

## **5. ANÁLISIS Y RESULTADOS**

Para la interpretación se utilizaron los modelos de inversión obtenidos con los archivos en formato .URF (Universal Resistivity) que fueron creados por ser datos adquiridos con un equipo diferente a AGI-Instruments (ver capítulo 4).

### **5.1 Comparación de los arreglos electródicos**

Se hace una comparación entre los arreglos WW, WS y DD de acuerdo a las características teóricas (Capítulo 2) y conforme a los modelos de inversión obtenidos se elige el más adecuado para realizar la interpretación, que es el que proporcione mayor información y sea coherente con el objetivo planteado y la geología del lugar.

En la Figura 5.1 se tiene a el Perfil 1A, que se tomó como ejemplo para esta comparación; se observa en el lado izquierdo el diagrama de adquisición de datos para cada arreglo y en el derecho el modelo de inversión correspondiente.

La corta longitud de este perfil no permite alcanzar la profundidad promedio deseada, es decir al colector de drenaje poniente, sin embargo en el pre-procesado de los datos en campo se detectó una zona de alta resistividad, que se asocia a un pozo de monitoreo o comúnmente llamado “lumbrera”, el cual fue encontrado así como una cavidad, la interpretación se encuentra a detalle más adelante, por lo que es un buen ejemplo de comparación.

Nótese que el arreglo WW es menos sensible a cambios horizontales en la resistividad del subsuelo, es decir, estructuras verticales estrechas (Loke, 2010) y carece de información ya que es el que cuenta con menos mediciones.

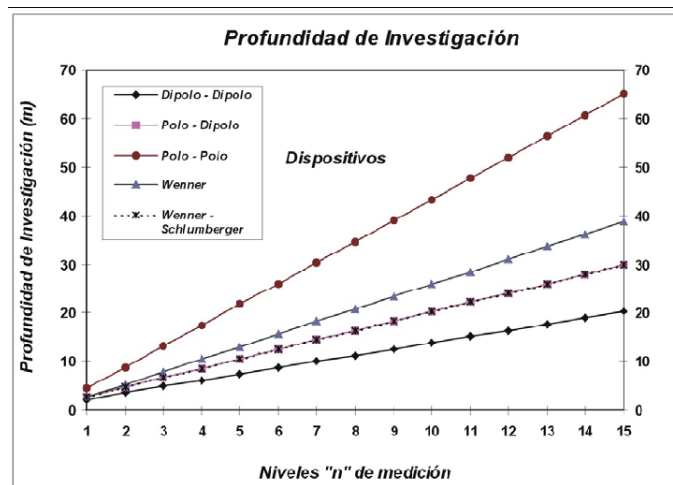
El caso del arreglo DD alcanza una mayor profundidad de penetración, tiene una gran cobertura de datos lateralmente y a profundidad, sin embargo posee la desventaja de captar un mayor ruido antropogénico, por tener una mayor cantidad de mediciones en la parte superficial, que al estar en una zona urbana altamente poblada es inevitable que se aprecie a mayor escala.

El arreglo WS al ser un híbrido tiene una buena sensibilidad para detectar cambios tanto verticales como horizontales, por tanto estructuras horizontales y verticales. Cuenta con mayor número de datos y una profundidad mayor a WW.

La sensibilidad es una función que básicamente nos muestra el grado en que un cambio en la resistividad de una sección del subsuelo influirá en la medida del potencial. A valores más altos de la función de sensibilidad, mayor es la influencia de la región del subsuelo sobre la medida (McGillivray y Oldenburg, 1990).

La gráfica 5.1 muestra según Edwards (1977), la profundidad media de investigación, de distintos arreglos electródicos para un modelo de tierra homogéneo. Los valores de profundidad son determinados al integrar la función de sensibilidad con la profundidad. Lo que nos permite tener un rango de profundidad de investigación aproximado para la planeación y verificación de los datos adquiridos en campo. No obstante la profundidad real de investigación puede variar drásticamente si en la parte superficial existen grandes contrastes de resistividad, como es el caso de la Figura 5.1 en el arreglo DD.

En este caso los niveles de medición “n” son n=9 (WW), n=15 (WS) y n=24 (DD) y es congruente con la siguiente gráfica (5.1) respecto a la profundidad de Investigación (Tabla 5.1).



Gráfica 5.1. Profundidades medias de investigación sobre un medio homogéneo de resistividad para los dispositivos Dipolo -Dipolo; Polo-Dipolo; Polo-Polo; Wenner y Wenner-Schlumberger obtenidas para una separación electródica de 5 metros y distintos niveles de medición (Edwards 1977).

Dado que nuestro objetivo de estudio es caracterizar zonas de riesgo, nos interesa tener una buena definición en las dos direcciones tanto vertical como horizontal y una profundidad de investigación aceptable, por lo tanto el arreglo más adecuado, en este caso, es el Wenner- Schlumberger.

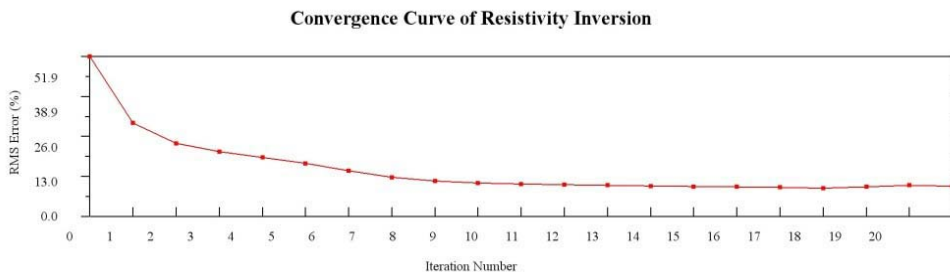
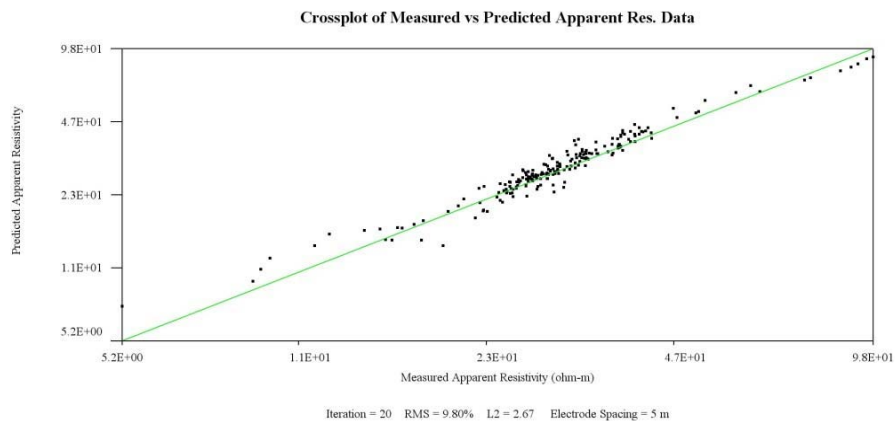
Además de las características teóricas de cada uno, se tomaron en cuenta otros factores de comparación obtenidos después de cada inversión con el software EarthImager 2D, criterios de convergencia, es decir, el error cuadrático medio, el número de iteraciones, la gráfica de correlación de dato calculado al dato medido, la curva de convergencia, el variograma del ajuste de los datos y el modelo de sensibilidad.

Arreglo	RMS [%]	L2	Iteración	Profundidad máx. [m]
WW	5.49	0.84	7	24.3
WS	9.8	2.67	20	28.7
DD	21.01	12.07	15	32.2

Tabla 5.1. Valores de los criterios de convergencia obtenidos para cada arreglo en el Perfil 1A

En la Tabla 5.1, notamos que tenemos un RMS aceptable en el arreglo WS el cual es menor al 10%, teniendo buena cobertura y contando con suficientes datos. Se puede verificar con el variograma y la curva de convergencia del mismo. Gráficas 5.2.

Esta comparación se realizó con los seis perfiles propuestos (Ver Anexo 1).

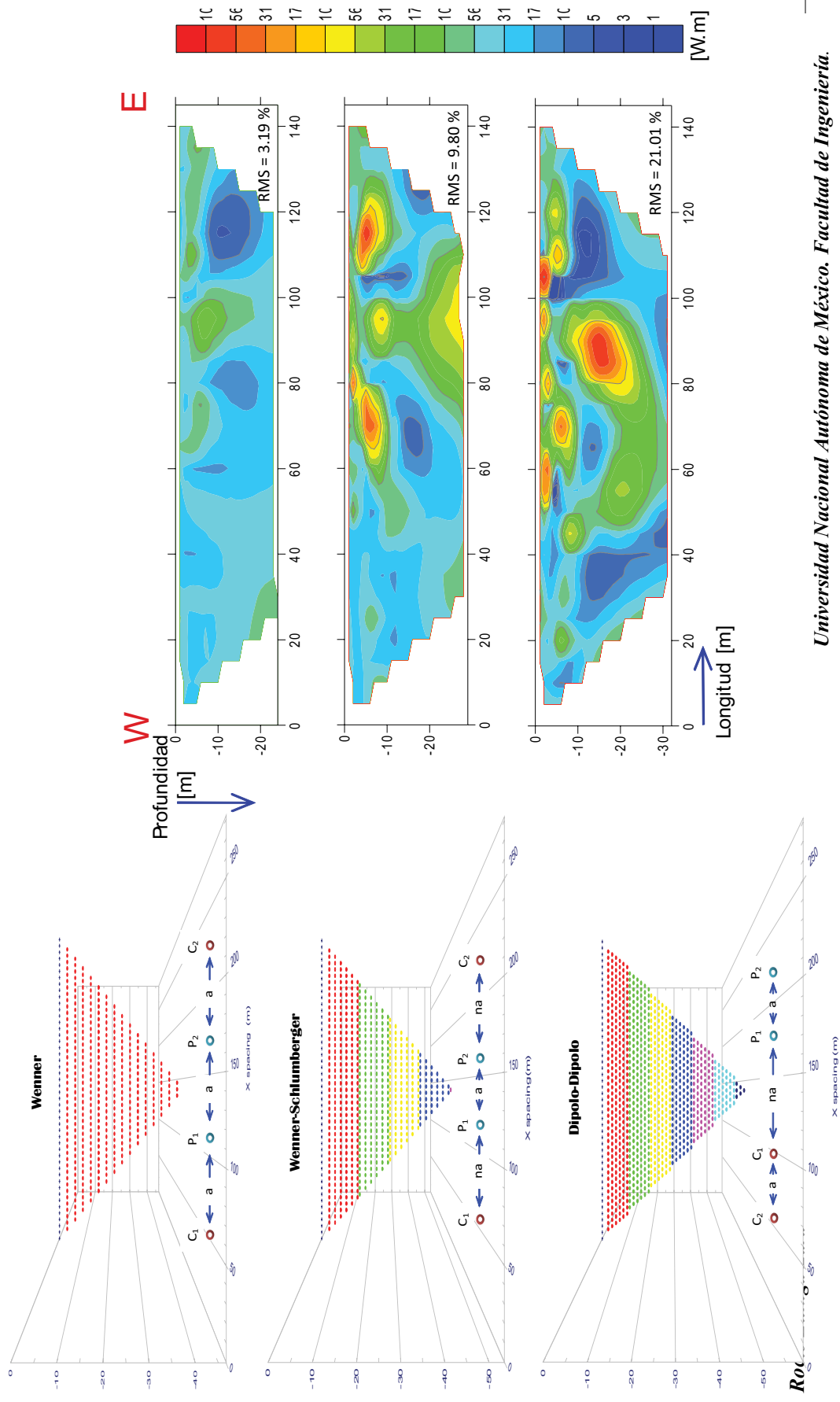


Gráficas 5.2. Obtenidas con el software Earth Imager 2D del perfil 1A, (a) Gráfica de correlación de dato calculado al dato medido, (b) Gráfica de la curva de convergencia.

En este contexto es relevante entender que los modelos de inversión que se obtienen de cada arreglo enriquecen la interpretación al realizarla; ejemplo de esto es al momento de hacer un análisis cualitativo de la geometría en las estructuras que se mantienen, por lo que no se descartaron los resultados de los arreglos WW y DD, tomando como principal el arreglo WS como en este caso.

Si se requiere un análisis más detallado entre comparación de arreglos se sugiere bibliografía relacionada como Urbieta (2001) y Loke (2000).

Figura 5.1. Perfil 1A, comparación entre los arreglos WW, WS y DD. Los La escala de valores de la resistividad calculada [ $\Omega.m$ ] es logarítmica.



## 5.2 Análisis de Perfiles. Arreglo eléctrico WS

Como preámbulo a este análisis se debe tomar en cuenta que durante la construcción del Colector Poniente se reportaron una serie de problemas relacionados con el comportamiento del subsuelo, existiendo a lo largo de éstas zonas de extracción y relleno de derrumbes. Estos fueron colapsos del terreno debidos a la presencia de zonas de debilidad y pobre consolidación, común en materiales de caída por eventos volcánicos como pómez y cenizas volcánicas. La Municipalidad de la Ciudad de Guatemala, realizó un plano de localización de estos rasgos durante el tiempo de construcción de este sistema de drenaje profundo (1975). Es un plano a escala que muestra en un perfil la localización a profundidad del Colector Poniente en conjunto con el de ciudad.

Conceptualmente la subsidencia del terreno es únicamente la manifestación en superficie de una serie de mecanismos subsuperficiales de deformación. Se puede clasificar en función de los mecanismos que la desencadenan.

En la siguiente tabla se muestra un esquema de los diferentes tipos de subsidencia existentes (Tomás et al.,2009).

Por disolución subterránea	En sal
	En yeso
	En rocas carbonatadas
Por construcción de obras subterráneas o galerías mineras	
Por erosión subterránea (tubificación o piping)	
Por flujo lateral	Rocas salinas
	Arcillas
Por compactación	Por carga
	Por drenaje
	Por vibración
	Por extracción de fluidos
	Por hidrocompactación
Tectónica	

Tabla 5.2 Tipos de Subsidencia. Tomado de Tomás *et al.* (2009).

Como se mencionó anteriormente las imágenes de TRE se procesaron y modelaron con el software comercial EarthImager 2D. Se homogeneizó la presentación de los modelos

con la misma escala de colores, que simboliza los valores de resistividad verdadera, que va de 1 a 10000 [ $\Omega$ .m] del azul al rojo respectivamente.

### **5.2.1 Perfil 2A**

Ubicado sobre la 6ta calle entre la Av. Simeón Cañas y la 8<sup>a</sup> Av. (Figura 3.1), el perfil 2A cuenta con una longitud de 282 m y una profundidad máxima de 58 m, propicio para detectar el colector de drenaje Poniente (profundidad aproximada de 45m), Figura 5.2.

Se observa un estrato de bajas resistividades, en el cual destacan tres zonas (H1, H2 y H3) que oscilan en un rango de resistividades de (1-10  $\Omega$ .m). Pueden asociarse a una zona altamente saturada de agua, se presenta a lo largo de todo el perfil siguiendo la topografía y aumentando su espesor en dirección Este, hacia una zona de barrancas que se encuentra entre este perfil y el 1A. El valor de resistividad decrece conforme a la topografía  $H1 > H2 > H3$ .

Las zonas de alta saturación representan un riesgo para la infraestructura ya que reblandecen el terreno favoreciendo el efecto de subsidencia por hidro-compactación (Tomás *et al.*, 2009). Se puede observar este efecto en S1, donde el material superficial parece presionar el material H1

La hidro-compactación puede causar asentamientos de la superficie terrestre comprendidos entre 1 a 5 m. Este fenómeno consiste en el asentamiento que se produce en determinados tipos de suelos, con un bajo contenido de humedad, como los sedimentos volcánicos y situados sobre el nivel freático, al ser saturados. La presencia de agua puede causar dos tipos de efectos en este tipo de suelos, la disolución de los enlaces entre partículas o la pérdida de las tensiones capilares que en ambos casos sostienen las partículas de suelo para configurar su estructura.

En la posición  $x=140$  m se caracteriza a H2, es posible que este rasgo de baja resistividad cause fracturamiento en esta zona y se alimente de la probable fuga de tuberías superficiales.

H3 que va de  $x=200$ m a 240m a partir de una profundidad aproximada de 40 m muestra una fuerte retención de agua en la proximidad de la barranca. Es posible que el material utilizado para rellenar esta zona de debilidad se esté debilitando y por tanto permita el paso de un flujo de agua que lo sature.

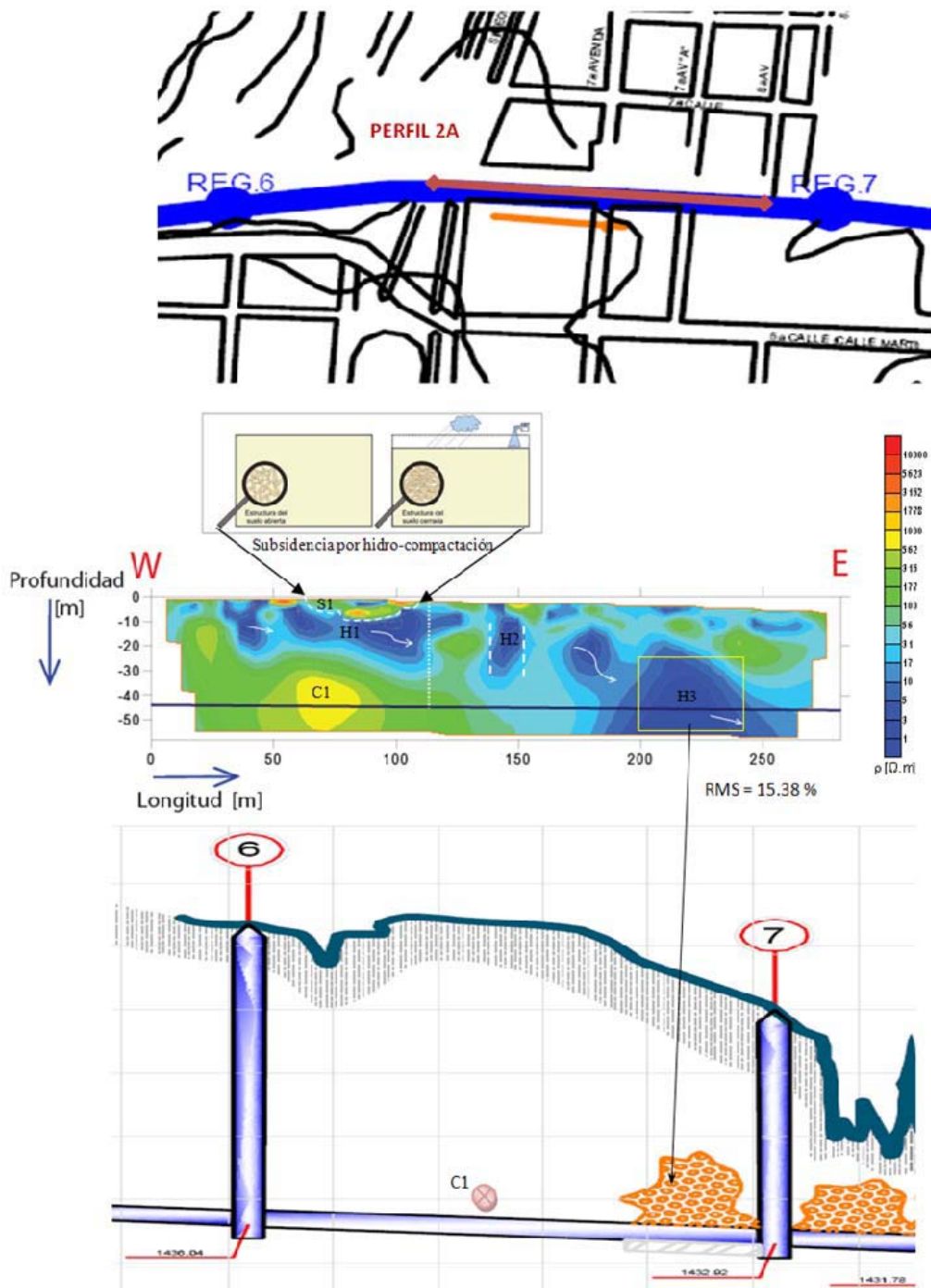


Figura 5.2. TRE del Perfil 2A. En orden descendente: mapa de ubicación, resultado de inversión y perfil general de la construcción del Colector Poniente (modificado de EMPAGUA (2010)). El círculo en rojo muestra la posición aproximada del rasgo C1



En la posición  $x=72$  m y a una profundidad media de 42 m se tienen valores de resistividades altas alrededor de  $1,000 \Omega.m$ , la cual se infiere sea una zona de relleno o cavidad rellena durante o posterior a la construcción del colector.

De acuerdo a la información proporcionada por EMPAGUA (2010) este rasgo se asocia a material de relleno utilizado para nivelar el terreno posterior a la construcción del colector para permitir la construcción de viviendas en esta parte de la ciudad.

En la posición  $x=110$  m se presenta un contraste de resistividades que se relaciona con la presencia de un registro del colector clausurado.

### 5.2.2 Perfil 1A

El Perfil 1A se encuentra sobre la 6ta calle ubicado a 20 m al W del hundimiento de 2010. Tiene 145 m de longitud con una profundidad de penetración no mayor a 30 m.

En  $x=100$  m se presenta un alto resistivo de ( $\sim 1,000 \Omega.m$ ), que se puede asociar a un pozo de monitoreo o lumbrera, en la parte inferior se mantienen los valores de resistividad altos, mayores a  $1,000 \Omega.m$  que se infiere sea el techo de una cavidad.

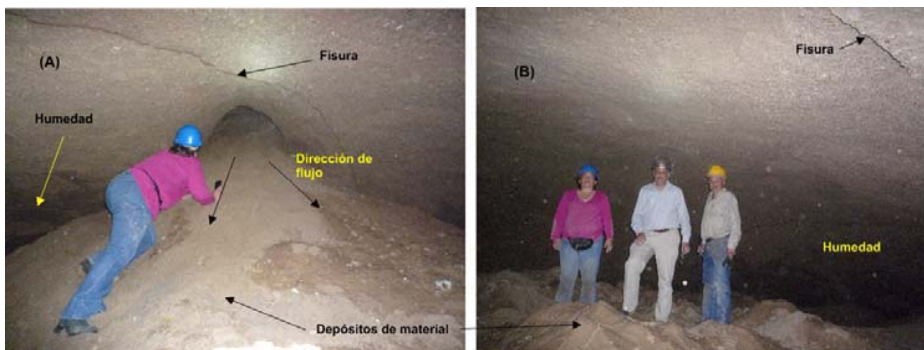


Figura 5.3 Exploración de la cavidad C2 determinada mediante el estudio de Tomografía Eléctrica del Perfil 1A (Figura 5.4). Se pueden observar algunas fisuras, zonas de humedad y depósitos de material producto de la caída de la parte superior de este rasgo que se amontonan en el suelo (A). Nótese el tamaño de las personas en relación a las dimensiones de esta cavidad (B).

(Fotografías tomadas de Chávez *et al.*, 2011)

Con los resultados preliminares de geofísica en campo, se sugirió realizar un pozo exploratorio sobre la C2, sin embargo al detectar el pozo de monitoreo no fue necesario, realizándose la investigación. Se encontró a una profundidad aproximada de 35 m la entrada a una oquedad de casi 6 m de alto por 10 m de ancho, aproximadamente (Figura

5.3). Es importante resaltar que esta oquedad se encuentra a menos de 50 m del hundimiento ocurrido en el 2010.

Se pueden observar también zonas de baja resistividad ( $1 \Omega.m$  a  $12\Omega.m$ ) que se asocian a estratos altamente saturados de agua. El rasgo de altas resistividades mencionado anteriormente puede estar actuando como un “parte aguas” ocasionando posibles fracturamientos del subsuelo y direccionando los flujos superficiales por filtración, de esta manera podemos estimar dos direcciones de flujo de agua, destacando la dirección del flujo hacia el hundimiento de 2010.

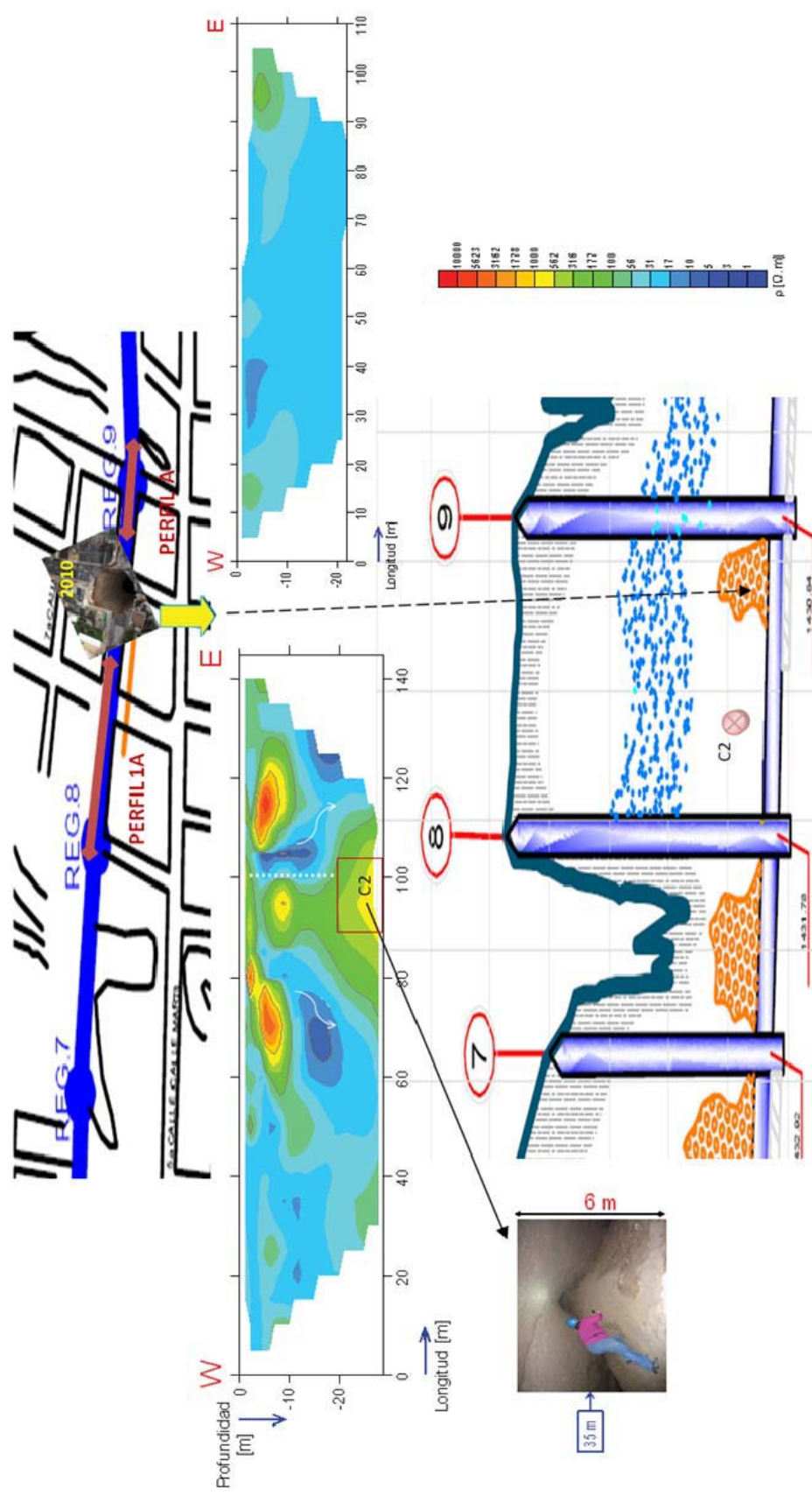


Figura 5.4. TRE de los Perfiles de 1A y A. En orden descendente: mapa de ubicación, resultado de inversión y perfil general de la construcción del Colector Poniente (modificado de EMPAGUA (2010)). El círculo en rojo muestra ubicación de la cavidad C2.

Perfil A, B y C

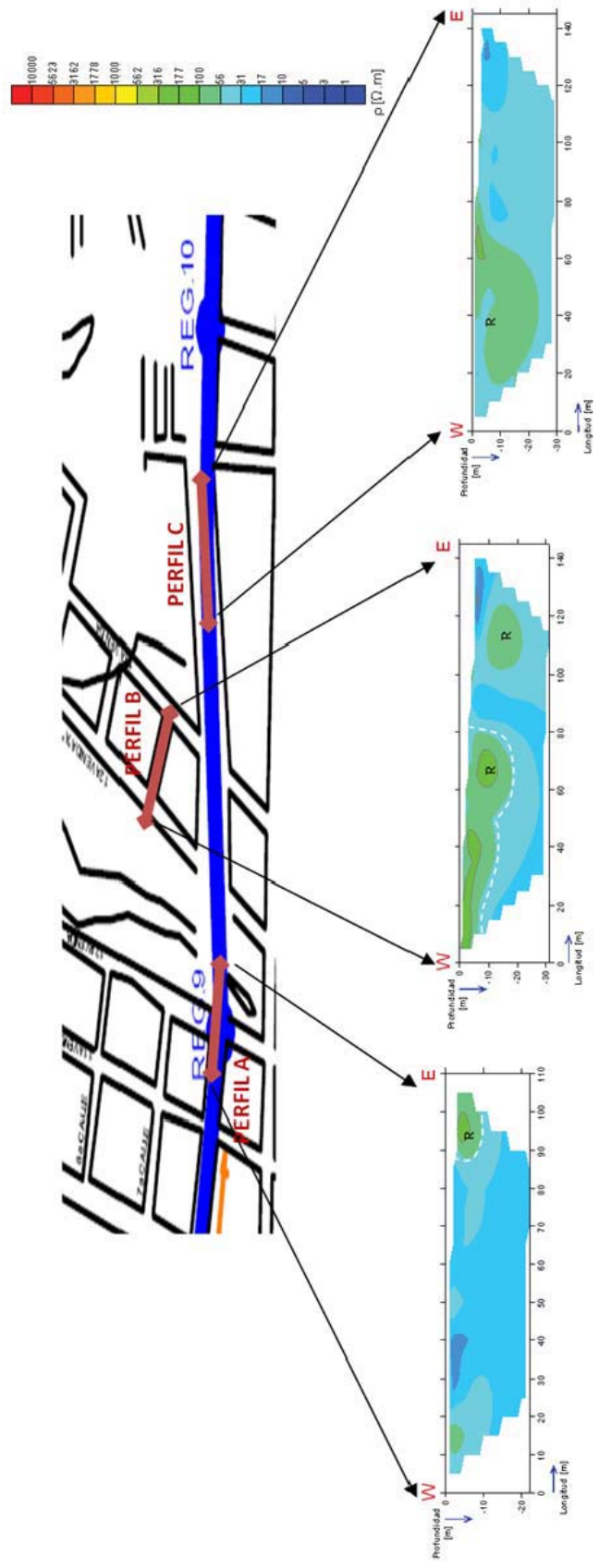


Figura 5.5. TRE de los Perfiles A, B y C. En orden descendente: mapa de ubicación (modificado de EMPAGUA (2010)) y resultado de inversión

### **5.2.3 Perfil A, B y C**

Por la distribución de las calles este segmento se estudio en tres perfiles diferentes, el perfil A de 110m y los perfiles B y C de 145 m, debido a que son perfiles cortos la profundidad máxima no rebasan los 30 m.

En los tres perfiles tenemos un comportamiento similar, se detectan dos rasgos principales: horizontes saturados con una resistividad de 20 a 30  $\Omega$ .m y posiblemente zonas de relleno (R) con una resistividad mayor, en promedio de 100  $\Omega$ .m, Figura 5.5.

No se detectan zonas de riesgo hasta esta profundidad, sin embargo se debe de tener un monitoreo de estas zonas ya que podrían ser susceptibles al proceso de subsidencia si se tiene un cambio el contenido de agua por temporada (de lluvias y secas).

Por último en el perfil A en  $x=40$  m, B en  $x=125$  m y C en  $x=130$  m se presentan los valores de resistividad más bajos, que al estar a hasta una profundidad máxima de 3 m se puede relacionar con posibles fugas de las tuberías superficiales.

### **5.2.4 Perfil D-E**

El Perfil DE se encuentra en el último segmento del estudio en la 6ª calle iniciando en la 15 Av. hasta la 23 Av., donde ocurrió el hundimiento de 2007, actualmente remediado.

La adquisición de este perfil como ya se mencionó, se llevo a cabo con la técnica de roll-along, por lo que es el de mayor longitud con un total de 950m y una profundidad máxima de estudio de 94 m (Figura 5.6). Se realizaron 5 perfiles (Figura 5.7) para completar la información del subsuelo en esta línea, recordando que la capacidad máxima de apertura del equipo Syscal Pro es de 470m con 48 electrodos con separación de 10 m.

A lo largo del perfil se tienen grandes contrastes de resistividades, presentándose zonas de alta saturación y posibles cavidades o zonas de relleno, lo que da como resultado un subsuelo muy complejo.

La resistividad promedio varía de 100 a 250  $\Omega$ .m se relaciona con los depósitos de caída y flujos piroclásticos (ver Cuadro 1.1).

Se presentan valores muy bajos de resistividad de 1 a 10  $\Omega$ .m, en particular se caracterizan cinco áreas principales asociadas a zonas altamente saturadas, H1, H2, H3, H4 y H5.

H1 y H3 se localizan a partir de una profundidad promedio de 60 m, H1 abarca los primeros 260 m del perfil y H3 va de los 420-470 m. Estos rasgos se encuentran debajo del colector poniente lo que indicaría la posible ruptura del mismo ocasionando la fuga de agua o la presencia de un flujo subterráneo en dirección de la topografía. Además de la contribución por filtración de agua superficial.

El estudio se realizó en temporada de lluvia, por lo que si el agua migra en época de secas podría producirse vacío generando subsidencia del terreno o zonas de licuefacción, ocasionando una desestabilización del terreno que representa un riesgo potencial para la infraestructura.

En cambio H2 y H4 están por encima del colector con un espesor aproximado de 30m.

Por otro lado se caracterizaron rasgos de resistividades altas C1, C2, C3 y C4.

En la posición  $x=300$  m a una profundidad aproximada de 50m se encuentra un alto resistivo C1 de ( $\sim 200$   $\Omega$ .m) que se puede asociar a material pobremente consolidado, con probabilidad de convertirse en una cavidad al estar interactuando con el estrato de baja resistividad H1 que se encuentra en la parte superior.

Uno de los rasgos más notorios en el perfil es la anomalía resistividad de 10,000  $\Omega$ .m. Ubicada en  $x=565$  m a una profundidad aproximada de 53m y 20 m de diámetro, C2. Se asocia a una posible cavidad en formación que al parecer migra a la superficie o una zona de relleno muy mal consolidada. Es uno de los puntos más vulnerables de este estudio, ya que se encuentra el Instituto Guatemalteco de Seguridad Social, IGSS, además de ser una zona altamente poblada y transitada, la 20 Av.



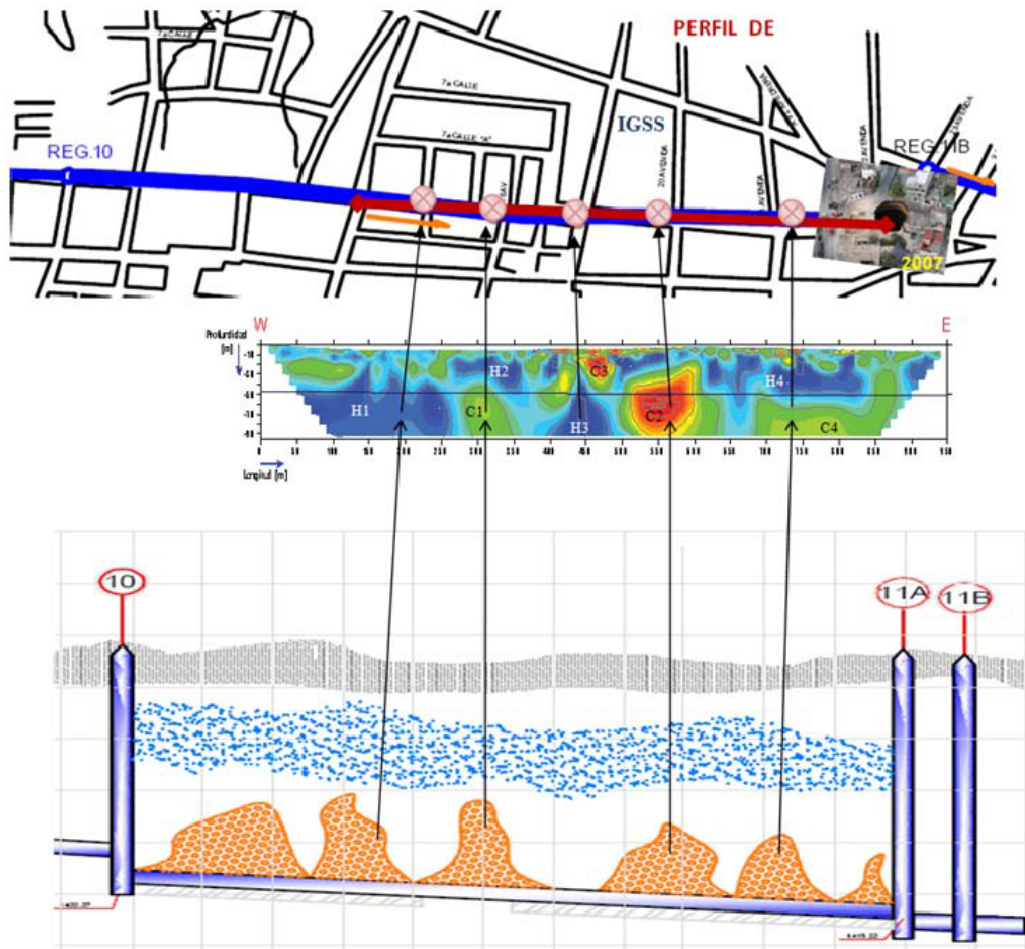


Figura 5.6. TRE del Perfil D-E, sección completa. En orden descendente: mapa de ubicación, resultado de inversión y perfil general de la construcción del Colector Poniente (modificado de EMPAGUA (2010)). Los círculos en rojo muestran las zonas de riesgo a lo largo del perfil D-E.

En la parte superficial  $x=560\text{m}$  está marcada C3 con un valor de resistividad  $\sim 1,000 \Omega\cdot\text{m}$ , se infiere es una zona de relleno para nivelar el terreno posterior a la construcción del colector.

Unos metros más al E se puede caracterizar una posible zona de subsidencia de  $x=470\text{ m}$  a  $x=590\text{ m}$ , teniendo un cuerpo saturado hasta  $35\text{m}$  de profundidad, subsecuentemente un horizonte con valor de resistividad promedio, asociado a depósitos vulcano-sedimentarios de  $10\text{m}$  de espesor, que descansa sobre C2.

Evidentemente es una zona de riesgo porque al desaparecer el paquete de material piroclástico por deslave o al migrar C2 hacia la superficie, la resistencia de la parte

superior cedería al material que se encuentra en la parte superficial, lo que provocaría un hundimiento similar a los ocurridos en 2007 o 2010.

C4 se localiza aparentemente de  $x=700\text{m}$  a  $x=800\text{m}$  con un valor de resistividad  $\sim 350 \Omega\cdot\text{m}$ , puede ser material mal consolidado correlacionado a una de las zonas de derrumbe que fueron rellenadas y reportadas en 1975.

Finalmente en  $x=900 \text{ m}$  se distingue otra zona de baja resistividad menor a  $15 \Omega\cdot\text{m}$ , se asocia al material de relleno utilizado en la remediación del hundimiento de 2007.

Según información de EMPAGUA además del relleno esta zona fue sujeta a un “bypass” o desvío del colector para evitar futuros desastres. Sin embargo los ajustes relacionados pueden influir en el proceso de deslave del material de relleno.

#### **5.2.5 Perfil D-E en secciones**

Se invirtieron por separados los cinco perfiles que crean el roll- along, esto nos genera imágenes con mayor detalle de cada una de las zonas de estudio, pues es similar a un “acercamiento”. Generalmente solo se analiza la imagen final pero el ver cada uno de los perfiles nos puede enriquecer la interpretación y asegurarnos de que la inversión final adecuada.

Para mayor facilidad se toma la nomenclatura propuesta en la metodología. Sección (0-470): S1, Sección (120-590): S2, Sección (240-710): S3, Sección (360-830): S4 y Sección (480-950): S5.

Como ya se mencionó entre  $x=500\text{m}$  y  $x=600\text{m}$  es una de las zonas más vulnerables de este estudio, por lo que podemos verificar con las secciones S3, S4 y S5 el resultado del perfil total.

La ubicación de C2 coincide horizontalmente a un punto medio  $x=560 \text{ m}$  y  $53 \text{ m}$  de profundidad en el centro de ésta, en S3 y S4 mantiene el valor de resistividad ( $\sim 1,000\Omega\cdot\text{m}$ ), en S5 la magnitud disminuye a ( $\sim 1,000\Omega\cdot\text{m}$ ).

La geometría de esta anomalía varía ligeramente, pero se conserva excepto en S5 donde está más aplanada por lo tanto con dimensiones menores en sentido vertical. Esto se



debe a que C2 está en la orilla de S5 y no se tiene la información completa hacia el W del perfil.

La zona de subsidencia se mantiene en las tres secciones, en comparación al perfil completo se observa que en S3 existen mayores rasgos de altas resistividades superficiales, que se relaciona a material mal consolidado.

Por lo tanto tenemos valores de resistividad distintos pero se mantienen dentro de los rangos que son aceptables para relacionarlos a las dichas estructuras.

Se pueden detectar en  $x=160\text{m}$  y  $x=870\text{m}$  se dos registros monitoreo que llegan hasta el colector.

La sección S5 enriquece la interpretación de la parte final del perfil completo D-E

Entre  $x= 870$  a  $880$  m a una profundidad aproximada de  $80$  m, se muestran valores de resistividad altos lo cual se asocia a un registro del colector profundo.

En cambio el rasgo de C4 tiene mejor definición en la sección por la respuesta resistiva y la geometría se puede relacionar a una cavidad en formación, la tubería en esta sección del perfil ( $x= 700$  m y  $x= 840$  m) estaría en riesgo, pues al acercarse la cavidad hacia la base del Colector puede desestabilizar el material sobre el que se asienta el tubo y con el peso del estrato saturado podría dañarlo, ocasionándole algunas fisuras.

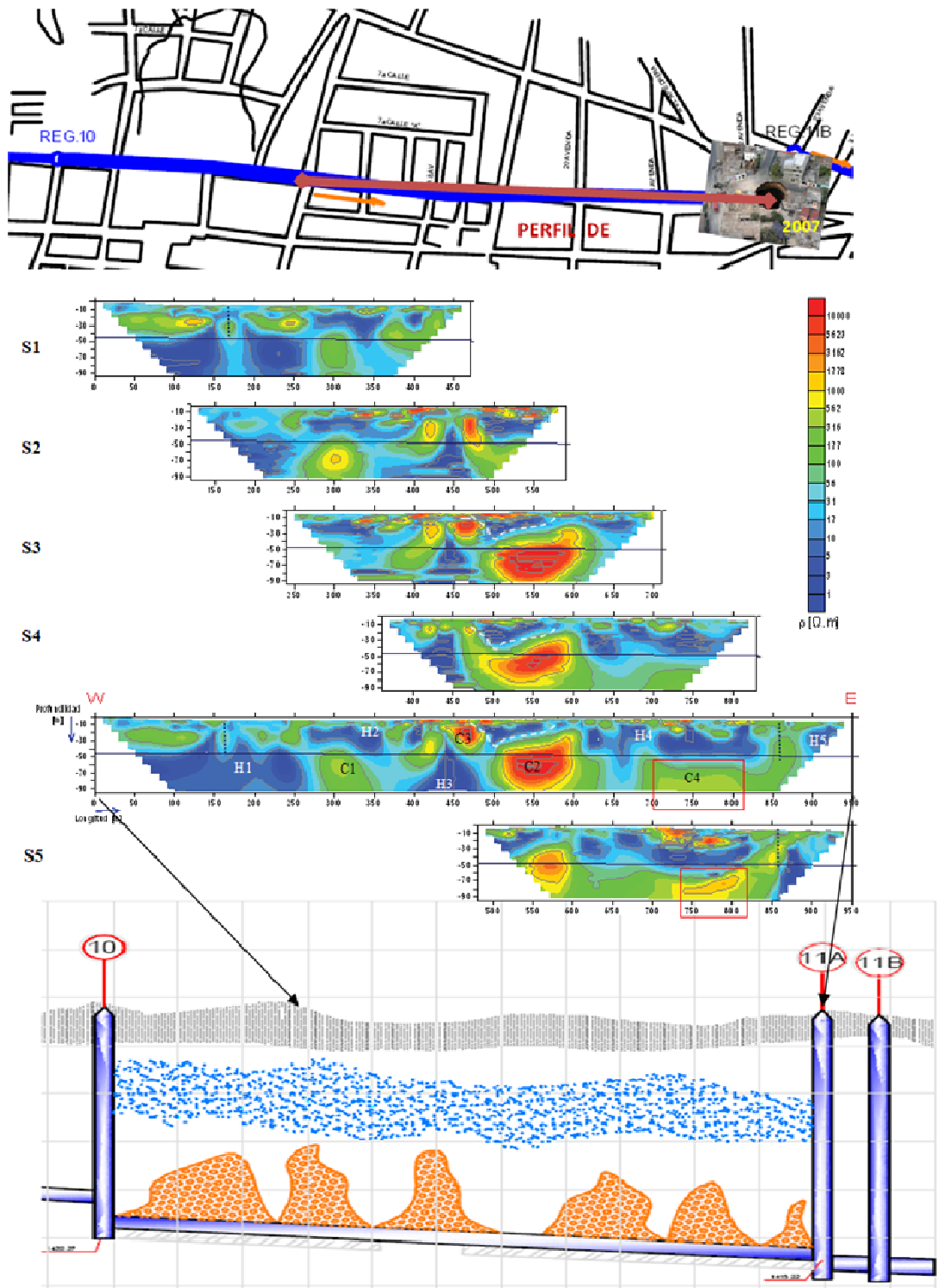


Figura 5.7. TRE del perfil D-E por secciones, técnica utilizada roll-along. En orden descendente: mapa de ubicación, resultado de inversión y perfil general de la construcción del Colector Poniente (modificado de EMPAGUA (2010)).

### 5.3 Análisis del hundimiento 2010

Al analizar la geometría de estos colapsos surge la pregunta del por qué mantienen una forma cilíndrica casi perfecta. La respuesta es complicada; tal como se ha comentado, estos colapsos dependen de varios factores, pero destacan dos principalmente la presencia de tuberías superficiales de agua y la compactación inadecuada del material alrededor de estas.

De acuerdo al artículo de Fell *et al.* (2004) se presentan zonas de alta permeabilidad asociadas a conductos pues la compactación del suelo alrededor de estos suele ser deficiente. La figura 5.8 muestra ejemplos de malas prácticas que pueden contribuir a esto. Además dependiendo de la litología del lugar podría contribuir a la generación de tomos, como es el caso.

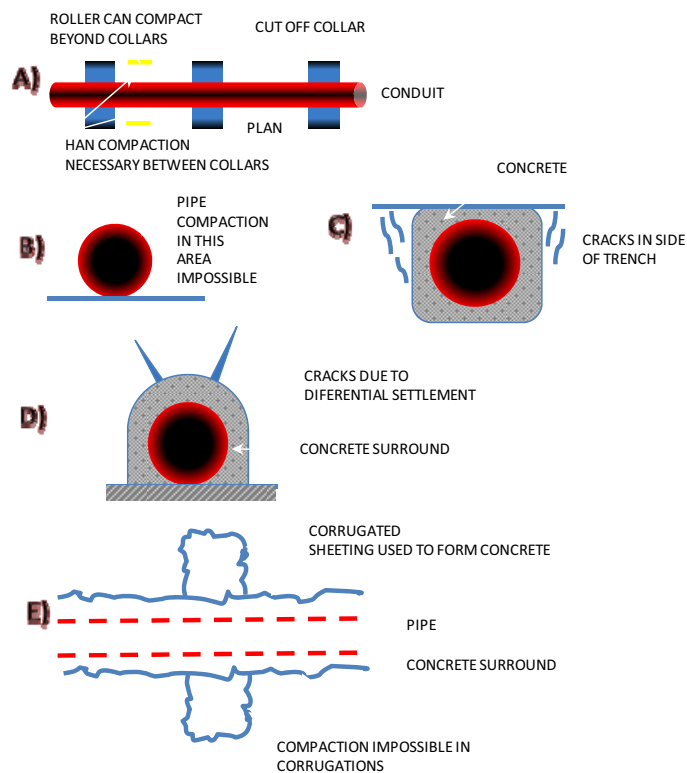


Figura 5.8. Algunas causas de colapsos debido a los conductos de tuberías: (A) compactación inadecuada debido a la presencia de cuellos de corte, (B) compactación inadecuada del material alrededor de la tubería, (C) Agrietamiento en el suelo o roca muy erosionada en los lados de la trinchera, (D) Grietas por asentamiento diferencial, (E) presencia de ondulaciones o rugosidad en la superficie de los collares de corte. (Fell *et al.*, 2004).

En el hundimiento de 2010 se encontró la existencia de tomos o tubificaciones (Figura 5.9) generadores de cavidades, se reportó en el Informe de estratigrafía de Zamudio *et al* (2010).



Figura 5.9. Hundimiento de 2010. Fotografía tomada a 48 m de profundidad. Muestra la presencia de tubificaciones y el estado del Colector de drenaje Poniente.

Como dato importante según información proporcionada por EMPAGUA el colector Poniente no presentaba rupturas manteniéndose en buenas condiciones. Las características de éste son 2.25 m de diámetro y el grosor de las paredes es de 30 cm, cuenta con un subdrenaje en algunas zonas como se aprecia en la Figura (5.5). Posterior al derrumbe el colector tenía 50cm de arena volcánica que le reducía el gasto de la tubería (Información oral de EMPAGUA, 2010).

En consecuencia la correlación directa entre fuga y ruptura no puede establecerse como una regla. Es de considerarse que si bien hubo ruptura, fue por la caída del volumen encima del colector en el mismo instante del colapso.

Figura 5.10. Sección comprendida por los perfiles 2A, 1A, A, B y C a lo largo del Colector de drenaje Poniente. En orden descendente: mapa de ubicación, resultado de inversión y perfil general de la construcción de EMPAGUA (2010)

