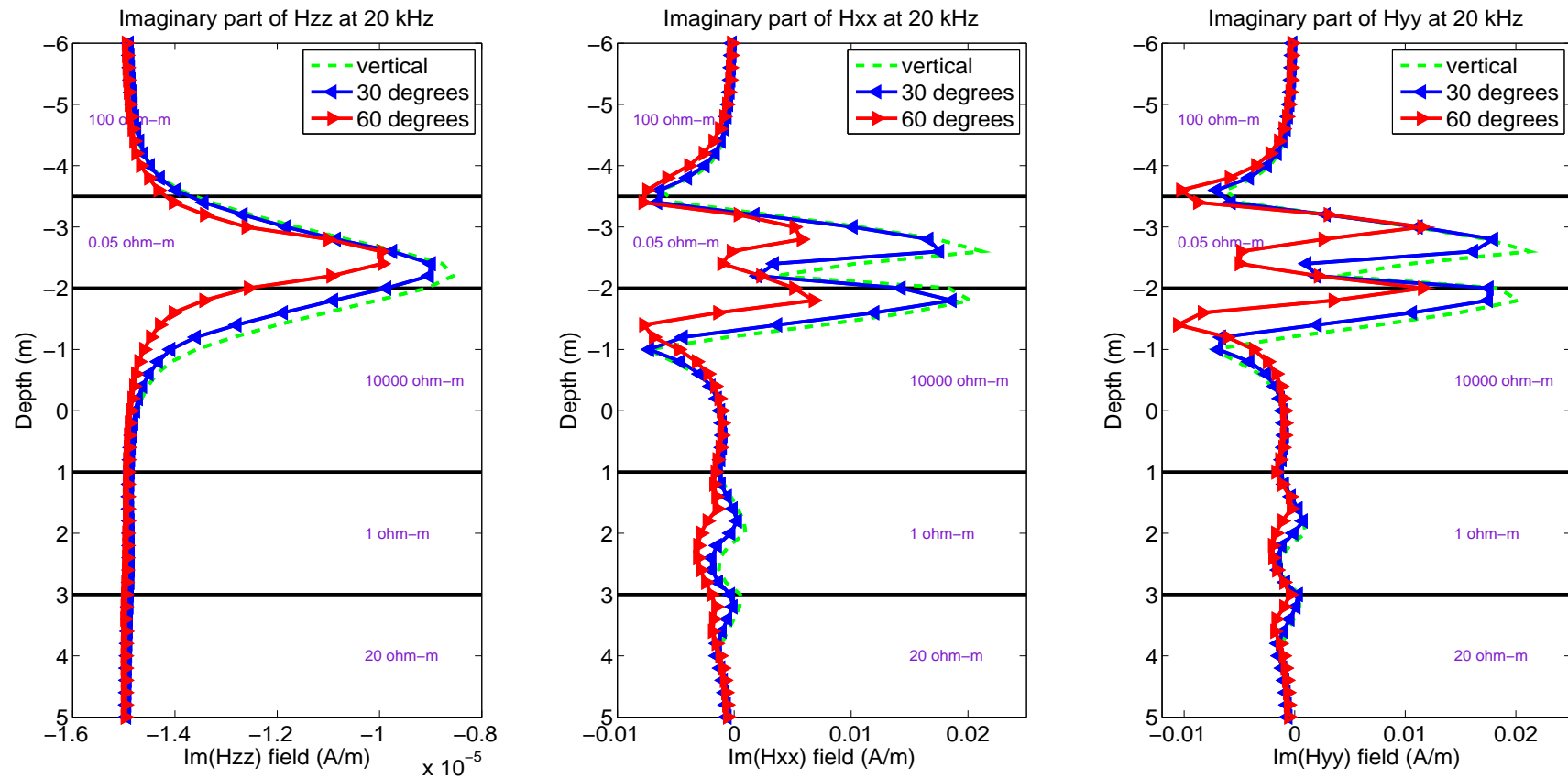
Herramienta Tri-axial de Inducción en Pozos No Verticales



Las herramientas tri-axiales son sensibles al ángulo de penetración

simulaciones electromagnéticas en 2.5D y 3D

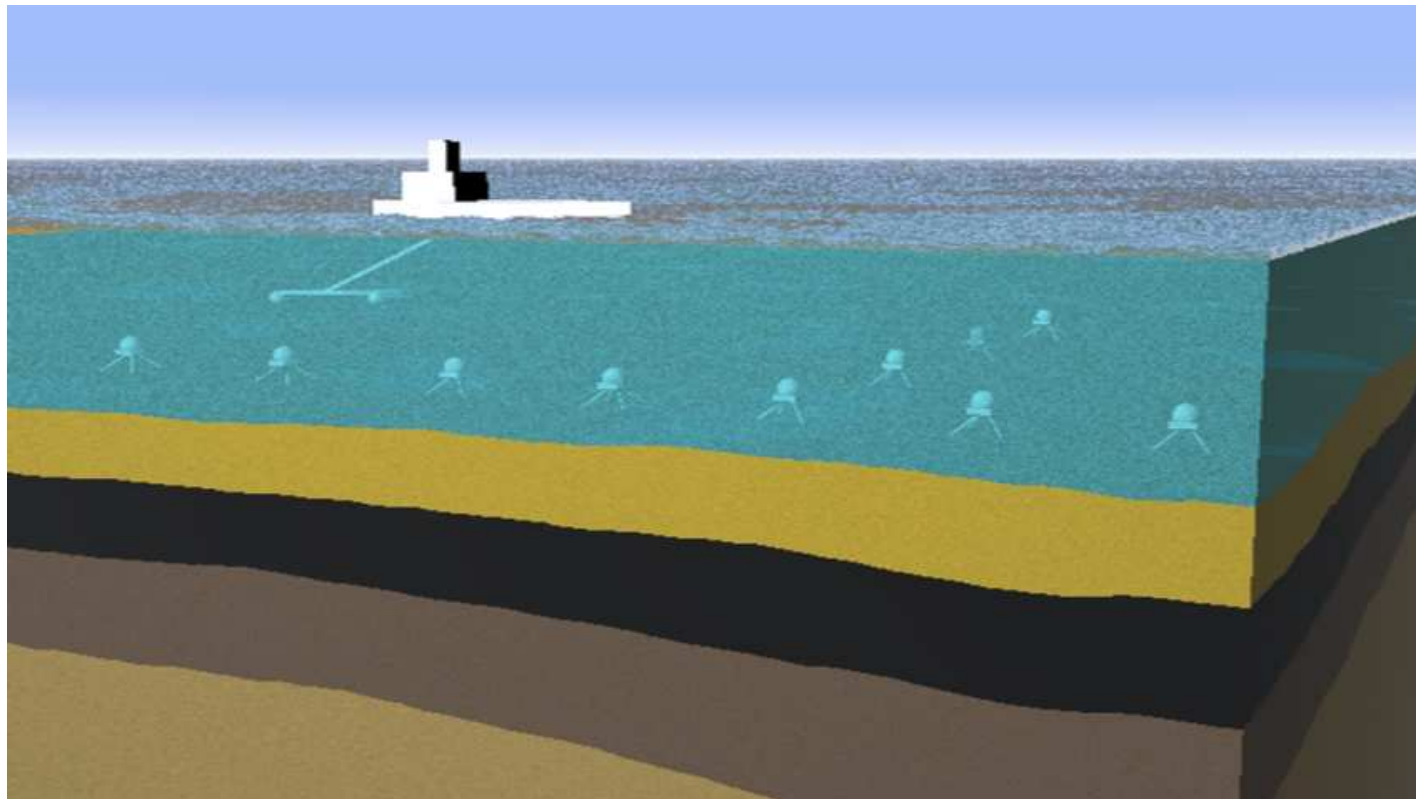
Herramienta Tri-axial de Inducción en Pozos No Verticales



Las herramientas tri-axiales son sensibles al ángulo de penetración

otras aplicaciones electromagnéticas

Mediciones Electromagnéticas desde el Fondo del Mar

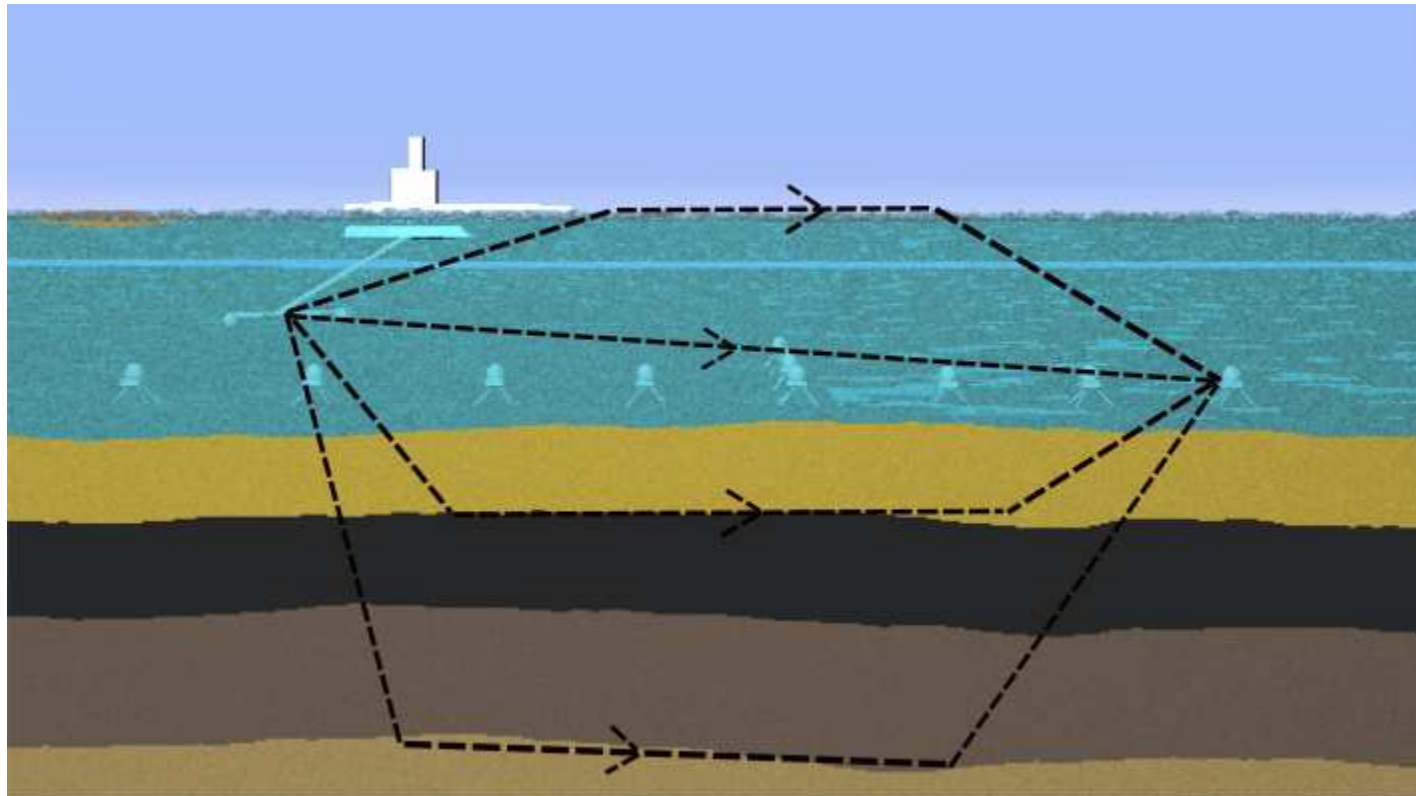


Sistema para Obetner Mediciones Electromagnéticas desde el Fondo del Mar



otras aplicaciones electromagnéticas

Mediciones Electromagnéticas desde el Fondo del Mar

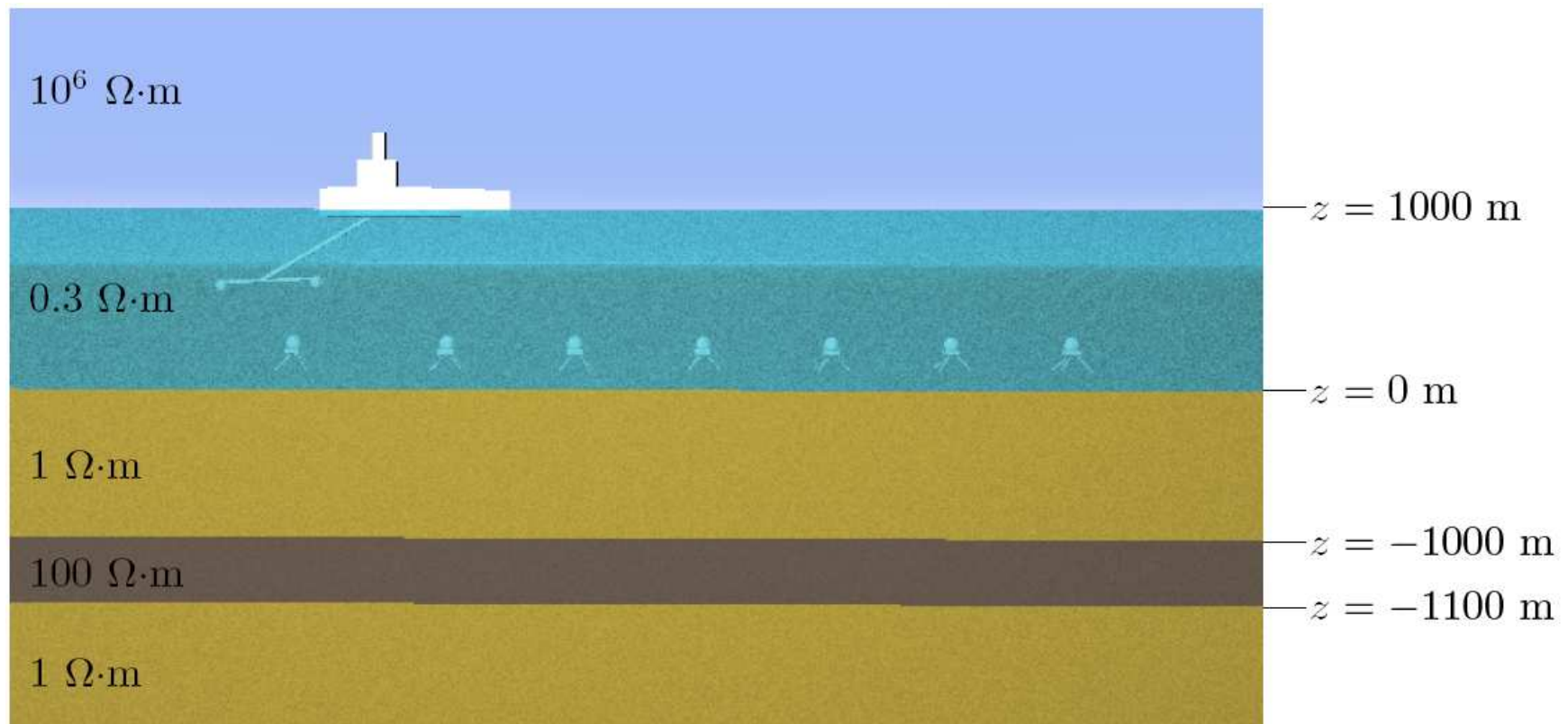


Ondas electromagnéticas viajando por el aire, mar y subsuelo.



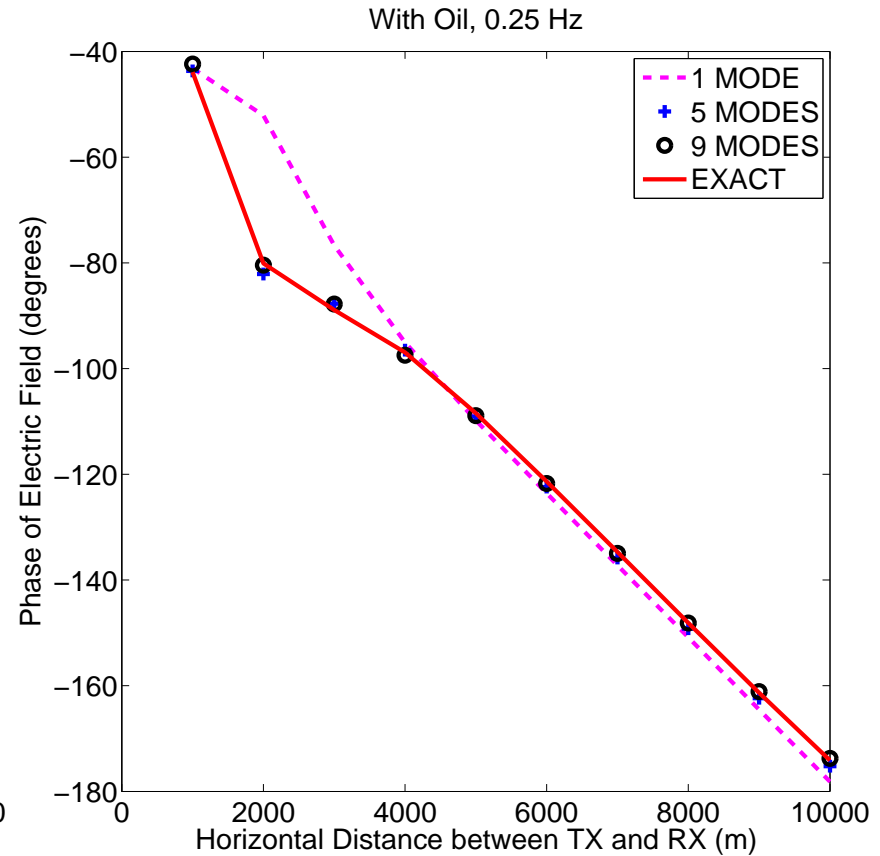
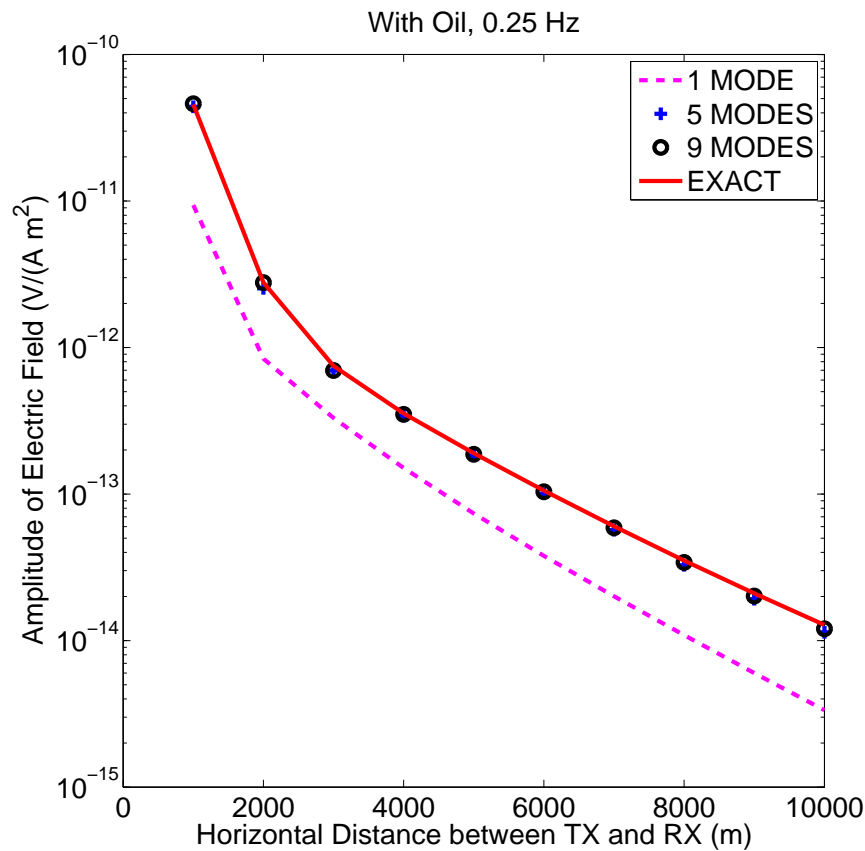
otras aplicaciones electromagnéticas

Problema Modelo I: Estrato Infinito que Contiene Petróleo



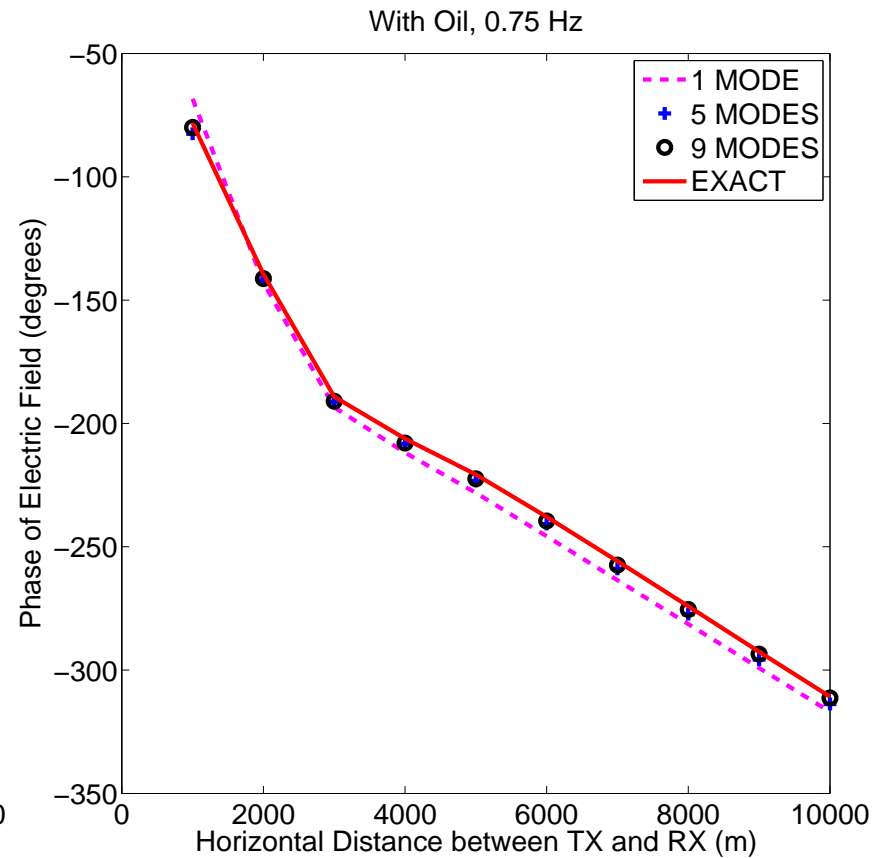
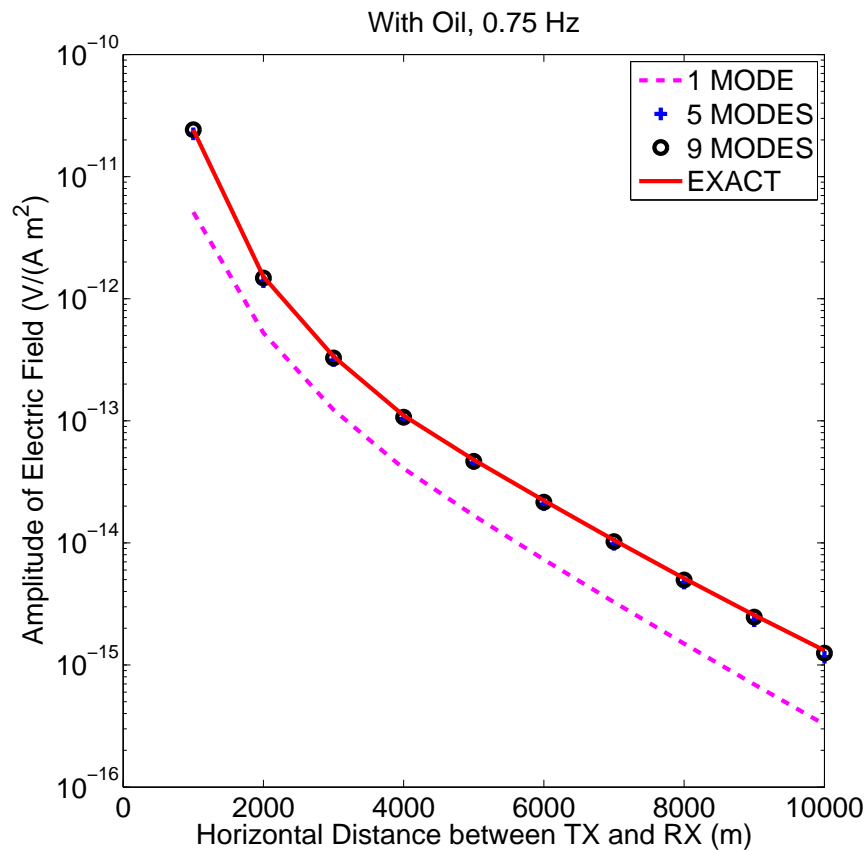
otras aplicaciones electromagnéticas

Problema Modelo I: ESTRATO INFINITO CON PETRÓLEO — 0.25 Hz —



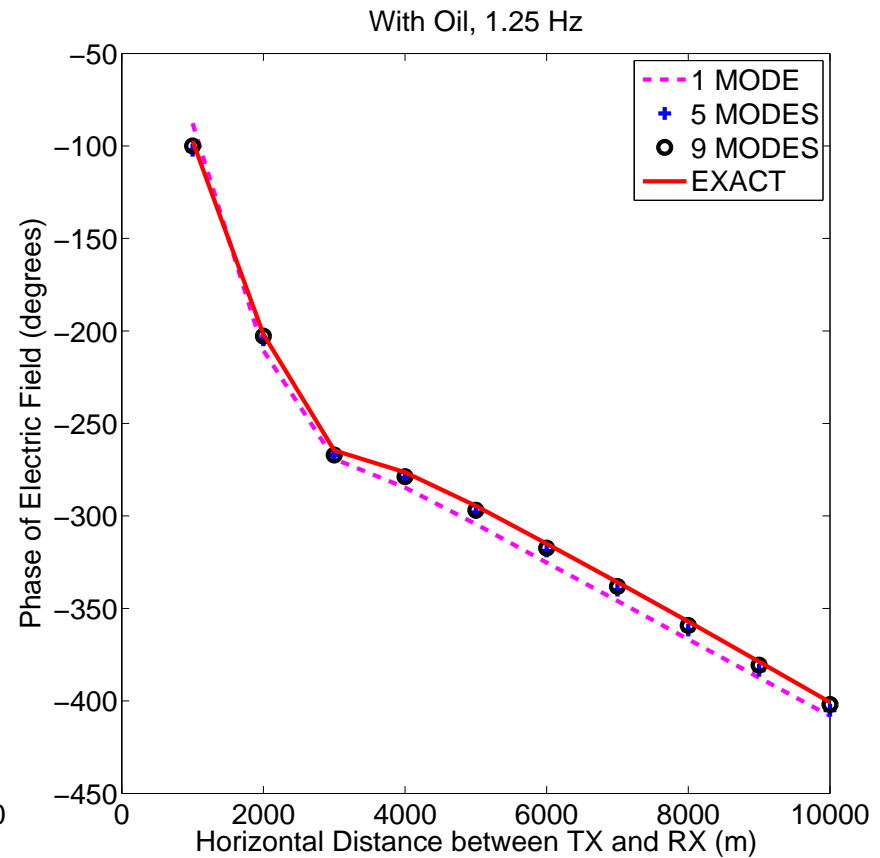
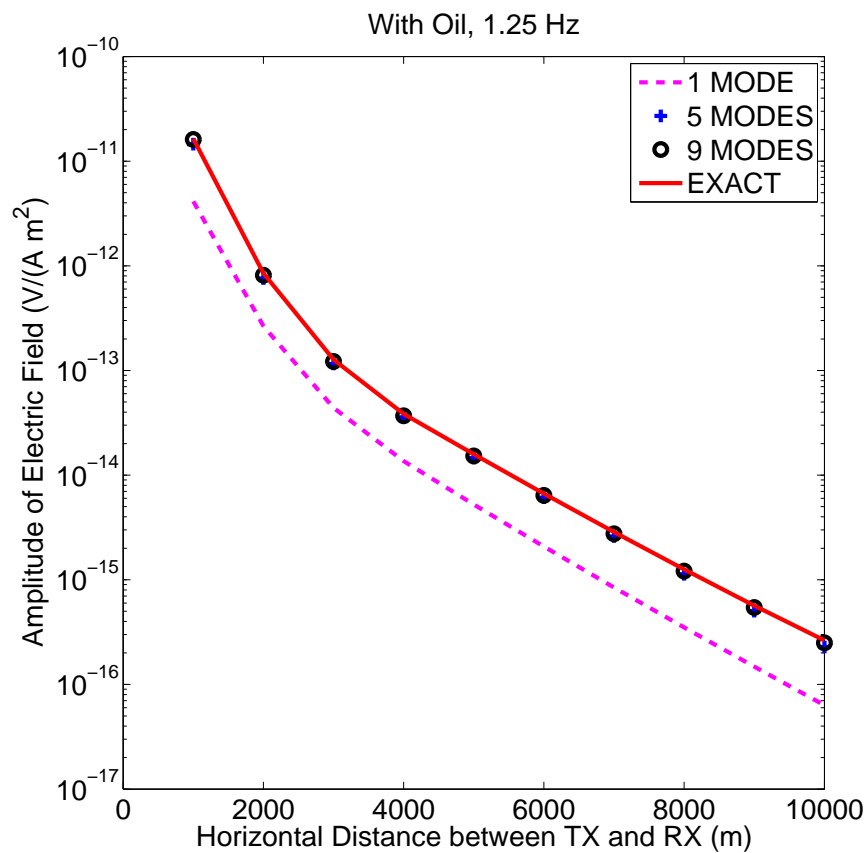
otras aplicaciones electromagnéticas

Problema Modelo I: ESTRATO INFINITO CON PETRÓLEO — 0.75 Hz —



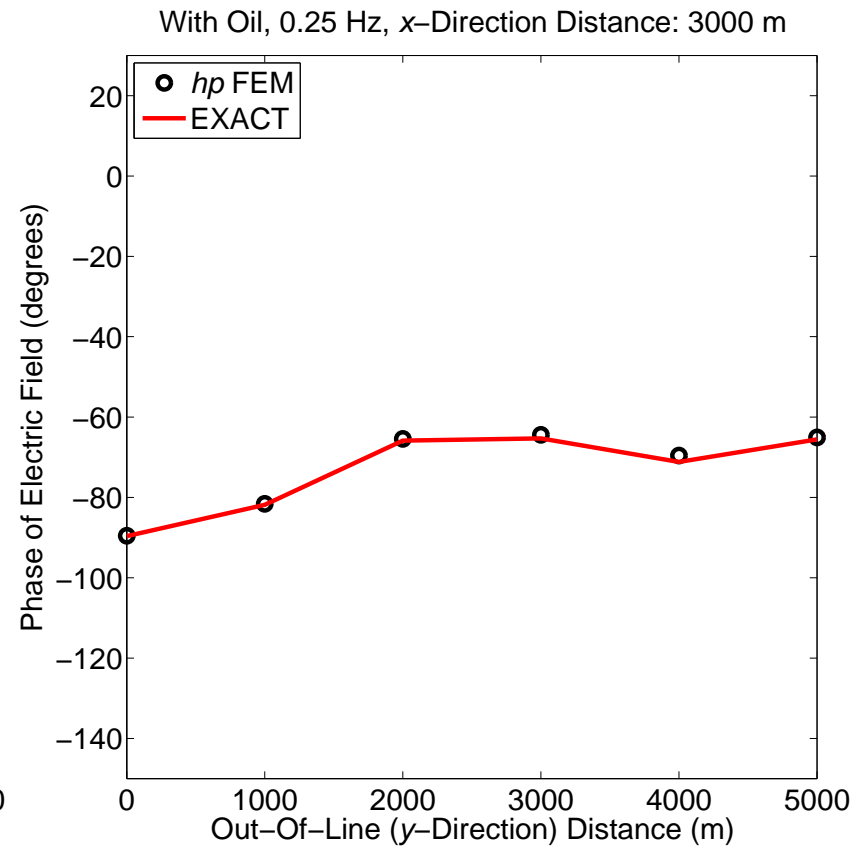
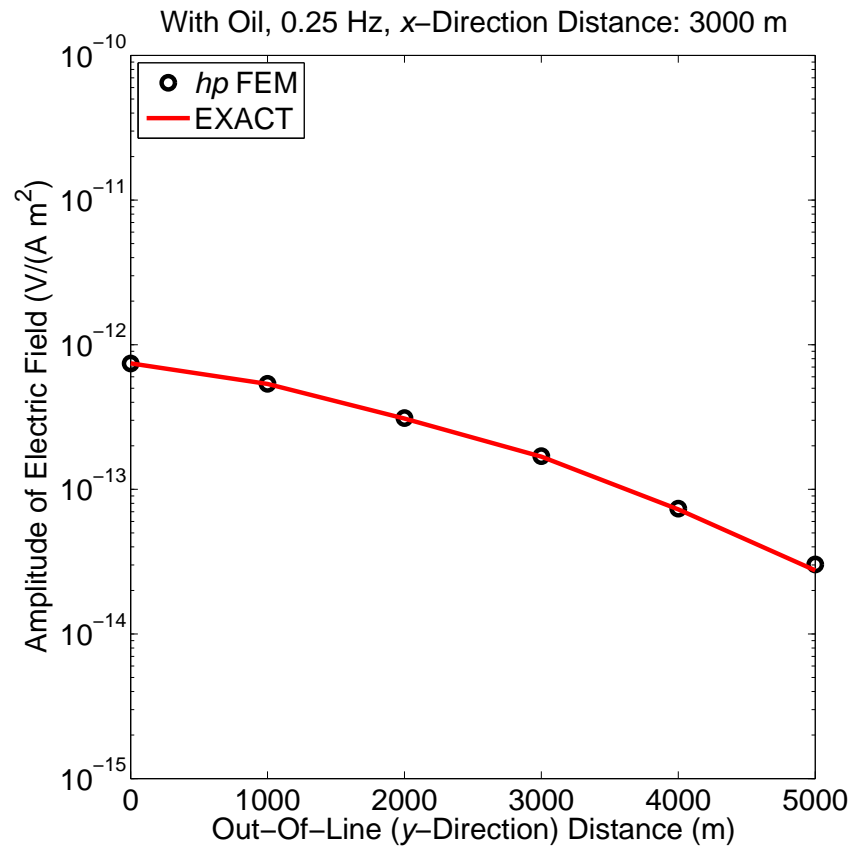
otras aplicaciones electromagnéticas

Problema Modelo I: ESTRATO INFINITO CON PETRÓLEO — 1.25 Hz —



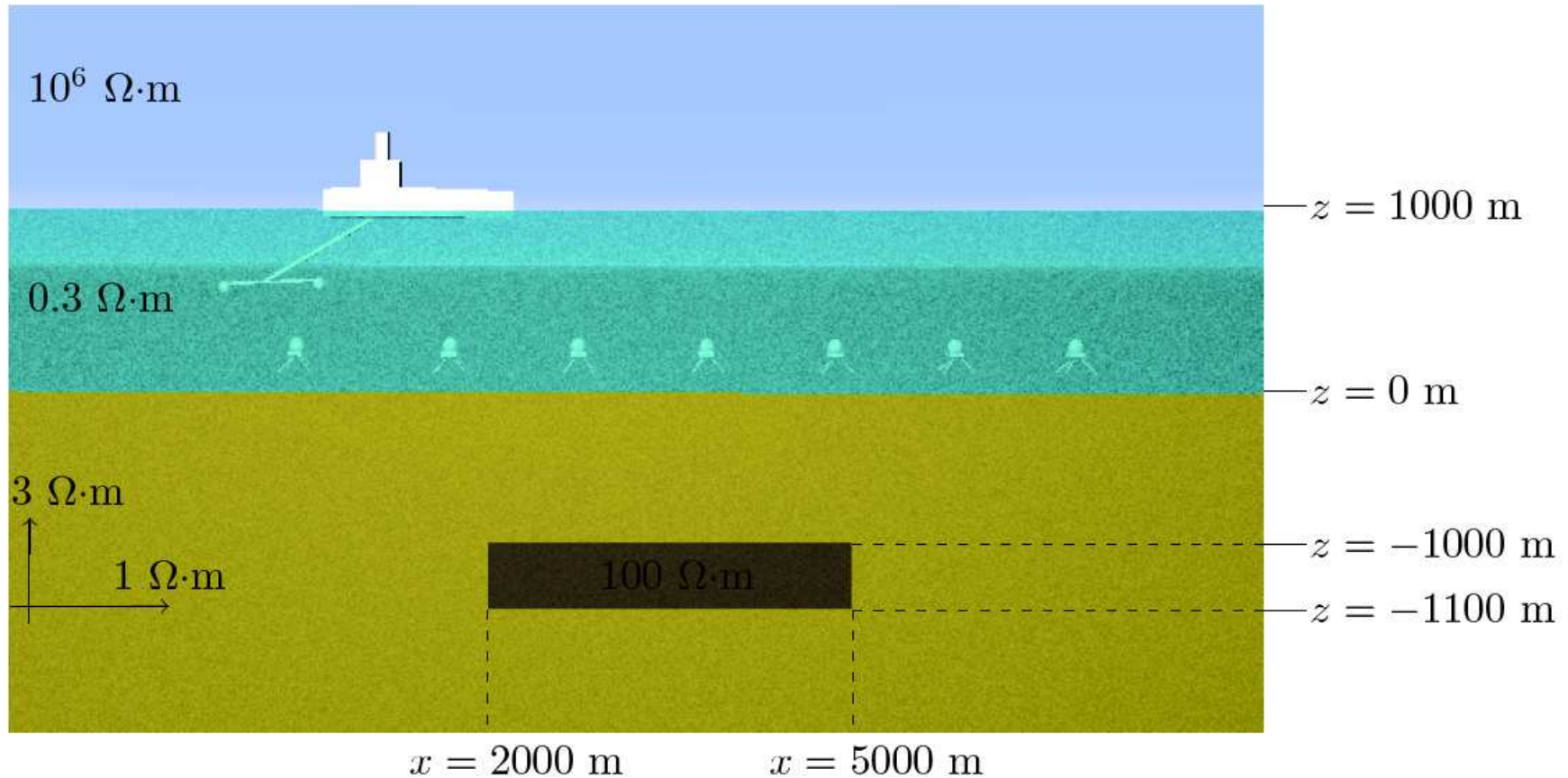
otras aplicaciones electromagnéticas

Problema Modelo I: ESTRATO INFINITO CON PETRÓLEO — Receptores fuera del plano —



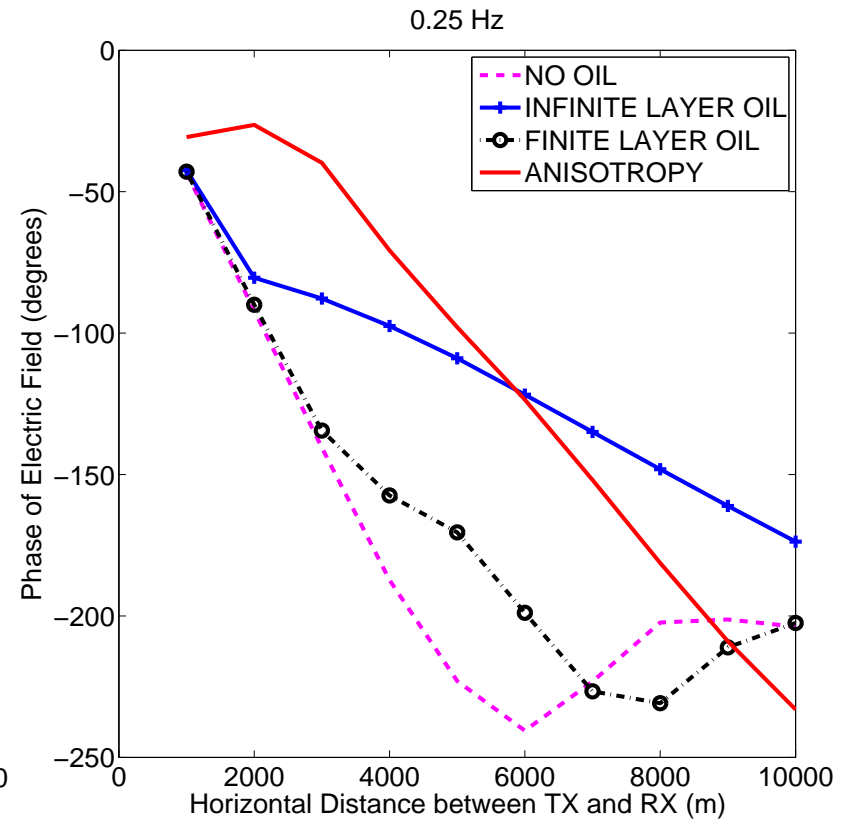
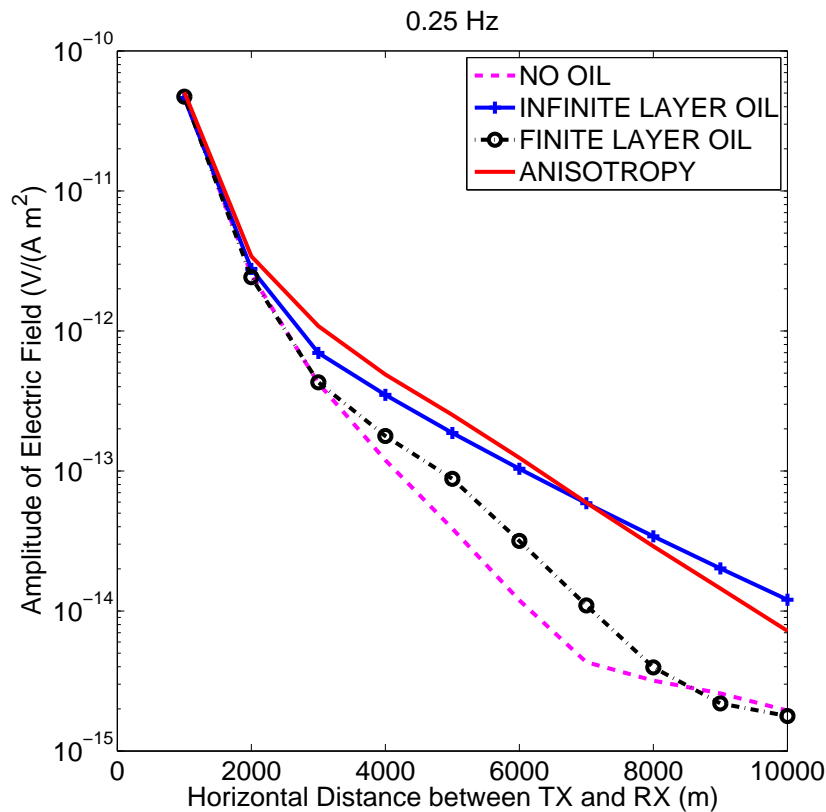
otras aplicaciones electromagnéticas

Problema Modelo II: Estrato Finito que Contiene Petróleo



otras aplicaciones electromagnéticas

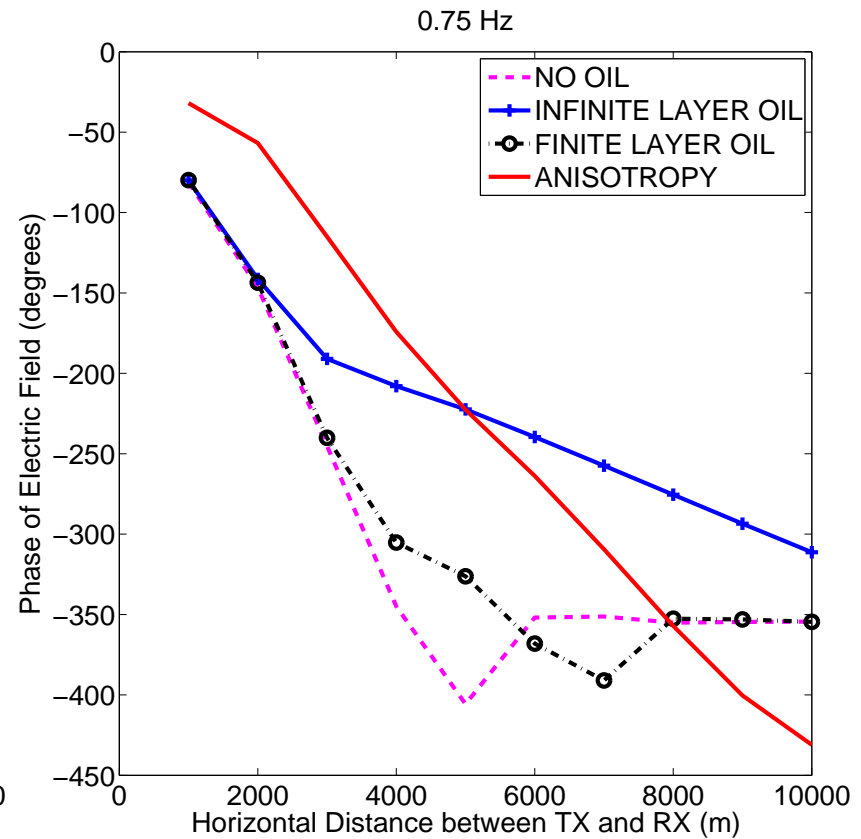
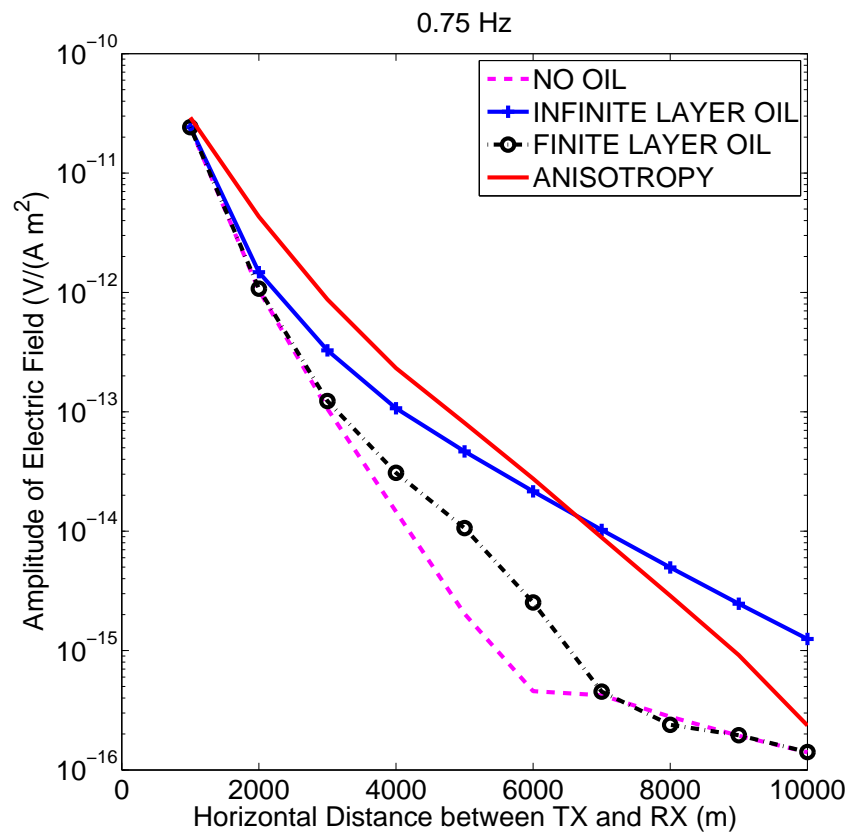
Resultados a 0.25 Hz



Se puede identificar claramente el estrato finito que contiene petróleo. Considerar anisotropía es esencial en estos problemas.

otras aplicaciones electromagnéticas

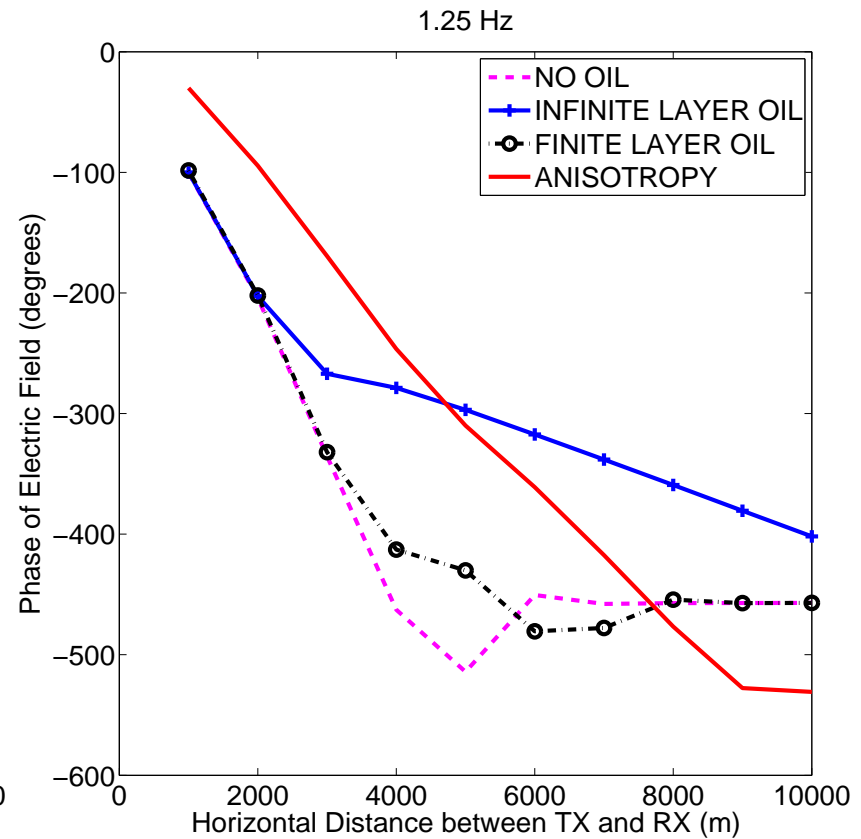
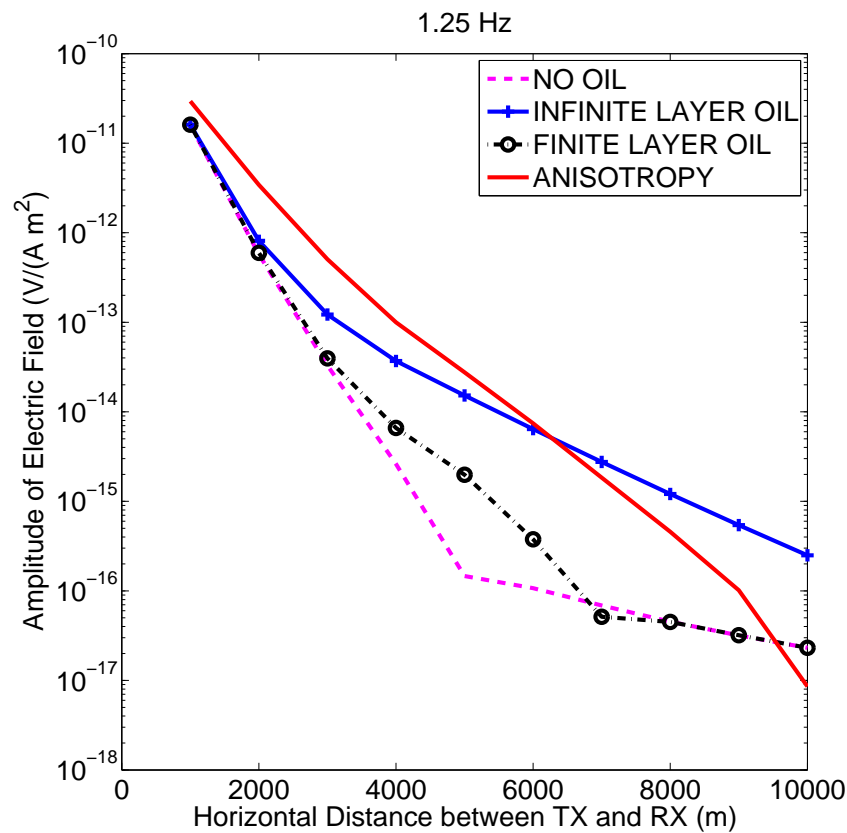
Resultados a 0.75 Hz



A medida que incrementamos la frecuencia, el efecto del estrato de petróleo se vuelve más local.

otras aplicaciones electromagnéticas

Resultados a 1.25 Hz



A medida que incrementamos la frecuencia, el efecto del estrato de petróleo se vuelve más local.

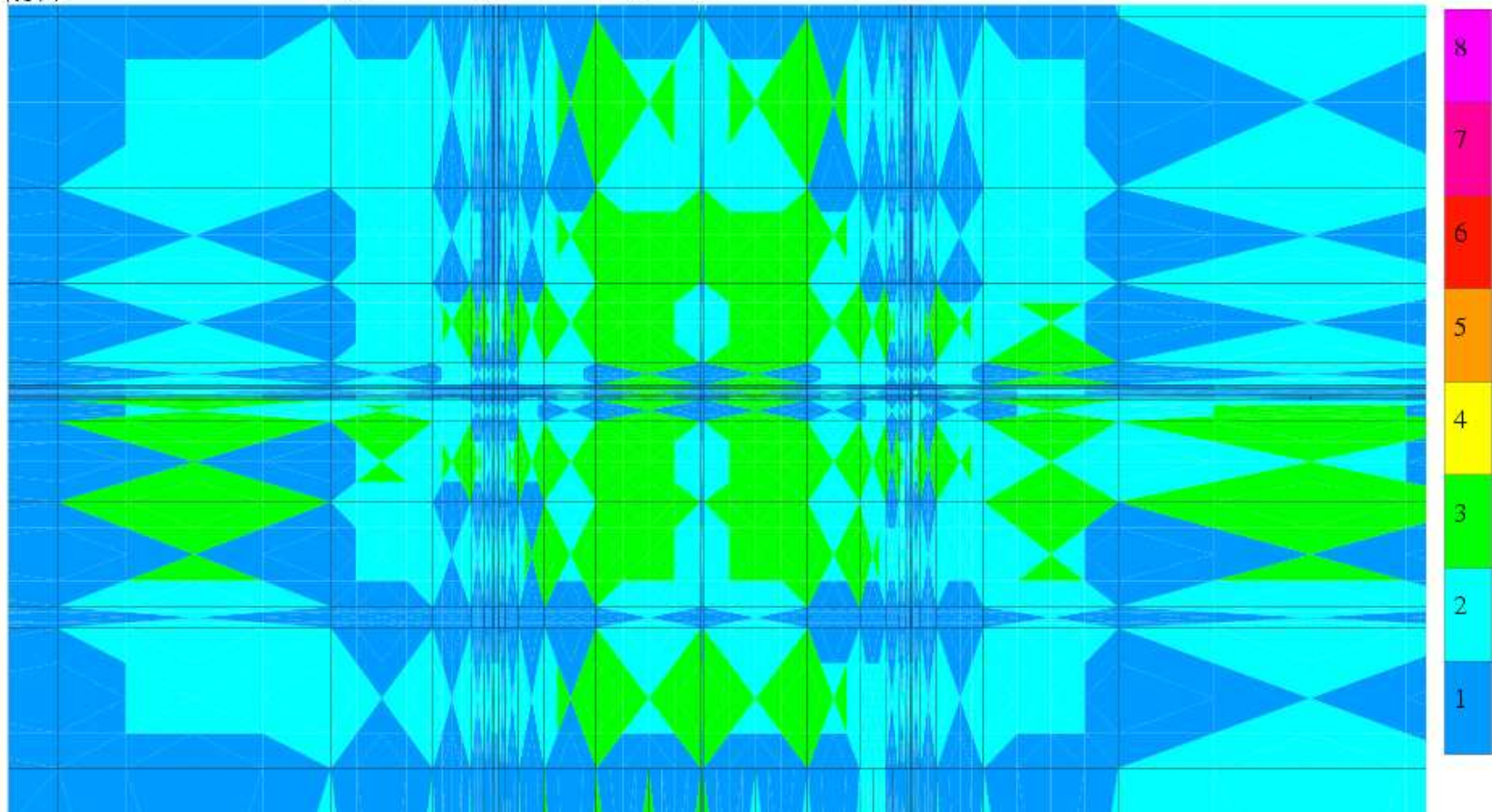
otras aplicaciones electromagnéticas

0.75 Hz (ESTRATO QUE CONTIENE PETRÓLEO ES FINITO)

TX: $x = 0$ m ; RX: $x = 2000$ m.

2Dhp90: A Fully automatic hp-adaptive Finite Element code

2074.074



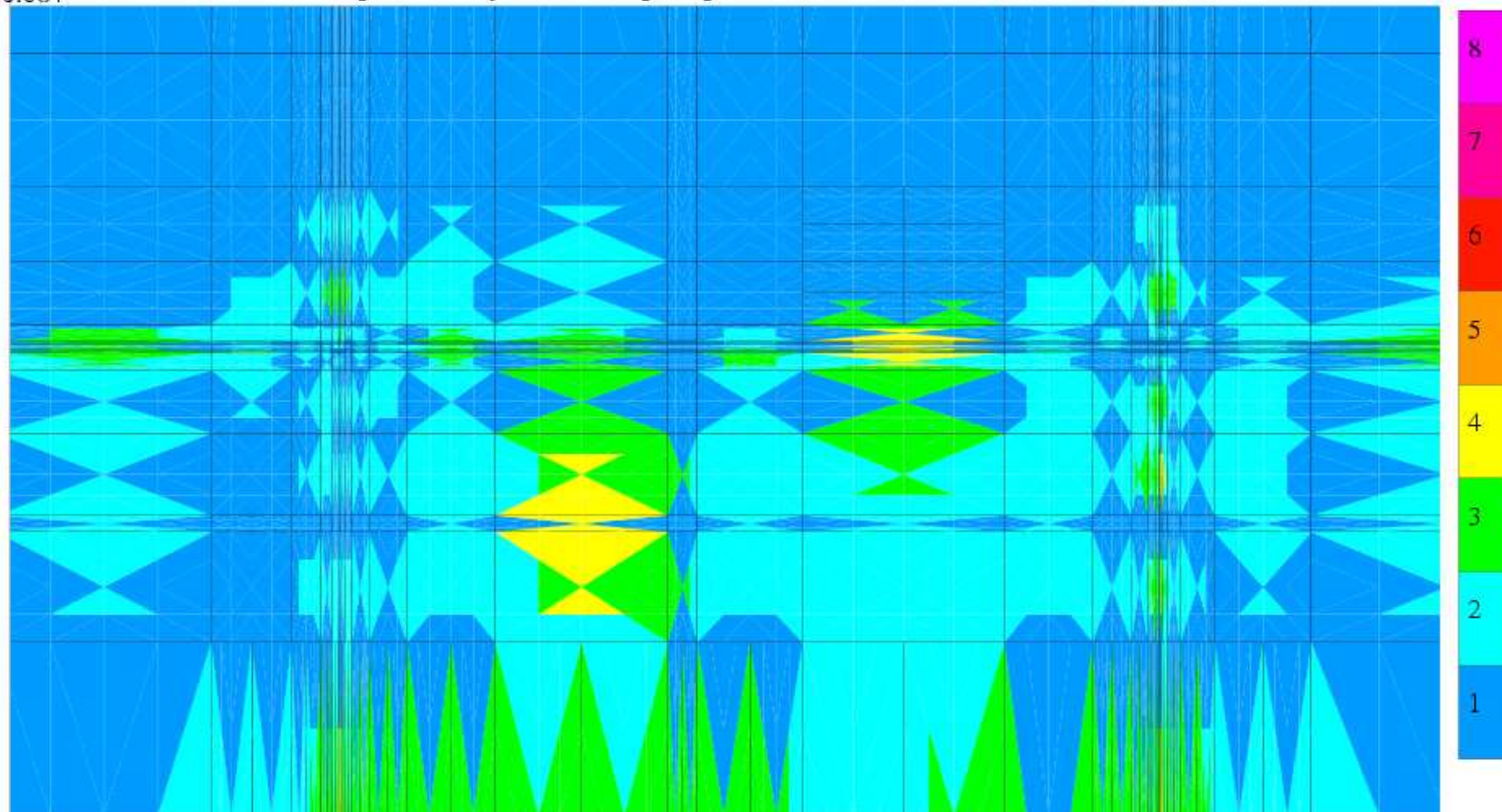
otras aplicaciones electromagnéticas

0.75 Hz (ESTRATO QUE CONTIENE PETRÓLEO ES FINITO)

TX: $x = 0$ m ; RX: $x = 5000$ m.

2Dhp90: A Fully automatic hp-adaptive Finite Element code

2360.684



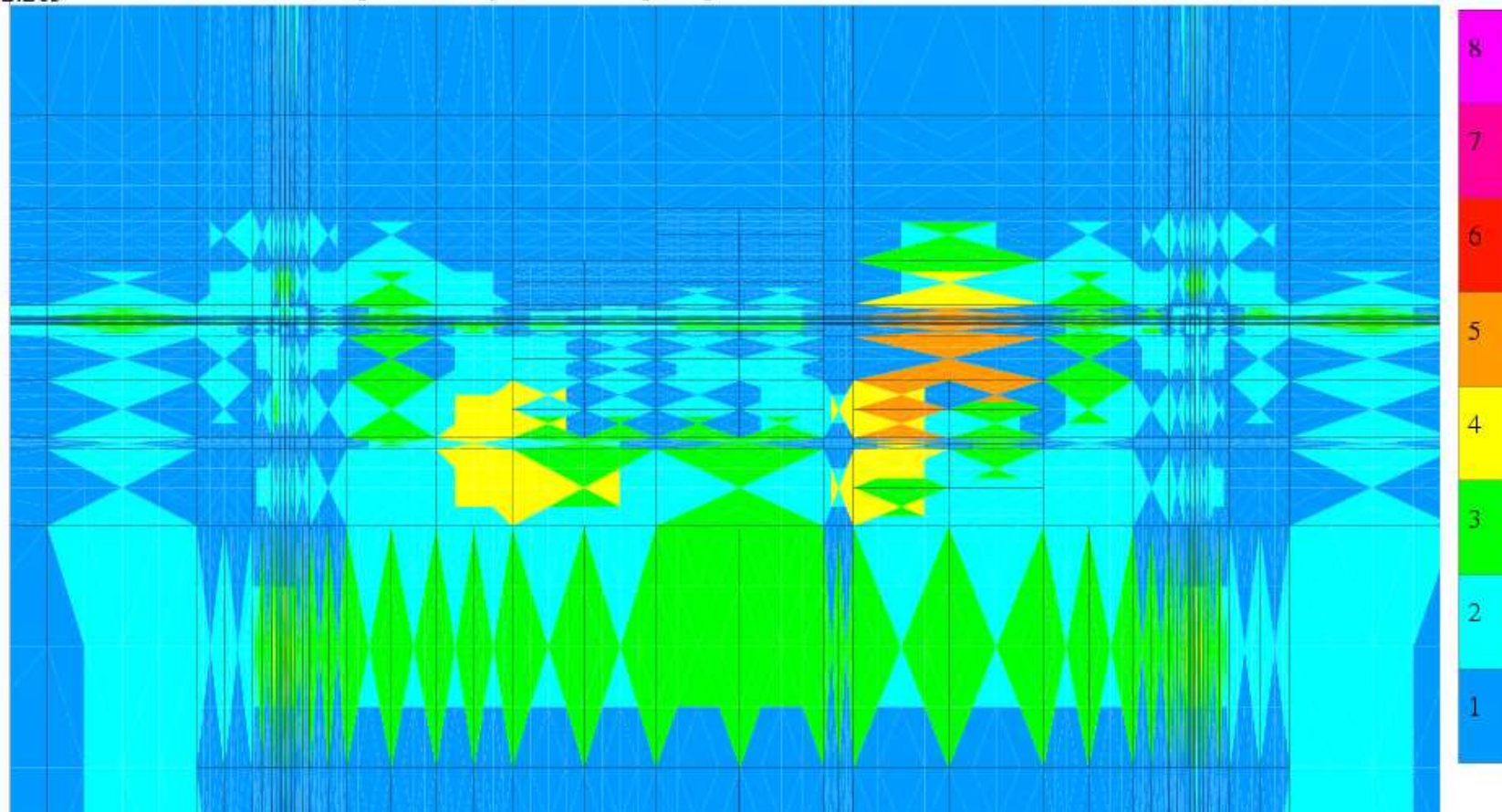
otras aplicaciones electromagnéticas

0.75 Hz (ESTRATO QUE CONTIENE PETRÓLEO ES FINITO)

TX: $x = 0$ m ; RX: $x = 8000$ m.

2Dhp90: A Fully automatic hp-adaptive Finite Element code

3152.263



conclusiones

- Hemos descrito métodos numéricos para la eficiente simulación de una gran variedad de herramientas de prospección petrolífera basadas en el electromagnetismo.
- Nuestros métodos numéricos incluyen una estrategia de refinamientos automáticos orientados a un objetivo en hp y un método de Fourier-Elementos Finitos.
- Hay una gran variedad de aplicaciones en la industria del petróleo que necesitan de métodos numéricos avanzados y un desarrollo matemático que permita obtener y garantizar resultados correctos de simulación.
- **Necesitamos estudiantes, postdocs, y colaboradores a todos los niveles para resolver estos y otros problemas aplicados a la industria.**



equipo de trabajo y colaboradores

I. Garay



Problemas acústico-elásticos.

*Postdoctoral Fellow
(Desde Mar 09)*

A.G. Saint-Guirons



Algoritmos de inversión.

*Postdoctoral Fellow
(Desde Sep 09)*

A. Galdrán



Adaptatividad.

*Ph.D. Student
(Desde Sep 09)*

J. Álvarez



Algoritmos de reducción de dimensión.

*Ph.D. Student
(Desde Sep 09)*



equipo de **trabajo** y **colaboradores**

I. Andonegui



Visualización.

*Technician (Engineer)
(Desde May 09)*

M.J. Nam



Herramientas Electromagnéticas.

Colaborador

M. Paszynski



Paralelización de software.

Colaborador

F. de la Hoz



Métodos iterativos eficaces.

Colaborador



equipo de **t**rabajo y **c**olaboradores

L.E. García-Castillo



Colaborador

Simulaciones Electromagnéticas.

C. Torres-Verdín



Colaborador

Contactos con la industria del petróleo.

I. Gómez



Colaborador

Simulaciones tridimensionales.

