



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA EN
LA PORCIÓN SUR DEL ACUÍFERO VALLE
DEL MEZQUITAL MEDIANTE EL METÓDO
GEOFÍSICO DE TRANSITORIO
ELECTROMAGNÉTICO EN EL DOMINIO DEL
TIEMPO.**

INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES

Que para obtener el título de

Ingeniero Geofísico

P R E S E N T A

Francisco Alejandro Linares Linares

ASESOR DE INFORME

Dr. Rodrigo Montúfar Chaveznava



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2021



**CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA EN LA PORCIÓN SUR DEL ACUÍFERO VALLE DEL MEZQUITAL
MEDIANTE EL MÉTODO GEOFÍSICO DE TRANSITORIO ELECTROMAGNÉTICO EN EL DOMINIO DEL
TIEMPO**

INDICE

1.	DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA	5 -
2.	PUESTO DE TRABAJO	6 -
2.1	Participación en el proyecto	7 -
3.	INTRODUCCIÓN	8 -
4.	INFORMACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	9 -
4.1	Localización.....	9 -
4.2	Clima	12 -
4.3	Geomorfología.....	13 -
4.4	Geología.....	15 -
4.4.1	<i>Estratigrafía</i>	15 -
4.4.2	<i>Geología Estructural</i>	17 -
4.4.3	<i>Geología del subsuelo</i>	17 -
4.4.4	<i>Descripción de la geología de la zona</i>	20 -
4.5	Hidrogeología	22 -
4.5.1	<i>Tipo de Acuífero</i>	22 -
4.5.2	<i>Profundidad al Nivel Estático</i>	22 -
4.5.3	<i>Elevación del Nivel Estático</i>	23 -
4.5.4	<i>Hidrografía</i>	23 -
4.5.5	<i>Profundidad de los Pozos de Extracción</i>	25 -
5.	DISPONIBILIDAD.....	26 -
5.1	Recarga total media anual (R)	26 -
5.2	Descarga natural comprometida (DNC)	26 -
5.3	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	27 -
5.4	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)	27 -
6.	MÉTODO EMPLEADO (TEM)	28 -
6.1	Antecedentes.....	28 -
6.2	Principio físico del método	29 -
6.3	Procedimiento de levantamiento geofísico.....	30 -
6.3.1	<i>Pruebas y calibraciones</i>	30 -
6.3.2	<i>Equipo Utilizado</i>	34 -
6.4	Procesamiento de datos	35 -



**CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA EN LA PORCIÓN SUR DEL ACUÍFERO VALLE DEL MEZQUITAL
MEDIANTE EL MÉTODO GEOFÍSICO DE TRANSITORIO ELECTROMAGNÉTICO EN EL DOMINIO DEL
TIEMPO**

7.	TRABAJO EN CAMPO.....	- 36 -
7.1	Localización de los sondeos por transitorio electromagnético.....	- 36 -
7.2	Distribución de los perfiles geoelectricos obtenidos.....	- 37 -
8.	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	- 38 -
8.1	Perfiles geoelectricos obtenidos.....	- 38 -
8.2	Sobreposición de secciones y cortes de resistividad en planta a diferentes elevaciones sobre la zona de estudio.....	- 40 -
8.3	Modelo de Resistividades y Litológico en 3D.....	- 41 -
9.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	- 50 -
9.1	Conclusiones.....	- 50 -
9.2	Recomendaciones.....	- 52 -
10.	BIBLIOGRAFÍA.....	- 54 -
	ANEXOS.....	- 56 -



AGRADECIMIENTOS

Primeramente, agradezco y dedico este trabajo de investigación a mis padres, quienes me apoyaron moral y económicamente en mi desarrollo como profesionista, el cual no fue fácil por el fallecimiento de mi padre a comienzos de la carrera, quién siempre fue el pilar, el más responsable y amoroso padre de familia que pude haber tenido. Por otro lado, a mi madre que me apoyó aun cuando yo quería renunciar a todo con respecto a mis estudios universitarios, sin embargo, con su amor, esfuerzo y sacrificio pude concluir esta etapa de mi vida satisfactoriamente. Gracias a ambos, con su cariño, educación y buen ejemplo, soy el hombre que ellos esperaban que fuera, gracias por todo padres, los amo.

Agradezco al ingeniero Eduardo Juayek y a su familia por darme la oportunidad de desarrollarme profesionalmente en su empresa, a su gran paciencia hacia conmigo, aprendiendo nuevas cosas cada día y realmente conocer el significado del esfuerzo que conlleva un trabajo y el sacrificio para lograr tus metas. Agradezco infinitamente a todos mis compañeros de trabajo, a Miguel, Damian, Ángel, Neri, Eric, Juan Pablo, a los Hilarios, Javier, Lucio, Betty, Citlali, Karol, Mari, Emma y a los demás que llegue a omitir, por transmitirme sus conocimientos, ya sea en el trabajo de gabinete, campo o alguna otra eventualidad presentada en la jornada laboral, por la paciencia que me han tenido y sobre todo por el gusto de querer explicarme las cosas.

Por otro lado, agradezco a mi director de trabajo profesional, al Dr. Montúfar por ofrecerme un tema de investigación que más adelante se convertiría en el puente para poder introducirme al campo laboral, a su gran paciencia y, sobre todo, por impulsarme a culminar este trabajo profesional a pesar de las eventualidades de la vida cotidiana. Al ingeniero Luis Castillo por siempre tener tiempo para mí y resolver mis dudas de toda clase de temas, que hoy en día, más que un asesor, lo considero un gran amigo. Al ingeniero Arroyo, por ser un gran profesor de la carrera, el que me motivó a inclinarme a la rama de la geofísica aplicada a la hidrogeología y ser un gran asesor en este proyecto, por



**CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLOGICA EN LA PORCIÓN SUR DEL ACUÍFERO VALLE DEL MEZQUITAL
MEDIANTE EL MÉTODO GEOFÍSICO DE TRANSITORIO ELECTROMAGNÉTICO EN EL DOMINIO DEL
TIEMPO**

transmitirme sus conocimientos y siempre tener tiempo para resolver mis dudas por muy nescientes que fueran.

Agradezco a todos mis amigos de la facultad y sin intenciones de omitir alguno, me reservo a nombrarlos a cada uno de ellos. Doy gracias por su amistad que me brindaron, ya sea pasajera o duradera, me enseñaron el valor de la hermandad y el trabajo en equipo, a todas las anécdotas increíbles que vivimos y sobre todo haber compartido clases con ustedes, un honor haberlos tenido como amigos en la Facultad de Ingeniería.

Por último, agradezco al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM IT101521 Métodos de Realidad Virtual para Investigación en Geociencias y a la DGAPA-UNAM por la beca recibida.



1. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

Geofísica Juayek, una empresa líder en la realización de métodos geofísicos para la búsqueda de acuíferos, y con más de 40 años de experiencia, se ha consolidado como una de las empresas mejor estructuradas e integradas para ofrecer un servicio de innovación y excelencia para ejecutar sus proyectos, además, de ofrecer confianza con sus clientes ya sean del sector público o privado, brinda un servicio excepcional apoyado de la tecnología que la misma empresa desarrolla y mejora año con año.

Fundada por el ingeniero geofísico Eduardo Juayek Sotelo, ha marcado un gran auge siendo uno de los pioneros en registros geofísicos de pozo en México, así como en métodos eléctricos y electromagnéticos, proporcionando soluciones eficaces en búsqueda de agua subterránea, reservas minerales, estructuras geológicas o discontinuidades en el subsuelo.



2. PUESTO DE TRABAJO

El puesto de trabajo que desempeño en la empresa corresponde de ingeniero de campo y gabinete, realizando métodos de Transitorio Electromagnético (TEM), Sondeos Eléctricos Verticales (SEV's), Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE), esta actividad se lleva a cabo dependiendo del estudio que requiera el cliente o cual es el método más apto para el sitio de estudio. Por otro lado, también realizo registros eléctricos para pozos de agua los cuales son de suma importancia para conocer que posibilidades acuíferas existen, esta actividad es necesaria para determinar si la perforación exploratoria puede continuar o cancelar el proyecto.

La adquisición de datos en campo es la parte más importante de la prospección geofísica para llegar a un buen resultado, como encargado de brigada y los conocimientos adquiridos en la carrera profesional he logrado ejecutar satisfactoriamente los estudios. Cabe mencionar que el trabajo en equipo es fundamental para realizar un estudio de forma eficaz y rápida.

Posterior a la adquisición de datos en campo, realizo también el procesamiento de éstos con la ayuda de diferentes programas de cómputo y, una vez procesados los datos, obtengo perfiles geoeléctricos; realizo planos de localización; cortes en planta y modelos en 3D de resistividades donde finalmente integro toda la información en un informe completo con conclusiones y recomendaciones pertinentes para el cliente.

Durante los dos años que he trabajado en la empresa, he podido expandir mis horizontes intelectuales y reforzar lo aprendido en la Facultad; sin embargo, siempre existen nuevos retos en cada estudio, nuevas experiencias y es algo que me permite seguir estando en constante desarrollo y actualización como ingeniero geofísico, estando continuamente capacitándome y aprendiendo nuevos métodos geofísicos conforme la tecnología va avanzando.



CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA EN LA PORCIÓN SUR DEL ACUÍFERO VALLE DEL MEZQUITAL MEDIANTE EL MÉTODO GEOFÍSICO DE TRANSITORIO ELECTROMAGNÉTICO EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

2.1 Participación en el proyecto

La demanda de agua en México es cada vez mayor, se ha convertido en un problema social grave y que irá incrementando año con año. En específico, en los acuíferos dentro del Valle de México, esta acción ha generado incertidumbre en la población, ya que el líquido vital se va encontrando a mayores profundidades, por lo cual, se ha optado por realizar estudios que abarquen más profundidad de investigación para ubicar los mantos acuíferos.

Mi participación como ingeniero geofísico en el presente estudio, tuvo como finalidad utilizar el método transitorio electromagnético, cuya profundidad de investigación es mayor que la de otros métodos, tales como el sondeo eléctrico vertical y la tomografía eléctrica que, aunque son métodos bastante confiables para caracterizar el subsuelo, su profundidad de investigación es más somera, y por lo mencionado, los acuíferos ya no se encuentran a pocos metros de profundidad. Sin embargo, con respecto a un sondeo electromagnético, obtenemos la misma información del subsuelo, pero a mucho mayor profundidad donde se pueden ubicar los sitios con las mejores características hidrogeológicas y así puntualizar que zonas son aptas para perforar pozos, recomendando y sugiriendo un ante proyecto de diseño de pozo.



3. INTRODUCCIÓN

El presente estudio geofísico tuvo como objetivo conocer las propiedades físicas asociadas a un posible fracturamiento de los materiales que constituyen el subsuelo y evaluar las posibilidades acuíferas para determinar la acción de perforar un pozo de extracción. Dada la magnitud del proyecto, los sondeos realizados se encuentran ubicados estratégicamente en una parte de la región sur del acuífero Valle del Mezquital, dentro de los municipios de Apaxco, Hueyoxtla, Tequixquiac y Zumpango, en el Estado de México. Cabe mencionar que, por cuestiones de confidencialidad de los datos adquiridos en campo, no se ubicará ningún punto con coordenadas y ningún mapa tendrá referencias geográficas, esto con el fin de mantener los datos protegidos.

Para llevar a cabo esta investigación, se realizaron 50 sondeos por Transitorio Electromagnético (TEM's), con la finalidad de obtener sus valores de resistividad y así poder obtener un modelo litológico confiable y de esta manera poder localizar las zonas con las mejores características geohidrológicas para llevar a cabo la perforación de un pozo.

La finalidad principal de la aplicación de este método es conocer la distribución de la resistividad aparente de los diferentes materiales que constituyen el subsuelo, utilizando el arreglo *Single Loop*, con bobinas de 300x300 m. De esta manera se puede conocer el medio geológico a profundidades medias de entre 600 y 650 m. Una vez realizada correctamente la interpretación de estos sondeos, a través de una paquetería especializada, se puede asociar la litología probable, su espesor y permeabilidad inferida.



4. INFORMACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Para conformar el marco hidrogeológico de referencia de la zona se revisó la información del tema que existe, no se encontró mucha. Se utilizó la que proporciona el documento de CONAGUA Actualización de la Disponibilidad Media Anual del Agua Subterránea, en el Acuífero Valle del Mezquital (1310), Estado de Hidalgo, la cual se transcribe en los temas que apoyaron a la conceptualización de la zona para proponer la profundidad de investigación, tipo de método geofísico a emplear y distribución de los puntos de medición, esto con el objetivo de reducir la incertidumbre que los métodos geofísicos llegan a tener.

4.1 Localización

La zona de estudio se localiza en la zona norte del Estado de México, dentro de la parte norte de la región de Zumpango, abarcando cuatro municipios de manera parcial y/o total; estos son: Apaxco, Hueypoxtla, Tequixquiac y Zumpango (Figura 1). Dentro de la superficie que involucra a dichos municipios, fueron realizados 50 sondeos mediante el método TEM, los cuales se encuentran distribuidos de manera estratégica para cubrir en lo mejor posible la zona de interés (Figura 2-A).



CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA EN LA PORCIÓN SUR DEL ACUÍFERO VALLE DEL MEZQUITAL MEDIANTE EL MÉTODO GEOFÍSICO DE TRANSITORIO ELECTROMAGNÉTICO EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

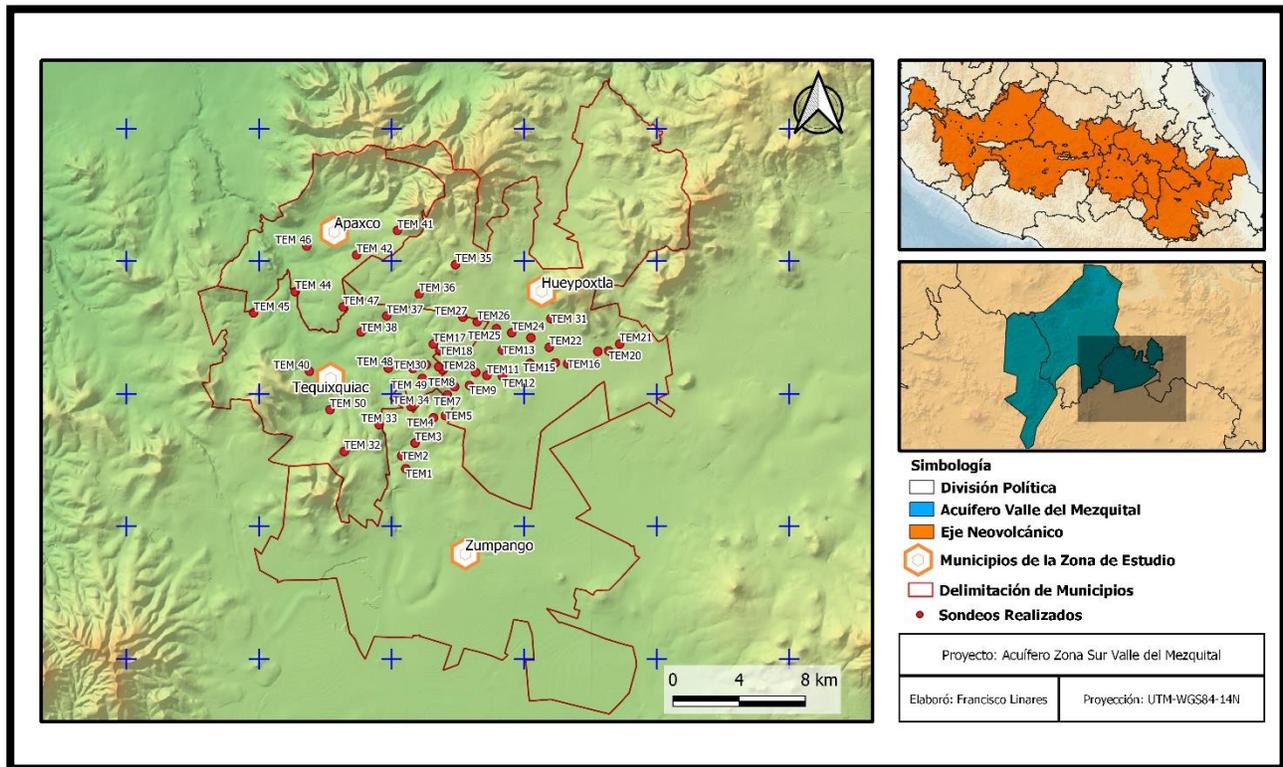


Figura 1 – Delimitación municipal de Apaxco, Hueypoxtla, Tequixquiac, Zumpango y localización de los sondeos realizados.

A su vez, la zona de estudio que involucra los cuatro municipios antes mencionados queda comprendida dentro del acuífero Valle del Mezquital, el cual está definido con la clave 1310 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo de Aguas Subterráneas (SIGMAS) de la CONAGUA.

La siguiente información sobre el acuífero fue obtenida por medio del documento ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA EN EL ACUÍFERO VALLE DEL MEZQUITAL (1310), ESTADO DE HIDALGO de la Comisión Nacional del Agua, Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas, disponible para todo el público por medio de su página web <https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/Edos/hidalgo/hidalgo.html> consultado el 12 de mayo de 2021.



CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA EN LA PORCIÓN SUR DEL ACUÍFERO VALLE DEL MEZQUITAL MEDIANTE EL MÉTODO GEOFÍSICO DE TRANSITORIO ELECTROMAGNÉTICO EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

Dicho acuífero abarca una superficie aproximada de 2,714 km² y se localiza en la porción suroriental del Estado de Hidalgo, entre los paralelos 19°36´ y 20°22´ de latitud norte y los meridianos 98°56´ y 99°38´ de longitud oeste.

Limita al norte con los acuíferos Ixmiquilpan y Chapantongo-Alfajayucan, al este con Actopan-Santiago de Anaya y Ajacuba, al sur con Tepeji del Río, al noroeste con el acuífero Huichapan-Tecozautla, todos ellos pertenecientes al estado de Hidalgo; al sureste con el acuífero Cuautitlán-Pachuca; al suroeste con Ixtlahuaca-Atlacomulco y al oeste con Polotitlán, estos tres acuíferos en el Estado de México.

Geopolíticamente abarca municipios del estado de Hidalgo y del Estado de México. En el estado de Hidalgo comprende totalmente los municipios de Atitalaquia, Atotonilco de Tula, Tezontepec de Aldama, Tlahuelilpan, Tlaxcoapan y Tula de Allende; parcialmente los municipios de Chilcuautla, Mixquiahuala de Juárez, Progreso de Obregón, Tepeji del Río de Ocampo, Tepetitlán y Tetepango; así como pequeñas porciones de los municipios de Ajacuba y Chapantongo. En el Estado de México abarca totalmente los municipios de Apaxco y Soyaniquilpan de Juárez; parcialmente los municipios de Chapa de Mota, Hueypoxtla, Jilotepec, Tequixquiac y Villa del Carbón; así como pequeñas porciones de Jiquipilco y Zumpango.

Finalmente, dentro del marco fisiográfico, de acuerdo con la clasificación de Raisz en 1964, la zona acuífera se ubica dentro de la Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico, la cual, se caracteriza por sus planicies construccionales escalonadas o valles fluviales, aluviales y lacustres, los cuales se encuentran poco disectados. La zona del acuífero tiene una ligera pendiente hacia el norte y la elevación aproximada es de 1900 msnm.

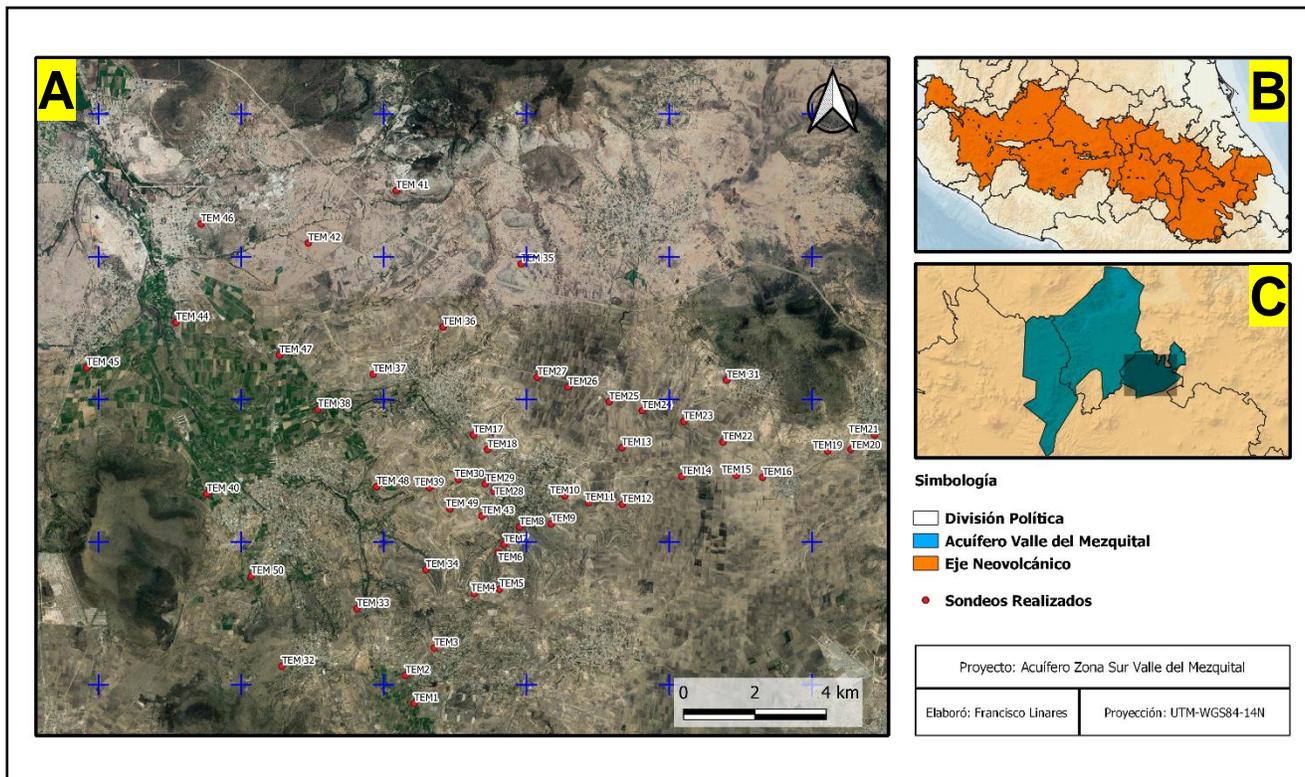


Figura 2 – A Distribución de los sondeos realizados en campo; B) Provincia fisiográfica Eje Neovolcánico; C) Localización del acuífero Valle del Mezquital.

Localmente, la superficie del acuífero se encuentra en dos subprovincias, la porción sur-suroccidental ubicada en Lagos y Volcanes de Anáhuac; y la región norte y occidental se encuentra en la subprovincia Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo, la cual, se diferencia por la edificación de significativos espesores lávicos y piroclásticos característicos del Eje Neovolcánico.

4.2 Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por Enriqueta García, para las condiciones de la República Mexicana, en la porción norte y noroeste del acuífero predomina el tipo de clima semiárido, templado (BS_1kw), en tanto que en la región centro y suroeste el clima es templado subhúmedo $C(w_1)$, ambos con un régimen de lluvias en verano, que se registra entre los meses de junio y septiembre. La temperatura media anual en la región varía de $8^{\circ}C$, en la parte topográficamente más alta, ubicada al suroeste del acuífero, y a



CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA EN LA PORCIÓN SUR DEL ACUÍFERO VALLE DEL MEZQUITAL MEDIANTE EL MÉTODO GEOFÍSICO DE TRANSITORIO ELECTROMAGNÉTICO EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

16°C en la región nororiental. La precipitación media anual en la región varía de 1200 mm en la porción suroeste a 500 mm en la zona del valle.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con la información de seis estaciones que tienen influencia en la superficie del acuífero: Tula, Presa Endhó, Atotonilco, Tezontepec, Mixquiahuala y Tepeji. No todas las estaciones tienen registro continuo para un mismo periodo, por lo que se optó por determinar la temperatura de la información disponible de las estaciones climatológicas y la precipitación a partir del mapa de isoyetas del INEGI, (anuario estadístico del Estado de Hidalgo, 2010). De esta manera, se obtuvieron valores de precipitación y temperatura media anual de 600 mm y 16°C respectivamente.

4.3 Geomorfología

En la superficie cubierta por el acuífero se distinguen 3 principales unidades geomorfológicas y topofomas (Figura 3), que son:

- A) Valle:** corresponde al Valle del Mezquital, el cual, es una región plana con una ligera pendiente hacia el norte que se eleva a una altitud promedio de 1840 msnm. Se extiende por una superficie de alrededor de 2000 km² y se encuentra disectado en su porción sur por los ríos El Salto y Salado, y en su margen occidental por el Río Tula. En este valle se localiza el Distrito de Riego 003 Tula que utiliza las aguas residuales procedentes de la Ciudad de México, que para su distribución utiliza una extensa red de canales.
- B) Sierras volcánicas:** están conformadas principalmente por andesitas, basaltos, tobas y brechas. Destaca por su magnitud, la sierra ubicada entre Tepeji del Río y Jilotepec, la cual está constituida por un gran número de conos volcánicos y flujos de lava, cuya altitud alcanza hasta 3000 msnm. El sistema de drenaje es irregular y variado. Al poniente de Tula, de la presa Endhó a Mixquiahuala, existen otras sierras volcánicas que presentan formas redondeadas y se elevan hasta 200 m sobre la altura del valle. Hacia el oriente del Valle del Mezquital, entre los poblados de Santiago Tezontlale,



CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA EN LA PORCIÓN SUR DEL ACUÍFERO VALLE DEL MEZQUITAL MEDIANTE EL MÉTODO GEOFÍSICO DE TRANSITORIO ELECTROMAGNÉTICO EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

Tlaxcoapan y Apaxco, se encuentran otras elevaciones topográficas conformadas por rocas volcánicas.

C) Sierras calcáreas: se localizan en la porción nororiental del acuífero, destacando entre ellas la Sierra de Xochitlán, que corresponde a una elevación topográfica formada por calizas del Cretácico, que se eleva a 2400 msnm y a 200 m sobre el nivel del valle, presenta formas redondeadas y un sistema de drenaje irregular.

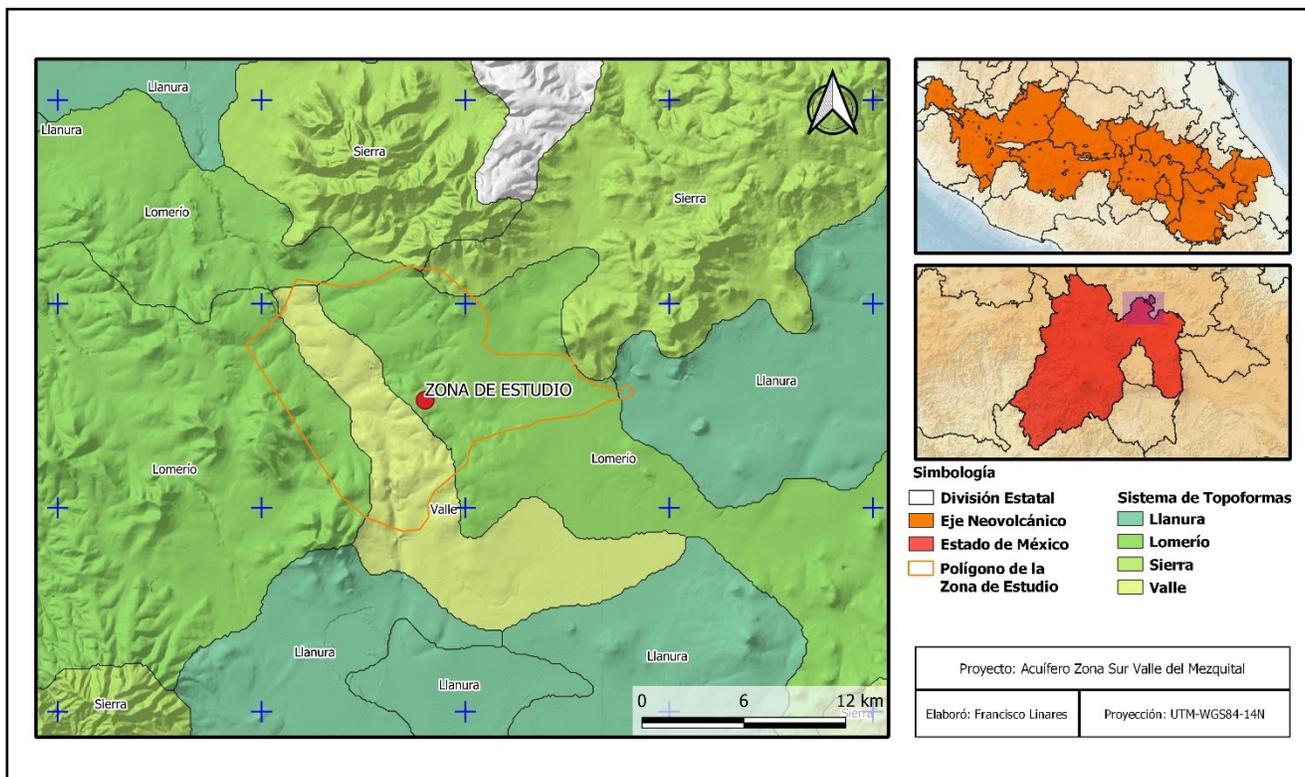


Figura 3 Mapa del Sistema de Topoformas de la Zona de Estudio.



4.4 Geología

4.4.1 Estratigrafía

Las características de cada unidad se describen a continuación de la más antigua a la más reciente, cabe mencionar que solo se describirán aquellas que se encuentren dentro del rango de profundidad del estudio realizado:

Paleógeno - Neógeno

Formación Tarango: *Los sedimentos clásticos de relleno de valles antiguos erosionados activan y profundamente por el Río Tula y sus efluentes, fueron relacionados con la Formación Tarango en el área por Segerstrom y por Fries en 1962, a partir de la definición original de Bryan en 1948 en la localidad tipo ubicada al poniente de la ciudad de México, sobre el flanco poniente de la Sierra Las Cruces. Gran parte del área está cubierta por la Formación Tarango, la cual aflora extensamente en la zona del parteaguas hidrográfico con la Cuenca de México, entre las poblaciones de Tepeji del Río, Tula de Allende y Ajacuba; en el flanco poniente de la Sierra Actopan; en el flanco oriente de las Sierra Xinthé y sierras ubicadas más al sur; así como en las faldas del Cerro San Miguel de La Cal.*

La mayor parte de la formación fue depositada por corrientes de agua superficial, por lo que está constituida por gravas, arenas, limos y arcillas, acumulados sobre antiguos cauces fluviales, llanuras de inundación y abanicos aluviales. Estos sedimentos clásticos están dispuestos generalmente en estratificación horizontal pero sus capas tienden a ser discontinuas lateralmente. También, se intercalan localmente con capas de tobas de grano fino y arenas pumíticas re-transportadas o procedentes de erupciones volcánicas contemporáneas. Localmente presenta sedimentos lacustres en forma de interestratos de arcillas, margas y tierras diatomáceas, lo que indica una interrupción del drenaje fluvial para formar pequeños lagos de corta duración. Existen depósitos de lentes de caliza con espesores hasta de 12 m en zonas cercanas a las localidades San Marcos, Atotonilco, Tula, Ajacuba y Tezontepec de Aldama, Hidalgo, así como Apaxco y Hueypoxtla-Tlapanloyan, en el Estado de México. Casi en todas estas localidades existen manantiales termales, lo que



CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA EN LA PORCIÓN SUR DEL ACUÍFERO VALLE DEL MEZQUITAL MEDIANTE EL MÉTODO GEOFÍSICO DE TRANSITORIO ELECTROMAGNÉTICO EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

hace pensar que las calizas tuvieron cierta relación con los manantiales ancestrales, Fries en 1962. En la localidad tipo, afloran tobas, brechas, gravas volcánicas de origen fluvial y delgadas capas de pómez, todas ligeramente endurecidas y relacionadas con depósitos de lahar y abanicos aluviales por Fries en 1956. En la zona de la localidad tipo, identifican una serie de sucesiones piroclásticas, que comienzan con capas delgadas de pómez de caída y de ceniza-lapilli de oleadas (surges), seguida por gruesos paquetes de tobas y brechas de flujo, generalmente no soldadas, y termina con una capa delgada de cenizas vítreas de nube piroclástica.

La Formación Tarango tiene aproximadamente 400 m de espesor total. Fue depositada en una superficie de erosión que se desarrolló sobre todas las unidades litológicas anteriores, de manera que puede encontrarse igualmente encima de las rocas cretácicas más antiguas, como encima de los depósitos lacustres del Plioceno Medio; se presenta interestratificada con los Basaltos San Juan.

La edad de la Formación Tarango se estima que corresponde al Plioceno Superior, basado en principios geológicos y geomorfológicos, por lo que se correlaciona con la Formación Atotonilco El Grande, que se encuentra en la cuenca hidrográfica de los Ríos Amajac y Metztlán. Según Fries en 1962, la acumulación de los sedimentos que la conforman comenzó debido a una combinación de causas. Indudablemente la extravasación de las lavas máficas de los Basaltos San Juan, continuamente ocasionaron interrupciones locales del desagüe fluvial. El surgimiento de bloques inclinados debidos a movimiento de fallas normales también pudo haber sido una de las causas de la sedimentación. Un cambio marcado de clima pudo haber iniciado también la sedimentación de los detritos clásticos, que consistiría en el advenimiento de una mayor aridez, caracterizada por la presencia de lluvias torrenciales y periodos de estiaje.

Las secciones geológicas muestran que esta formación está afectada por fallas normales, constituye la mayor parte del relleno granular del valle y sobreyace en discordancia erosional a diferentes unidades más antiguas.



Cuaternario

Derrames de Lava y Conos Cineríticos: *los derrames basálticos de lava y conos cineríticos definidos por Segerstrom en 1961 como Basalto del Pleistoceno, posteriormente fueron referidos como derrames de lava y conos cineríticos de edad cuaternaria por Fries en 1962, separándolos de las rocas volcánicas máficas definidas con el criterio de que estos derrames fueron extravasados después de que comenzara a disecarse la Formación Tarango y los conos cineríticos o escoriáceos conservan su forma característica.*

Depósitos clásticos: *corresponden a sedimentos aluviales y fluviales, constituidos por arenas, arcillas y gravas acumuladas sobre la superficie actual del valle y a lo largo del lecho y márgenes de ríos y arroyos. Presenta espesores reducidos y se encuentran cubiertos por suelo residual (Figura 4).*

4.4.2 Geología Estructural

Los principales rasgos estructurales corresponden a fallas de tipo normal, que se han cartografiado tanto por lineamientos topográficos superficiales, como por el resultado de sondeos geofísicos e interpretación de imágenes de satélite. En general, dan origen a fosas tectónicas donde se han acumulado los sedimentos granulares y volcánicos en los principales valles de la región. Los pilares tectónicos están representados por el Cerro San Miguel al norte y el área de Bomintzhá al sur. Corresponden a remanentes de rocas calcáreas del Cretácico, que se encuentran aflorando; sin embargo, sus flancos se encuentran cortados por fallas, generalmente de tipo normal, aunque en la Sierra San Miguel se ha interpretado una falla de tipo recumbente.

4.4.3 Geología del subsuelo

Con base a la información geológica y geofísica recabada de estudios previos como de la presente investigación, es posible definir los espesores y la geometría del subsuelo del acuífero.



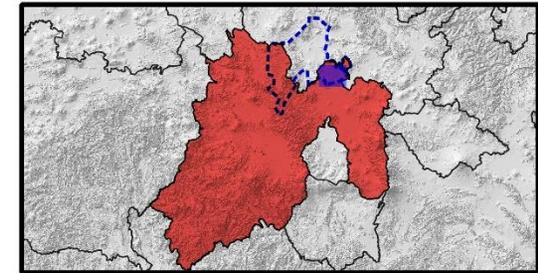
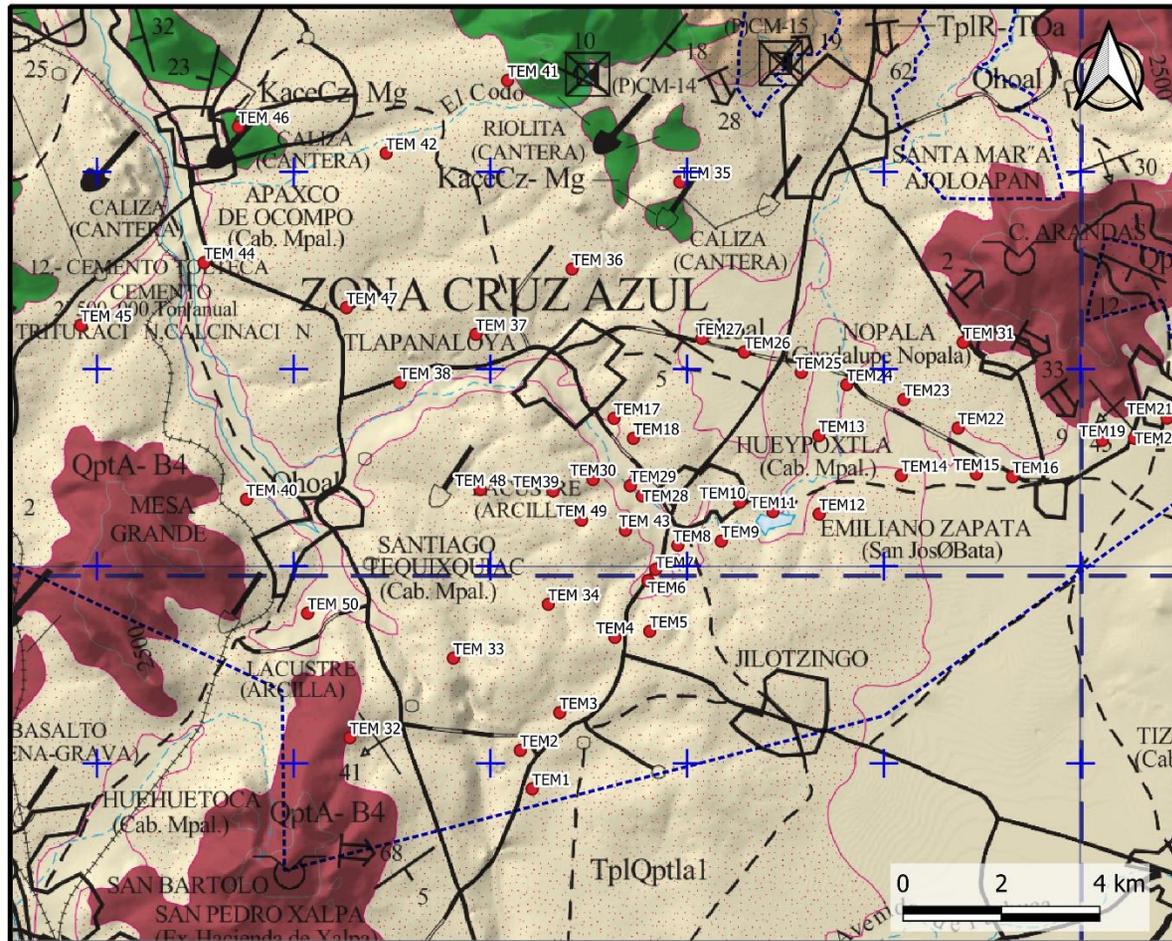
CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA EN LA PORCIÓN SUR DEL ACUÍFERO VALLE DEL MEZQUITAL MEDIANTE EL MÉTODO GEOFÍSICO DE TRANSITORIO ELECTROMAGNÉTICO EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

La mayor parte del subsuelo se encuentra constituido por sedimentos y materiales granulares de origen continental, interdigitados con productos volcánicos. El basamento de los depósitos granulares y de las rocas volcánicas, está constituido por rocas marinas calcáreo-arcillosas del Cretácico, de las que se desconoce su potencial geohidrológico.

En prácticamente toda la zona, se encuentra una capa de basaltos a profundidad somera que varía de 10 a 60 m aproximadamente, cuya presencia es muy importante desde el punto de vista geohidrológico por su alta permeabilidad, la cual funciona como zonas de recarga. En la porción occidental del valle, se ha detectado otra capa de basaltos a mayor profundidad que varía de 90 a 120 m. Finalmente, encajonando a los basaltos, se encuentran materiales granulares, sedimentos lacustres y tobas de la formación Tarango, en un paquete de 300 a 600 m de espesor.



**CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA EN LA PORCIÓN SUR DEL ACUÍFERO VALLE DEL MEZQUITAL
MEDIANTE EL MÉTODO GEOFÍSICO DE TRANSITORIO ELECTROMAGNÉTICO EN EL DOMINIO DEL
TIEMPO**



Simbología

- Sondeos Realizados
- Estado de México
- División Política
- ▭ Acuífero Valle del Mezquital

CUATERNARIO

- Qhoal ALUVIÓN
- Qho-lin-ar LIMO - ARENA
- QptA-B4 ANDESITA - BASALTO

TERCIARIO NEÓGENO

- TplQpt-la-l LACUSTRE

CRETÁCICO INFERIOR

- Kace-Cz-Mg CALIZA - MARGA

CIUDAD DE MÉXICO E14-2

Proyecto: Acuífero Zona Sur Valle del Mezquital

Elaboró: Francisco Linares

Proyección: UTM-WGS84-14N

Figura 4 – Mapa de geología regional de la zona de estudio (tomada de SGM, Carta Ciudad de México E14-2).

4.4.4 Descripción de la geología de la zona

Como se mencionó anteriormente, el área de estudio es muy extensa, y, debido a esto, durante el levantamiento geofísico, en la mayoría de los sondeos realizados se pudieron apreciar una gran diversidad de afloramientos. Se muestra en primer lugar una capa de relleno correspondiente al suelo natural (Figura 5), conformado por sedimentos finos, producto de la erosión de las zonas altas. Por otro lado, en las cercanías de algunos TEM's se presentaron afloramientos de materiales tanto de origen sedimentario como de origen volcánico.



Figura 5 – Fotografías de la zona de estudio en donde se aprecia el suelo de relleno (aluvión).

Un primer avistamiento de materiales sedimentarios como afloramientos de calizas con pedernal (Figura 6), se dio en las cercanías de los sondeos ubicados dentro del municipio de Apaxco, el cual es conocido por ser un municipio donde su principal actividad productiva es la explotación minera para la fabricación de cemento y cal.



CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA EN LA PORCIÓN SUR DEL ACUÍFERO VALLE DEL MEZQUITAL MEDIANTE EL MÉTODO GEOFÍSICO DE TRANSITORIO ELECTROMAGNÉTICO EN EL DOMINIO DEL TIEMPO



Figura 6 – Fotografías de la zona de estudio que muestra afloramientos de caliza en los diferentes puntos de estudio.

Por otro lado, en la parte centro-sur del área estudiada (en las cercanías con los TEMs 1, 2 y 3), se pudieron apreciar algunos afloramientos de materiales volcánicos como basaltos, y tobas andesíticas (Figura 7).



Figura 7 – Fotografías de la zona de estudio que muestran afloramientos de rocas volcánicas de diferente composición.



4.5 Hidrogeología

4.5.1 Tipo de Acuífero

Las evidencias hidrogeológicas y geofísicas permiten definir la presencia de un acuífero de tipo libre a semiconfinado de tipo heterogéneo y anisotrópico constituido, en su porción superior, por una alternancia de materiales granulares aluviales, rocas volcánicas y sedimentos piroclásticos, que en conjunto presentan permeabilidad media y su espesor promedio es de 300 m; en su porción inferior está conformado por rocas volcánicas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. Las barreras al flujo subterráneo se da por los grandes paquetes de material poco permeable que alcanzan espesores de hasta 400 m en algunas zonas; y finalmente, el basamento geohidrológico está representado por rocas volcánicas y/o sedimentarias cuando a profundidad desaparece su fracturamiento, especialmente las rocas riolíticas Don Guinyó y del Grupo Pachuca, Grupo el Morro y a mayor profundidad la secuencia de lutitas, limolitas y areniscas que constituyen las formaciones Mexcala y Soyatal.

A mayor profundidad, las rocas calizas cretácicas pueden alojar un acuífero confinado por sedimentos lacustres y rocas arcillosas, cuya manifestación se presenta en algunos pozos artesianos en el área de San Salvador, localizado en el acuífero vecino Actopan-Santiago de Anaya.

4.5.2 Profundidad al Nivel Estático

De acuerdo con los resultados de las mediciones a la profundidad del agua en los pozos realizadas en el 2012, se identificó una unidad acuífera somera con profundidad al nivel estático menor de 10 m y uno más profundo a partir de 40 m, en la zona del acuífero, predominan los valores que varían entre 40 y 100 m, los cuales se incrementan por efecto topográfico desde el valle y las zonas de cuerpos de aguas superficiales hacia las estribaciones de las sierras que lo delimitan.

Los valores más someros (10-40m) se presentan cerca de la Presa Endhó, localizada hacia el sur, a lo largo de los ríos el Salto y Salado; y en la superficie del valle, entre Tezontepec,



Mixquiahuala, Tlahuelilpan, Tlaxcoapan y Atitalaquia, asociados a los canales de riego y a la recarga inducida ocasionada por el riego con aguas residuales.

Los valores más profundos (60-100m), se registran hacia los flancos del Valle, donde la topografía del terreno se eleva. Cerca de las localidades de El Progreso y Xochitlán, la profundidad al nivel estático varía entre 40 y 60 m; al suroriente de Mixquiahuala, se registraron valores que varían de 70 a 100 m; al oriente del Valle, entre Muntepec y la entrada al Valle de Ajacuba, los valores oscilan entre 50 y 80 m. En la parte sur del Valle, al sur de Atitalaquia y sobre los flancos del Río Salado, el nivel del agua se encuentra a 50 m de profundidad, aproximadamente.

4.5.3 Elevación del Nivel Estático

La configuración de elevación del nivel estático para el 2012 presenta valores que varían de 2200 msnm, que se registran en la porción suroriental del acuífero, a 1920 msnm en la región norte, incrementándose gradualmente en dirección al sur, mostrando de esta manera la dirección preferencial del flujo subterráneo sur-norte, con alimentaciones provenientes de los flancos oriental y occidental. Al norte de Tequixquiac se registran las mayores elevaciones con 2200 msnm., que disminuyen hacia el norte del valle siguiendo la topografía del terreno, hacia Mixquiahuala y el Río Tula, en donde existe una componente de flujo subterráneo que tiende a descargar en forma de flujo base.

4.5.4 Hidrografía

El acuífero Valle del Mezquital se encuentra ubicado dentro de la Región Hidrológica (RH) 26 Pánuco, Subregión Hidrológica Río Tula, en la cuenca Río Moctezuma.

La mayor parte del flujo hidrográfico drena desde la porción sureste, la corriente principal es el Río Tula; otros ríos importantes son Salado, El Salto, Rosas, San Jerónimo, así como numerosos arroyos que forman parte de la red hidrográfica (Figura 8).



CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA EN LA PORCIÓN SUR DEL ACUÍFERO VALLE DEL MEZQUITAL MEDIANTE EL MÉTODO GEOFÍSICO DE TRANSITORIO ELECTROMAGNÉTICO EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

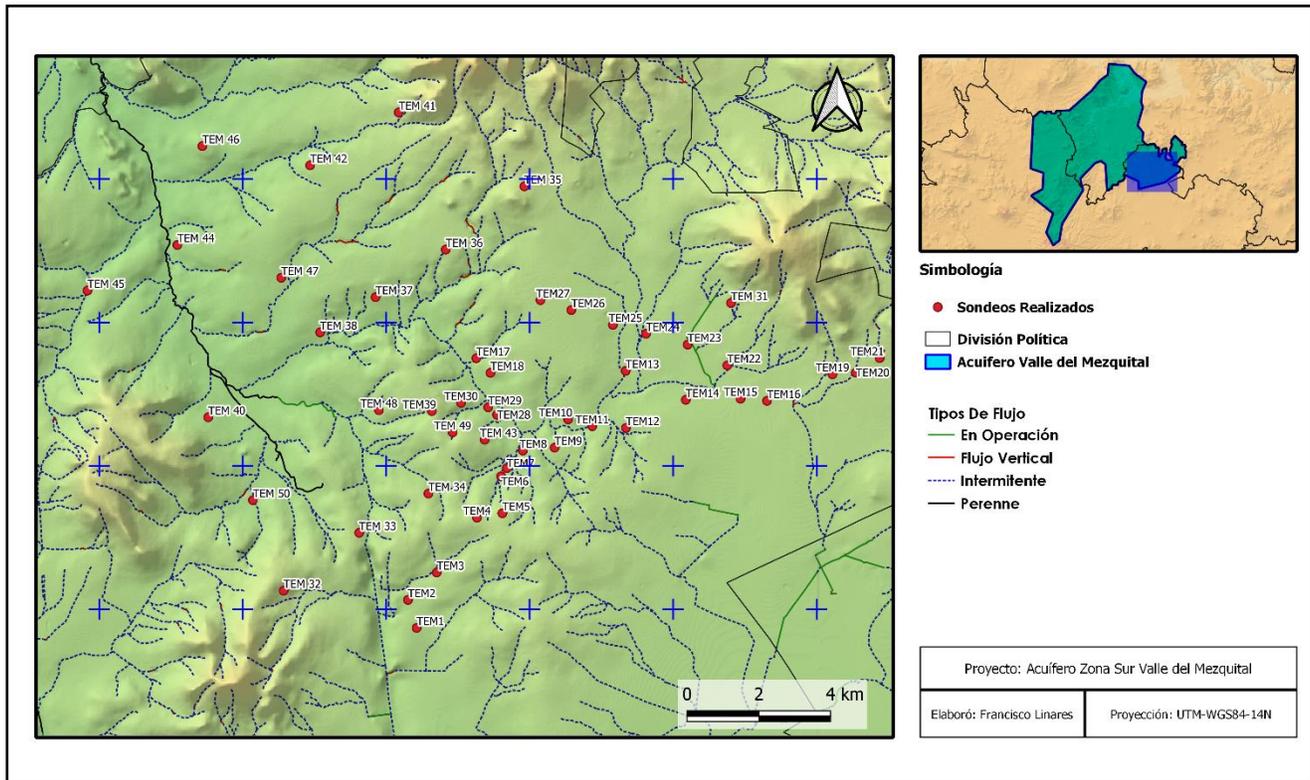


Figura 8 – Mapa de red hidrológica superficial correspondiente a la zona de estudio.

Como parte de la infraestructura hidráulica existen canales de agua superficial en los distritos de riego, acueductos e importantes presas como la Presa Endhó y la Presa Requena, ubicadas en la porción sur, en los límites con el acuífero Tepeji del Río y la presa Santa Elena, localizada en los límites con el acuífero Polotitlán, del Estado de México.

El colector más importante es del Río Tula, que en su origen se conoce como río Tepeji, entre las presas Taxhimay y Requena, tramo en que recibe los aportes de los ríos Oro, Sabinos y San Jerónimo. Aguas abajo, el río Tepeji es interceptado por la presa Requena para contener y controlar sus descargas; a la salida de esta presa se inicia el río Tula que descarga más adelante a la presa Endhó, aguas debajo de la presa Requena se suman las aguas negras del río el Salto y del emisor central que conduce las aguas residuales procedentes de la Ciudad de México. Por otra parte, el río el Salto es la continuación del tajo de Nochistongo, obra que es utilizada para dar salida a las aguas negras del sector poniente de la Ciudad de México; el río Salado recibe aportaciones del antiguo túnel de Tequixiac.

4.5.5 Profundidad de los Pozos de Extracción

Por medio de la fuente “CartoCrítica”, se consultó el mapa que muestra las profundidades de Perforación de Pozos de Agua; este mapa está elaborado con datos del Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) de la CONAGUA. Con él es posible conocer una profundidad media a la que se extrae el agua del subsuelo por medio de pozos, y por ende una profundidad aproximada del manto freático. No obstante, los datos arrojados no son precisos, debido a que no considera la geología del subsuelo y su permeabilidad, o bien, puede incluir datos de pozos someros o la información que se tiene de la zona es muy pobre y desactualizada.

Debido a que la zona de estudio es muy extensa, la profundidad de los pozos es muy variable y está sujeta a diversos factores como la elevación topográfica a la que se encuentra cada sondeo (Anexo 1: Figura 1.4), para el caso de la zona donde se realizaron las pruebas geofísicas de campo, el intervalo de profundidad de los pozos para la extracción de agua varía de 200 a 700 m, sin embargo, se aprecia algunas zonas en donde la profundidad mostrada está en el rango de 50 a 100 m, estando asociado este a posibles norias en la zona (Figura 9).

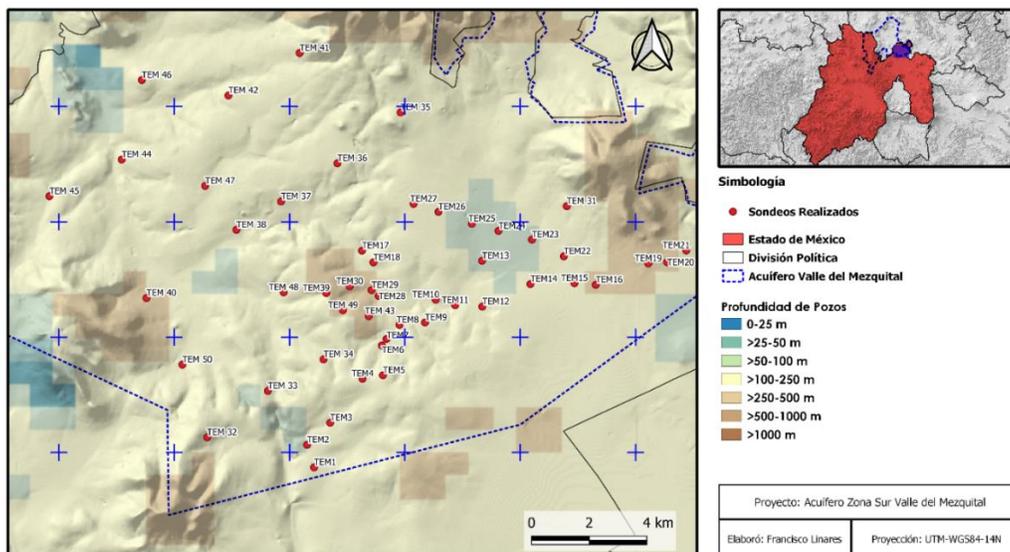


Figura 9 – Mapa de profundidades de los pozos de extracción (elaborado con datos del REPGA).



5. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, que establece la metodología para calcular la disponibilidad media anual de las aguas nacionales, en su fracción relativa a las aguas subterráneas, menciona que la disponibilidad se determina por medio de la siguiente expresión:

$$DMA = R - DNC - VEAS \quad (1)$$

Donde:

DMA: Disponibilidad media anual de agua subterránea en una unidad hidrogeológica

R: Recarga total media anual

DNC: Descarga natural comprometida

VEAS: Volumen de extracción de aguas subterráneas

5.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde a la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como inducida. Para este caso, el valor estimado de la recarga total media anual que recibe el acuífero es de 515.0 hm³/año; de los cuales 171.8 hm³ corresponden a la recarga natural y 343.2 hm³ son recarga inducida.

5.2 Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se estimó sumando los volúmenes de agua concesionado de los manantiales y del caudal base de los ríos que están comprometidos como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y/o prevenir la migración de mala calidad hacia el acuífero.

Para este caso, el volumen considerado como descarga natural comprometida es de 293.0 hm³ anuales, que representa la parte proporcional de agua subterránea (flujo base y manantiales) que le corresponde al acuífero Valle del Mezquital, para garantizar el volumen



total de agua que tiene concesionado la Presa Zimapán para generación eléctrica. Por lo tanto, la DNC = 293.0 hm³/año.

5.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de 184,426,430 m³ anuales, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del 20 de febrero del 2020.

5.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

La disponibilidad de aguas subterráneas constituye el volumen medio anual de agua subterránea disponible en un acuífero, al que tendrán derecho de explotar, usar o aprovechar los usuarios, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro a los ecosistemas. Conforme a la metodología indicada en la norma referida anteriormente, de acuerdo con la expresión 1, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de aguas subterráneas concesionado e inscrito en el REPGA.

$$DMA = R - DNC - VEAS$$

$$DMA = 515.0 - 293.0 - 184.426430$$

$$DMA = 37.573570$$

*El resultado indica que existe un volumen anual disponible de **37,573,570 m³** para otorgar nuevas concesiones.*



6. MÉTODO EMPLEADO (TEM)

6.1 Antecedentes

El método por transitorio electromagnético en el dominio del tiempo, se conoce por sus siglas en inglés como TEM (Transient Electromagnetic Method).

En la aplicación de este método, el objetivo principal fue conocer la distribución de la resistividad eléctrica de los diferentes materiales que constituyen el subsuelo a profundidades medias entre 600 y 650 m. Por tal motivo, se pretende que el estudio en cuestión alcance profundidades de investigación de hasta 650 m de profundidad con el fin de determinar la respuesta eléctrica del subsuelo en las diferentes zonas del acuífero.

En términos generales la interpretación consiste en asociar los valores de resistividad a formaciones con diferentes litologías propias del área, de tal manera que los menores a 15 Ωm de resistividad corresponden a materiales arcillosos, los comprendidos en el intervalo de 15 a 25 Ωm a materiales limosos, de 25 a 40 Ωm a materiales areno-limosos, de 40 a 90 Ωm a materiales arenosos, de 90 a 400 Ωm a materiales gravosos y mayores a 400 Ωm a presencia de roca, dentro de estos últimos los de muy alta resistividad pudieran estar asociados a grandes fracturamientos (muy alta permeabilidad) o a roca sana. Estos valores de resistividad están calibrados con valores reales de resistividad por medio de registros geofísicos de pozo realizados muy cercanos a la zona de estudio.

En el campo de la Ingeniería Geofísica, la Técnica del Transitorio Electromagnético en el Dominio del Tiempo (TEM), es una de las técnicas geofísicas más modernas para la exploración del subsuelo, tanto en equipos de medición como en el soporte técnico-científico para la interpretación de los datos medidos.

Con el método electromagnético (TEM) se pretende mostrar una distribución del subsuelo en términos de homogeneidad basados en la caracterización resistiva. Debido a la gran resolución vertical que se obtiene con esta técnica, es posible obtener una imagen lo más real posible de las condiciones del subsuelo. En las secciones geoeléctricas es posible observar las heterogeneidades (zonas anómalas) debidas a estructuras geológicas,



cambios de facies y fracturamiento de la roca, lo cual provoca cambios importantes en la resistividad que es el parámetro experimental de campo que se mide.

Los métodos electromagnéticos (EM) se introdujeron hace más de 50 años, en la exploración de sulfuros masivos (cuerpos muy conductores). Las medidas eran originalmente hechas en el dominio de frecuencia, a una sola frecuencia en CA (Corriente Alterna) donde las amplitudes de los campos primarios y secundarios eran medidas simultáneamente. Esta opción se reemplazó rápidamente por el uso de un pulso cuadrado conmutado (una señal repetida de DC), permitiendo el examen de los campos inducidos en el intervalo entre los pulsos, es decir en la ausencia del campo primario. En el caso de sistemas de medición con el campo primario apagado, como el empleado aquí, lo que es de interés es el decaimiento de la señal con respecto al tiempo cuando la señal del transmisor está apagada.

6.2 Principio físico del método

Un transmisor envía un pulso de corriente cuadrado repetido en una bobina de alambre. A la terminación de cada pulso, un campo magnético al mismo tiempo se genera de acuerdo con las ecuaciones de *Maxwell*. A su vez, este campo primario induce corrientes transitorias inmediatamente en la tierra por debajo de la bobina del transmisor las cuales se difunden hacia abajo a una velocidad proporcional a la resistividad de la tierra (Nabighian, 1979). Un receptor en la superficie puede medir las variaciones del campo magnético secundario asociado con esta corriente. La fuerza del campo disminuye (rápidamente) con el tiempo, y el análisis de estos cambios se puede conocer la distribución de resistividad con respecto a la profundidad.

En la mayoría de los casos, lo que es medido es la razón temporal del cambio del campo magnético secundario en la dirección vertical, esto se logra midiendo los voltajes inducidos en una bobina que actúa como transmisora y receptora a la vez (configuración single loop). El receptor graba los voltajes en forma discreta en varios canales, produciendo una curva de decaimiento de voltaje contra el tiempo (Díaz, 2016), (Figura 10).

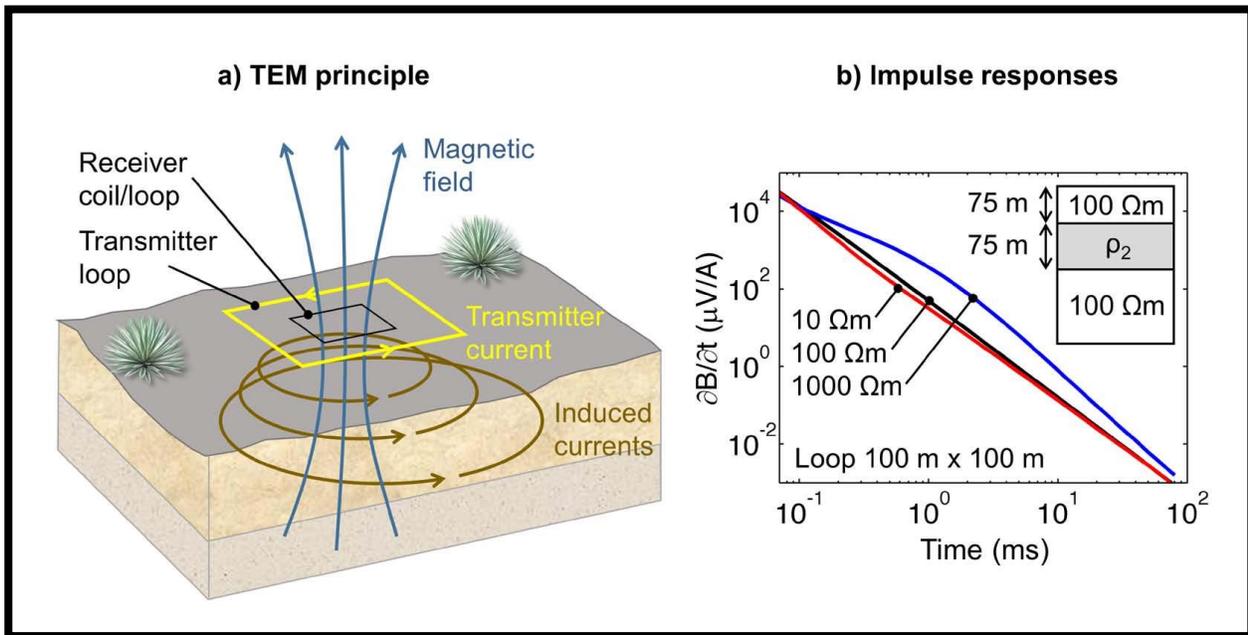


Figura 10 – Representación esquemática del fenómeno de inducción electromagnética (Imagen tomada del Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana).

6.3 Procedimiento de levantamiento geofísico

6.3.1 Pruebas y calibraciones

Las pruebas se realizaron para loops cuadrados con una bobina simple (Figura 11), las ventanas de tiempo fueron de entre 51 y 53, y la ganancia empleada fue automática con apilamientos de 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024 y 2048, esto quiere decir que se realizaron once mediciones por sitio.

La actividad previa a las mediciones fue:

- Pruebas del funcionamiento del equipo Terratem.
- Conexiones para bobina transmisora (Tx) y receptora (Rx).
- Determinar la rampa y *sampling delay* adecuado para la adquisición.
- Análisis de fuentes de ruido y la utilización de filtros (si requiere el caso).
- Análisis de la serie de tiempo y la calidad de los datos (profundidad de investigación).
- Decidir cuantas mediciones se realizarán por sondeo.

Estas pruebas dieron como resultado que el arreglo denominado *Single Loop* generara una resistencia de menos de 4 Ωm en todo el tendido, una intensidad de corriente que varió entre 7 y 10 Amperes y una serie de tiempo de entre 75 y 100 milisegundos.

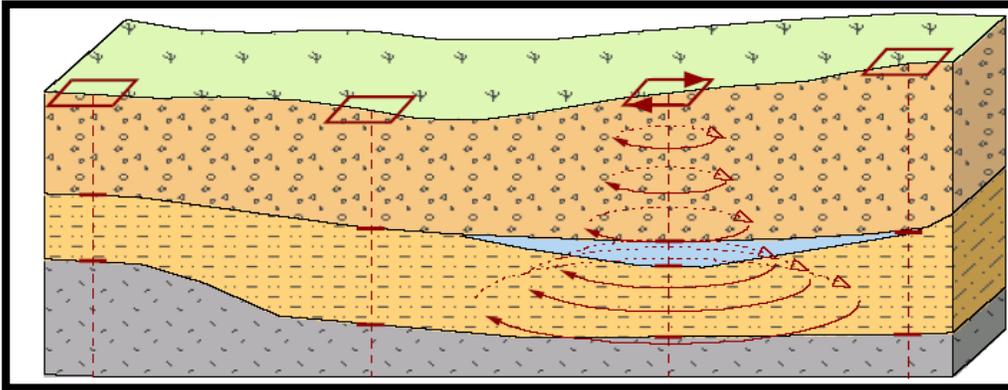


Figura 11 – Arreglo Loop Bobina Simple (Imagen tomada de Northwest Geophysical Associates, Inc).

La medición se configuró con la serie de tiempo "Sirotem MK3 High Resolution", Sampling Delay no mayor a 530 μ s. Para obtener una idea a que profundidad se pretende investigar, se ejemplificará este proceso por medio de la expresión (2) de profundidad de investigación (Vozoff, 1972) con las resistividades obtenidas en campo y el promedio de los milisegundos alcanzados en las series de tiempo de cada sondeo (skin depth).

$$\delta_{TEM} = \sqrt{\frac{2t}{\mu\sigma}} \quad (2)$$

Donde:

t = Tiempo de decaimiento

μ = Permeabilidad magnética del espacio libre ($4\pi \times 10^{-7}$ H/m)

σ = Conductividad eléctrica del medio geológico

Teniendo estos datos, sustituiremos estos valores en la expresión para obtener el Skin Depth con respecto a los sondeos realizados, cabe mencionar que la conductividad es la inversa de la resistividad, es decir $1/\rho$.



Caso 1

$$\text{Para } t = 0.02 \text{ s, } \sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{10\Omega m}, \mu = 4\pi \times 10^{-7}$$

Sustituyendo en la expresión:

$$\delta = \sqrt{\frac{2(0.02)}{(4\pi \times 10^{-7})(10)}} = \mathbf{564.18 \text{ m}}$$

Caso 2

$$\text{Para } t = 0.05 \text{ s, } \sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{50\Omega m}, \mu = 4\pi \times 10^{-7}$$

Sustituyendo en la expresión:

$$\delta = \sqrt{\frac{2(0.05)}{(4\pi \times 10^{-7})(50)}} = \mathbf{398.94 \text{ m}}$$

Caso 3

$$\text{Para } t = 0.1 \text{ s, } \sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{5000\Omega m}, \mu = 4\pi \times 10^{-7}$$

Sustituyendo en la expresión:

$$\delta = \sqrt{\frac{2(0.05)}{(4\pi \times 10^{-7})(5000)}} = \mathbf{56.41 \text{ m}}$$

Calculando las siguientes expresiones se obtiene la profundidad de investigación del medio, es importante mencionar que mientras mayor sea el tiempo de adquisición, mayor será la profundidad de investigación, sin embargo, si el medio es muy resistivo ocurrirá que el decaimiento del campo electromagnético será más rápido y por ende su profundidad de investigación será menor, como se muestra en el Caso 3.



CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLOGICA EN LA PORCIÓN SUR DEL ACUÍFERO VALLE DEL MEZQUITAL MEDIANTE EL MÉTODO GEOFÍSICO DE TRANSITORIO ELECTROMAGNÉTICO EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

Es importante mencionar que la corteza de la tierra no es un medio homogéneo, por lo tanto, estas profundidades son relativas debido a la estratigrafía del subsuelo donde hay intercalaciones de materiales conductores a muy resistivos.

Las ganancias empleadas y el número de apilamientos requeridos para cada curva se realizaron de acuerdo con la Tabla 1.

GANANCIA	APILAMIENTOS
AUTOMÁTICA	2
AUTOMÁTICA	4
AUTOMÁTICA	8
AUTOMÁTICA	16
AUTOMÁTICA	32
AUTOMÁTICA	64
AUTOMÁTICA	128
AUTOMÁTICA	256
AUTOMÁTICA	512
AUTOMÁTICA	1024
AUTOMÁTICA	2048

Tabla 1 – Parámetros utilizados en campo

Las mediciones se realizaron con las ganancias y apilamientos antes descritos y se efectuaron, por lo menos, dos lecturas para cada ganancia, si las condiciones de los sitios lo ameritaban, con el objetivo de incrementar la calidad de los datos.

Una ventaja de este equipo es observar las curvas de decaimiento inmediatamente después de tomada la lectura, si se observa ruido o errores por programación se puede repetir la lectura sin problemas, esta información se guarda en la memoria del equipo en forma digital, para su procesamiento posteriormente (Díaz, 2016).



6.3.2 Equipo Utilizado

El equipo utilizado fue el TerraTEM de la marca Monex Geo Scope, de fabricación australiana, batería Aerolyte con voltaje de 24 Volts y software integrado, versión 5.5 (Figura 12).

Como accesorios de campo se contó con:

- 2 carretes con 600 m de cable (#8) cada uno.
- 4 radios portátiles marca Motorola.
- 1 posicionador GPS marca Garmin.
- 1 brújula tipo Brunton.



Figura 12 – Equipo: TerraTEM Monex GeoScope, utilizado para los trabajos de campo.



6.4 Procesamiento de datos

La información obtenida en campo se descargó a una computadora para el procesamiento de los datos e interpretación. El procesamiento se efectuó inicialmente con programas de TerraTEM, los cuales consistieron básicamente en la evaluación de las mediciones en campo y limpieza de los datos para el modelado con software de *Interpex* conocido como TEMIXS y de *Geosystem* conocido como WinGlink. A continuación, se enlista de una manera breve el procedimiento que se realizó para el procesamiento de los datos:

- Transferencia de las mediciones del equipo a la computadora.
- Conversión de los archivos BIN a formato SIR.
- Importación de los archivos SIR y procesar los datos en TEMIXS para generar un modelo estratificado de 8 capas (interpretación interactiva).
- Obtener una curva de resistividad aparente contra tiempo.
- Importar los datos procesados a WinGLink.
- Ajustar las curvas y obtener perfiles geoeléctricos.

En TEMIXS se limpió la señal para después efectuar el modelado en una dimensión con un máximo de 8 capas, los cuales indican los espesores y resistividades presentes en el subsuelo de cada sitio de medición.

Después de este proceso, los datos se importan a WinGLink donde generalmente el software proporciona un error cuadrático RMS que permite ver que tan acoplados están los valores de campo con los valores obtenidos de la inversión (Anexo 6: Figura 6.1 a Figura 6.13); se considera que mientras más bajo sea este error mejor será nuestro resultado (Sandoval, 2019) para finalmente realizar los perfiles geoeléctricos y así interpretar los resultados; es importante generar estos perfiles de acuerdo a la distribución de los sondeos (Figura 13).



7. TRABAJO EN CAMPO

7.1 Localización de los sondeos por transitorio electromagnético

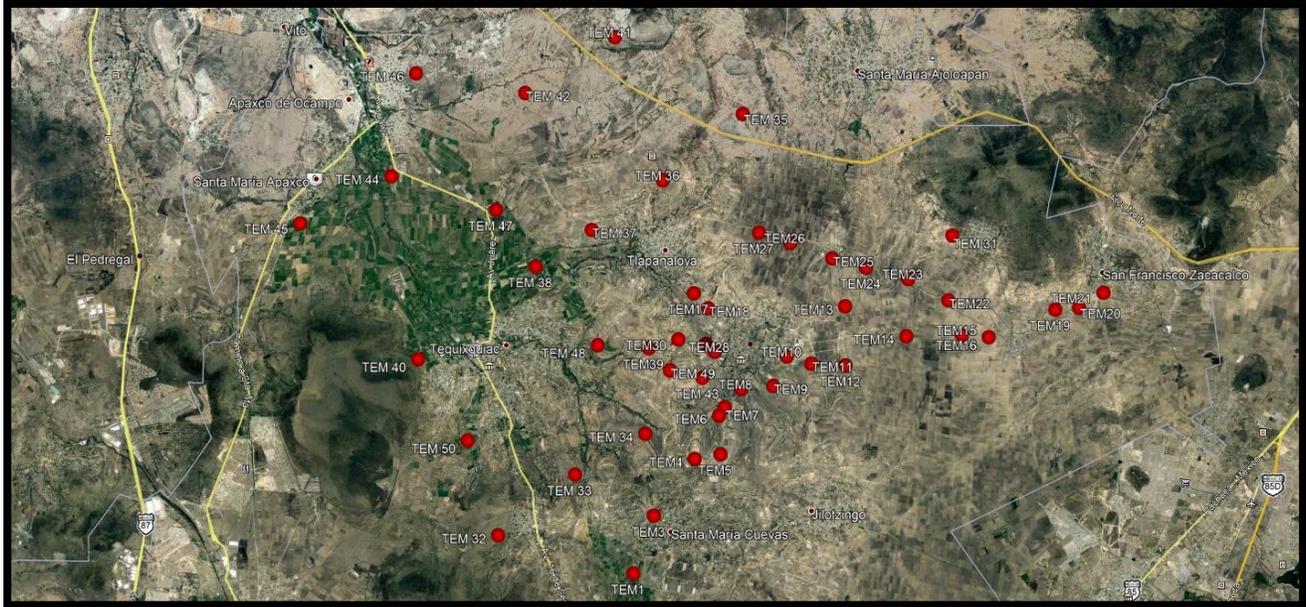


Figura 13 – Localización y distribución de los sondeos realizados en campo.

Con los TEMs realizados se hace una investigación a profundidad en el terreno, con lo cual se pretende conocer el subsuelo en la zona y evaluar las posibilidades acuíferas de este lugar.

Es importante mencionar lo siguiente:

Con este tipo de estudio se investiga las posibilidades acuíferas de una zona, más no es posible en la actualidad por medios indirectos conocer el volumen del gasto que tenga un pozo antes de perforarlo y aforarlo, ya que el gasto solo se puede calcular realizando la prueba mecánica de aforo, la cual nos mide el volumen de un fluido a través del tiempo.



7.2 Distribución de los perfiles geoelectrónicos obtenidos

Los perfiles geoelectrónicos son gráficas de valores de resistividad interpolados que permiten visualizar la distribución de dichos valores con respecto a la profundidad en cada uno de los sondeos levantados en campo, es decir, son el resumen del presente estudio y a través de ellos es posible observar y describir los paquetes litológicos encontrados a diferentes profundidades.

La Figura 14, muestra el trazado de los 13 perfiles obtenidos en el presente estudio, así como su distribución espacial dentro de la zona de interés.

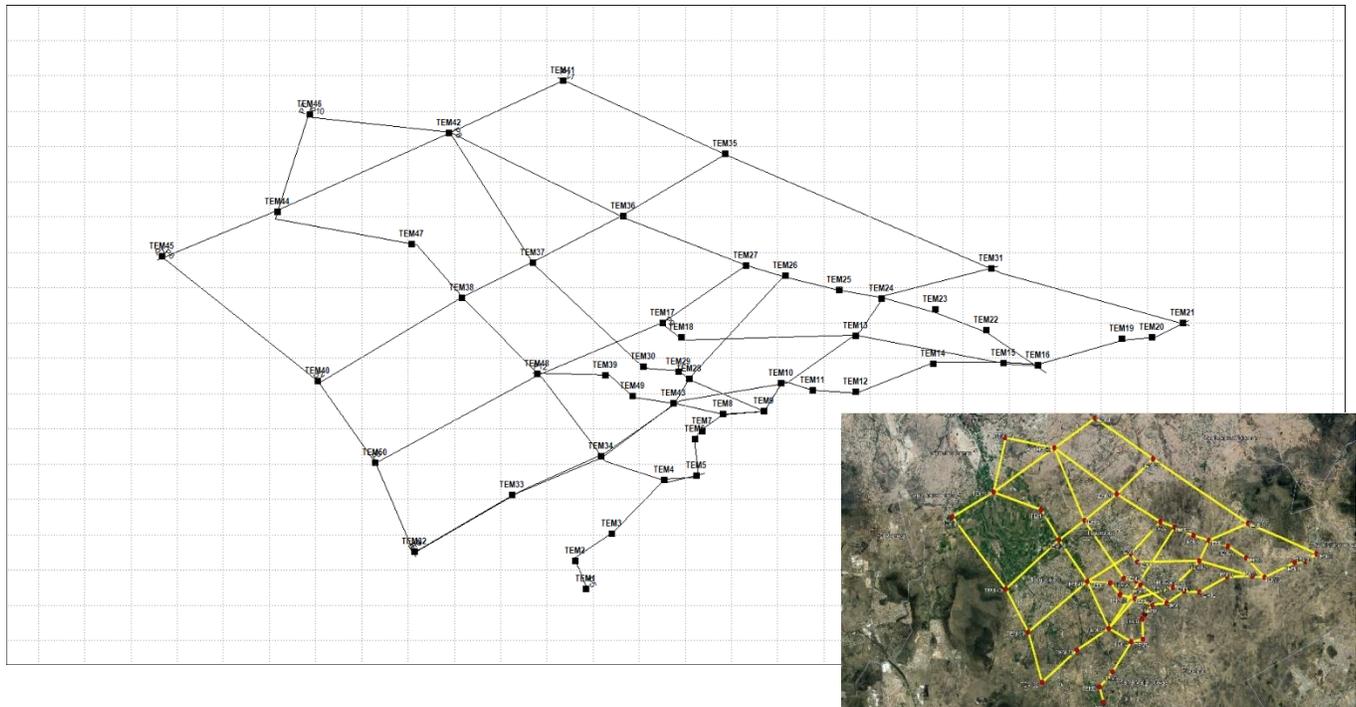


Figura 14 – Localización de los perfiles geoelectrónicos obtenidos con los sondeos.



8. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

8.1 Perfiles geoelectricos obtenidos

Se realizaron trece perfiles ubicados paralelo y perpendicularmente entre ellos e interceptados entre sí, esto con la finalidad de delimitar los horizontes geoelectricos (espesores) con las mejores posibilidades acuíferas. El comportamiento en general de las capas fue de resistivo a conductor en la zona norte noroeste y una porción en el suroeste, y, por otro lado, de la zona norte y noreste, existe una secuencia conductora a muy resistiva a mayor profundidad; se lograron identificar ocho unidades geoelectricas en donde se describirán a continuación.

Descripción de las unidades geoelectricas (Anexo 2: Figura 2.2 a Figura 2.14)

La **U1** se clasificará en dos fases litológicas (**U1-A** y **U1-B**) de origen volcánico. Se localizan en la zona más superficial y son predominantes en los primeros metros de profundidad. Representadas en colores de naranja a rojo y valores de entre 500 a 1000 Ωm , la **U1-B** se asocia a los derrames basálticos del cuaternario, estos derrames basálticos presentan diferentes grados de fracturamiento, esto quiere decir que su permeabilidad es buena de tipo secundario, funciona como capa permeable para la recarga del acuífero. Por otro lado, se encuentra la **U1-A**, con valores de resistividad de entre 100 a 500 Ωm , se asocia a material aluvial del cuaternario compuesto principalmente por material no consolidado como gravas, arenas, arcillas y sedimentos piroclásticos compactados, a pesar de que ambas unidades presentan buena permeabilidad, sus posibilidades acuíferas son pobres a nulas por la variación del nivel estático.

Generalmente, subyaciendo a la unidad anterior, se localiza la **U2**, representada en colores amarillo a verde y con valores de resistividad de 50 a 200 Ωm , se asocia a un paquete de tobas y brechas volcánicas no soldadas con poca presencia de arcilla pertenecientes a la Fm. Tarango del Paleógeno-Neógeno, esta unidad se ubica en todos los modelos geoelectricos, a excepción del perfil 11, se infiere que su permeabilidad es media a buena, pero a pesar de ello sus posibilidades acuíferas son regulares por debajo del nivel estático.



Asociado a los sedimentos lacustres del Paleógeno-Neógeno y pertenecientes a la Fm. Tarango, se encuentra la **U3** clasificada en dos secuencias (U3-A y U3-B), es una de las capas que presentan mayor espesor, representada en tonalidades de azul a púrpura, está localizada en todos los perfiles geoelectricos y con una variación resistiva de 5 a 50 Ω m, se asocian a arcillas limpias (U3-B) y a tobas arcillosas húmedas (U3-A), sus posibilidades acuíferas son nulas por su incapacidad de transmitir el agua, esto quiere decir que es una zona donde su aportación hídrica es inexistente, sin embargo, actúa como capa confinante para las unidades que la subyacen.

Subyaciendo a las unidades ya mencionadas, se encuentra la **U4**, representada en colores amarillo a verde y con valores de resistividad de 50 a 250 Ω m, está asociada a una capa de conglomerados empacados en arenas del Paleógeno-Neógeno pertenecientes a la Fm. Tarango, interpretados como abanicos aluviales provenientes de las zonas montañosas, esta unidad se ubica en la mayoría de los perfiles subyaciendo a la **U3**, sin embargo, en la zona sursureste del estudio, su presencia disminuye, esto es posiblemente a una interstratificación a mayor profundidad con los sedimentos lacustres de la **U3**. Debido a su granulometría variable no cementada, su permeabilidad es media con posibilidades acuíferas regulares.

Asociada a las calizas del Cretácico Inferior pertenecientes a la Fm. Tarango, se encuentra la **U5**, representada en colores de naranja a rojo, muestra resistividades del orden de 300 a 2400 Ω m, se localiza únicamente bajos los sondeos TEM35, TEM36 y TEM46, cercanos a la zona norte del estudio en donde se pudieron apreciar afloramientos de caliza con pedernal. Sus valores más bajos se asocian a una posible fracturación por esfuerzos de compresión y disolución por agua, provocando una porosidad de tipo secundaria y los valores altos se asocian a una caliza sana sin alteraciones, se infiere que esta unidad podría continuar a mucho mayor profundidad con un buzamiento al NE, a pesar de tener una fracturación secundaria en superficie, sus posibilidades acuíferas son pobres por la variación del nivel del manto freático.



Por último, se encuentra la **U6**, ubicándose únicamente bajos los sondeos TEM41 y TEM35, del Cuaternario y de la Fm. Tarango, representada solamente en color rojo, está identificada como la zona de estudio con los valores más altos de resistividad, en un rango de 600 a 10000 Ωm , se identifica como un intrusivo (dique andesítico) probablemente proveniente de una gran caldera que atraviesa la formación litológica de la **U5** (TEM41 y TEM35). Su permeabilidad es nula y por lo tanto su aportación hídrica es inexistente.

8.2 Sobreposición de secciones y cortes de resistividad en planta a diferentes elevaciones sobre la zona de estudio

Para una mejor representación de la distribución geoeléctrica en la zona de estudio, se realizaron cortes en planta a diferentes elevaciones, cada 50 metros, desde los 1700 a los 2300 msnm (Anexo 3: Figura 3.1 a Figura 3.4) estos planos son de gran utilidad para observar de mejor manera que zonas son las que podrían tener un mejor aporte hídrico.

Analizando los cortes (Anexo 3: Figura 3.5 a Figura 3.17) en la zona sursureste y una porción del suroeste, se observa una transición de material debido a los cambios de resistividad a diferentes elevaciones, en general, las zonas con altitud de 2300 msnm son valores de resistividad asociados a material de origen lacustre y volcánico, estos valores de resistividad son presentes en la zona somera, pero son de suma importancia debido a que son zonas de recarga para el acuífero inferior. A partir de los 2200-2100 msnm hay una disminución en los valores de resistividad asociados al material arcilloso mencionado en el inciso anterior.

Por otro lado, en la zona norte-noroeste y noreste hay un aumento en los valores de resistividad (Entre los 1800 a 2100 msnm), esta zona en particular podría presentar un mayor interés hidrogeológico debido al material granular y al fracturamiento que presenta en su litología. A partir de estos valores se pudieron delimitar las unidades geofísicas, más adelante, en los próximos incisos, se explicará de manera más detallada sus potenciales acuíferos.



8.3 Modelo de Resistividades y Litológico en 3D

Para una mucho mejor visualización de las características geofísicas de la zona de estudio, se realizó un modelo en 3D de resistividades, donde se muestra la relación entre profundidad y resistividades (Anexo 4: Figura 4.1 a Figura 4.4) a mucho mayor detalle y más realista, permitiendo observar de mejor manera las zonas con valores de resistividad de los materiales que pudieran estar saturados. Asociando estos valores de resistividad, se elaboró un modelo litológico en 3D donde finalmente se tiene una caracterización litológica del acuífero (Anexo 5: Figura 5.1 a Figura 5.4).

Gracias al número de datos se pudieron realizar ambos modelos (Figura 15 a Figura 30), aunque es importante mencionar que, por su distribución espacial, los datos de algunos sondeos se tuvieron que interpolar a mayor distancia, esto significa que se podría haber perdido información real de la distribución de las capas y horizontes geoelectricos o incluso algunas estructuras geológicas (fallas-fracturas) que pudieran haberse disipado debido a la distancia entre los sondeos. Aquellas regiones de la zona de estudio donde los puntos de medición se encuentran más cercanos entre ellos son zonas donde la verdadera distribución de resistividades y material litológico será mayor y más fiable.

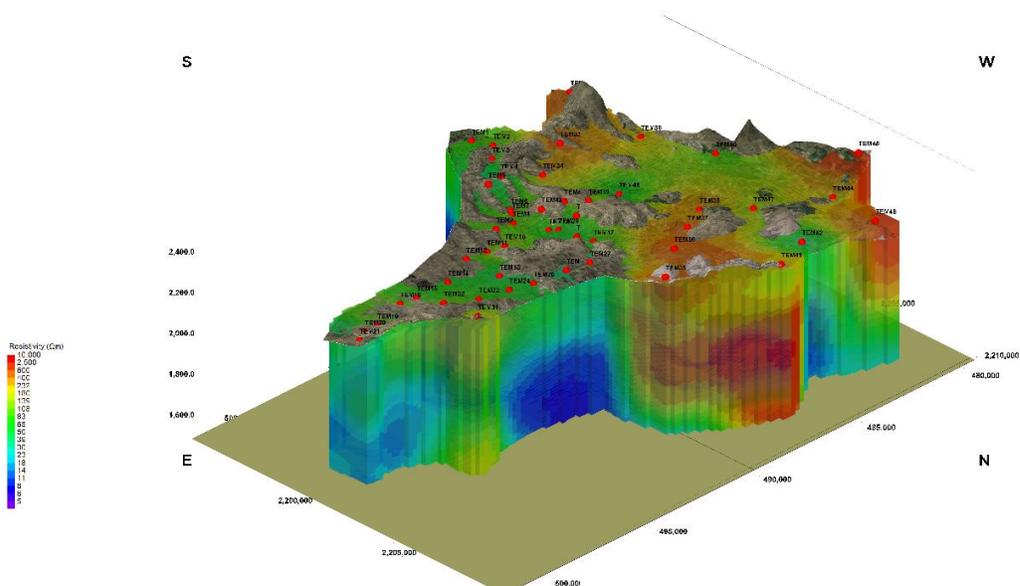


Figura 15 –Modelo de Resistividades en 3D con orientación NE.



CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA EN LA PORCIÓN SUR DEL ACUÍFERO VALLE DEL MEZQUITAL MEDIANTE EL MÉTODO GEOFÍSICO DE TRANSITORIO ELECTROMAGNÉTICO EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

A continuación, se muestra de manera más detallada (Figura 16 a Figura 29) la transición de cómo es que se encuentran distribuidas las resistividades en el modelo 3D.

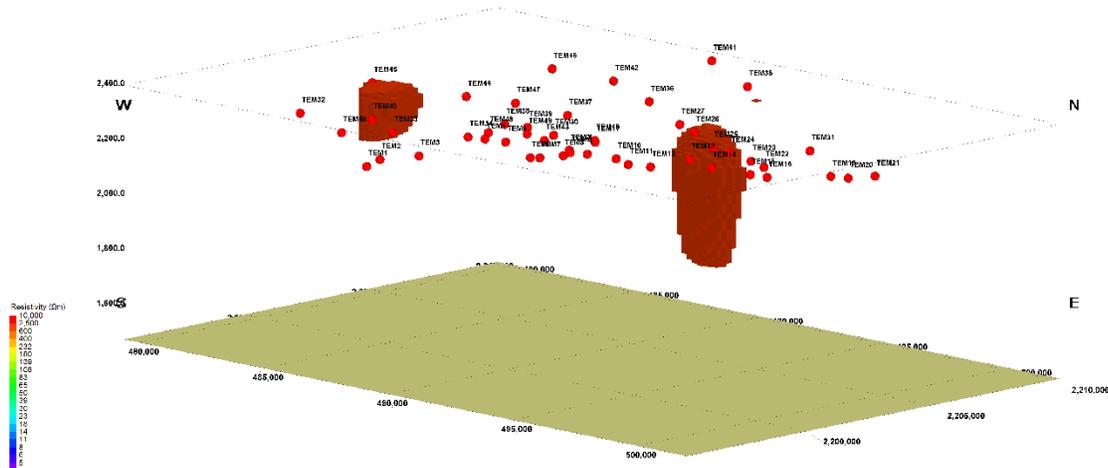


Figura 16 – Modelo 3D con valores de resistividad de 9000 -10000 (Ωm) orientación SE.

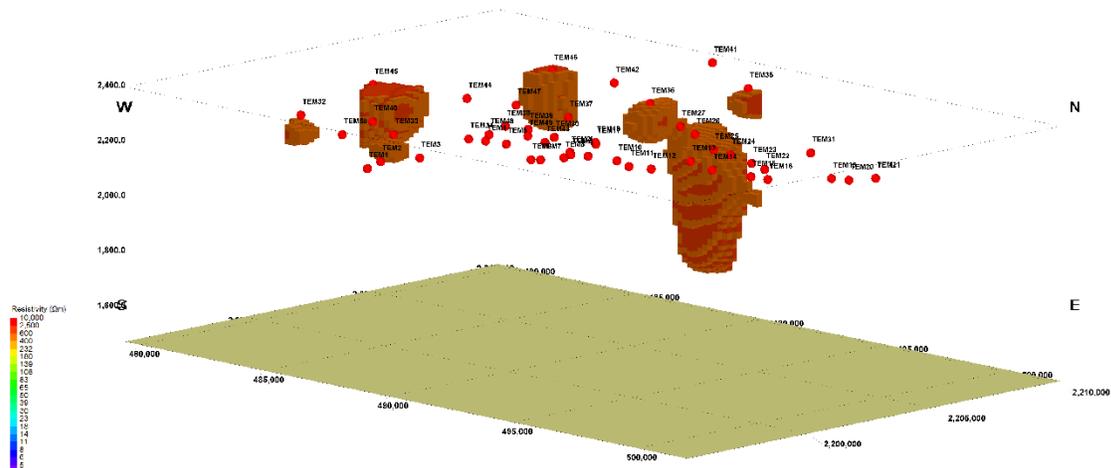


Figura 17 – Modelo 3D con valores de resistividad de 5000 -10000 (Ωm) orientación SE.



CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA EN LA PORCIÓN SUR DEL ACUÍFERO VALLE DEL MEZQUITAL MEDIANTE EL MÉTODO GEOFÍSICO DE TRANSITORIO ELECTROMAGNÉTICO EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

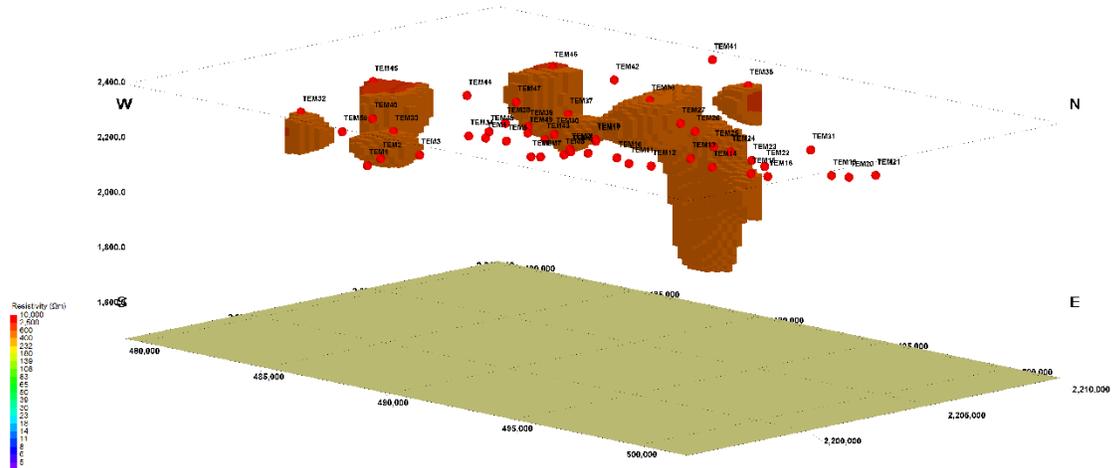


Figura 18 – Modelo 3D con valores de resistividad de 1000 -10000 (Ωm) orientación SE.

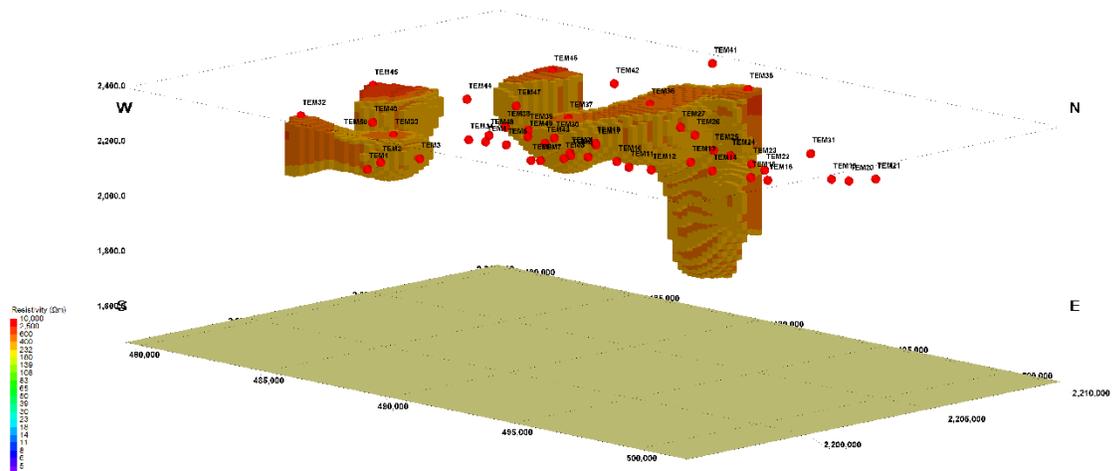


Figura 19 – Modelo 3D con valores de resistividad de 500 -10000 (Ωm) orientación SE.



CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA EN LA PORCIÓN SUR DEL ACUÍFERO VALLE DEL MEZQUITAL MEDIANTE EL MÉTODO GEOFÍSICO DE TRANSITORIO ELECTROMAGNÉTICO EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

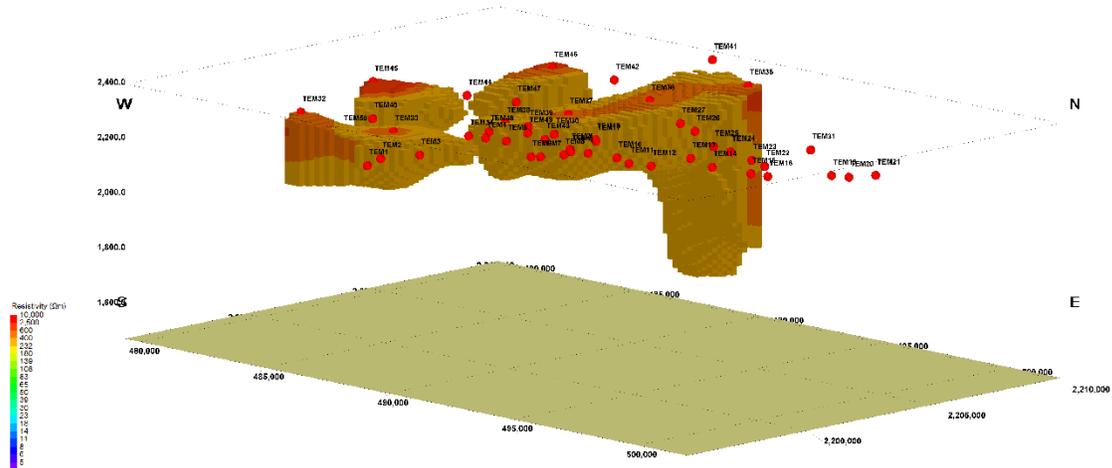


Figura 20 – Modelo 3D con valores de resistividad de 400 -10000 (Ωm) orientación SE.

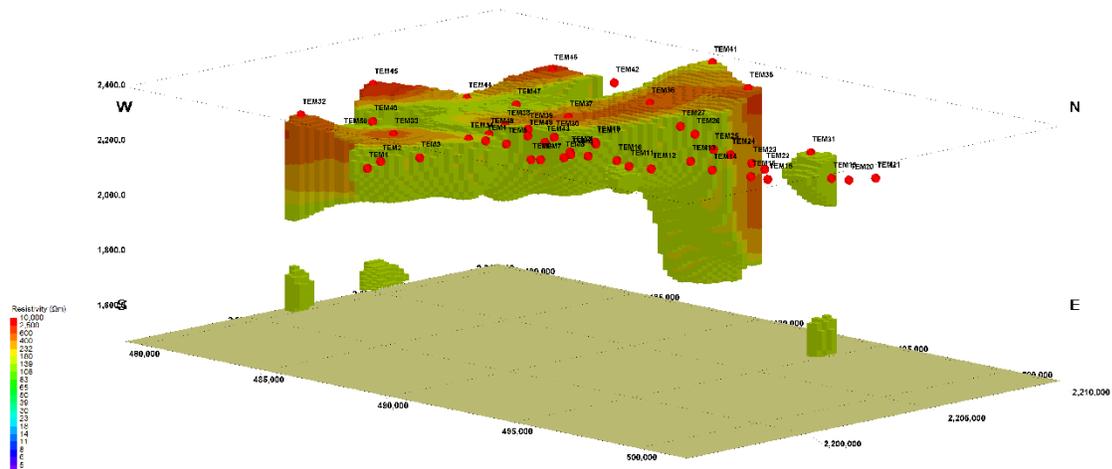


Figura 21 – Modelo 3D con valores de resistividad de 300 -10000 (Ωm) orientación SE.



CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA EN LA PORCIÓN SUR DEL ACUÍFERO VALLE DEL MEZQUITAL MEDIANTE EL MÉTODO GEOFÍSICO DE TRANSITORIO ELECTROMAGNÉTICO EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

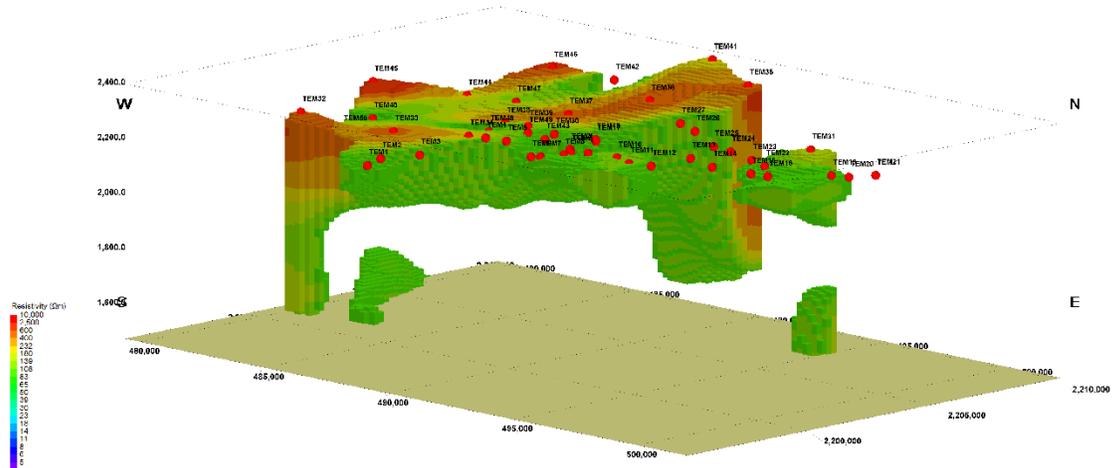


Figura 22 – Modelo 3D con valores de resistividad de 150 -10000 (Ωm) orientación SE.

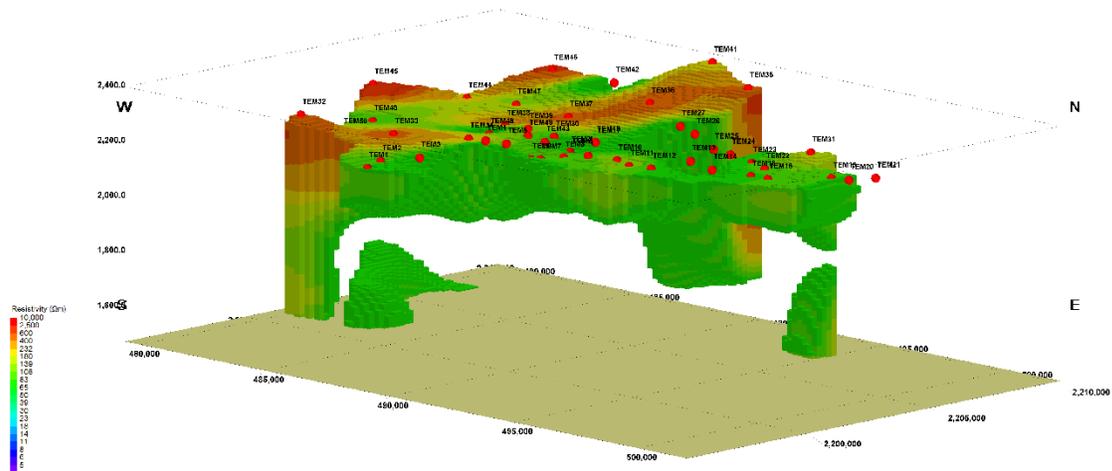


Figura 23 – Modelo 3D con valores de resistividad de 100 -10000 (Ωm) orientación SE.



CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA EN LA PORCIÓN SUR DEL ACUÍFERO VALLE DEL MEZQUITAL MEDIANTE EL MÉTODO GEOFÍSICO DE TRANSITORIO ELECTROMAGNÉTICO EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

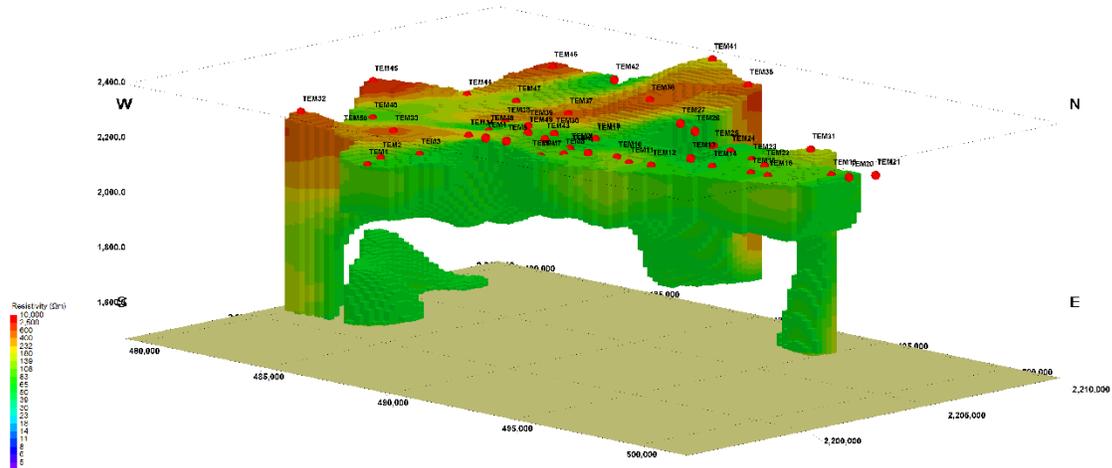


Figura 24 – Modelo 3D con valores de resistividad de 80 -10000 (Ωm) orientación SE.

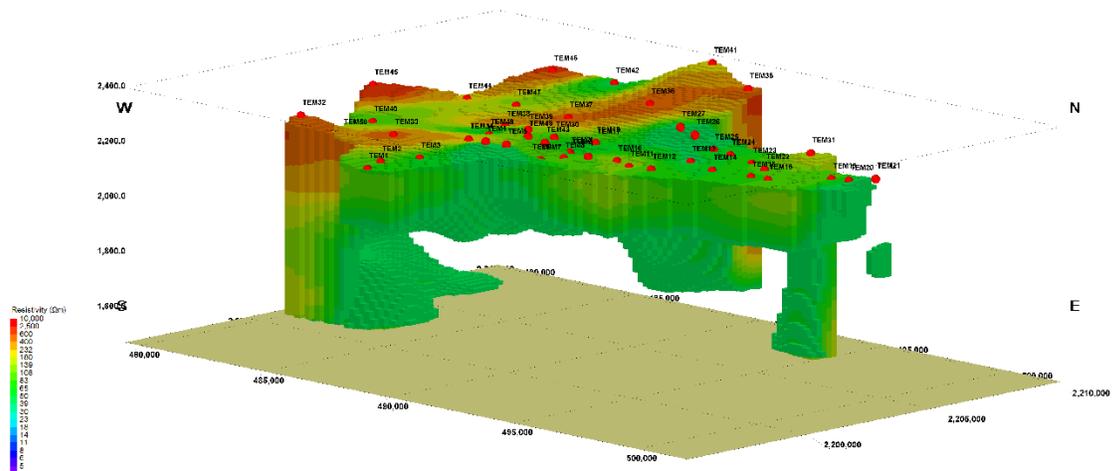


Figura 25 – Modelo 3D con valores de resistividad de 60 -10000 (Ωm) orientación SE.



CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA EN LA PORCIÓN SUR DEL ACUÍFERO VALLE DEL MEZQUITAL MEDIANTE EL MÉTODO GEOFÍSICO DE TRANSITORIO ELECTROMAGNÉTICO EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

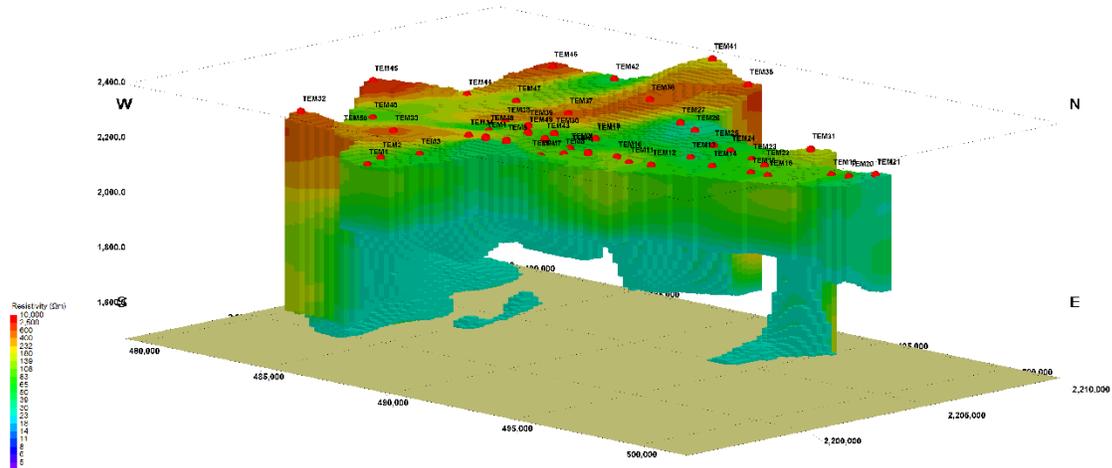


Figura 26 – Modelo 3D con valores de resistividad de 30 -10000 (Ωm) orientación SE.

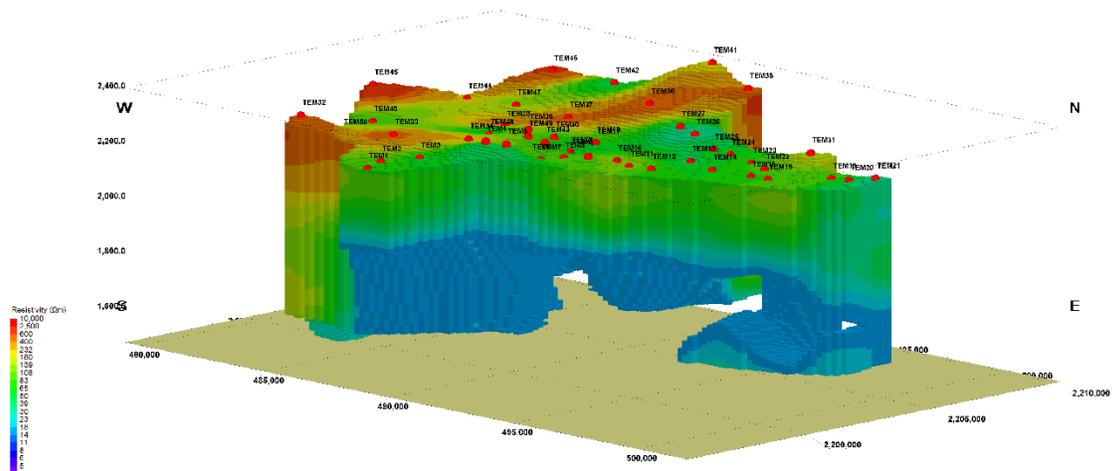


Figura 27 – Modelo 3D con valores de resistividad de 20 -10000 (Ωm) orientación SE.



CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA EN LA PORCIÓN SUR DEL ACUÍFERO VALLE DEL MEZQUITAL MEDIANTE EL MÉTODO GEOFÍSICO DE TRANSITORIO ELECTROMAGNÉTICO EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

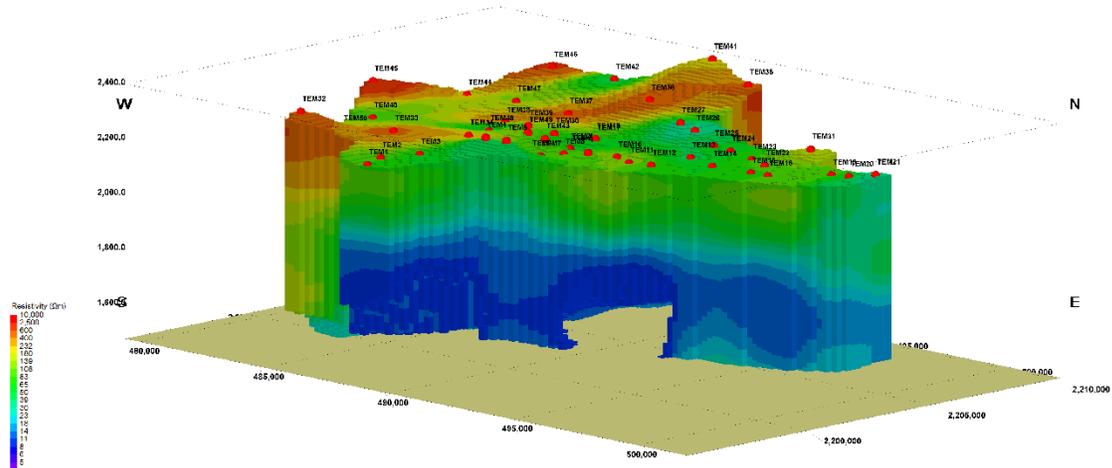


Figura 28 – Modelo 3D con valores de resistividad de 10 -10000 (Ωm) orientación SE.

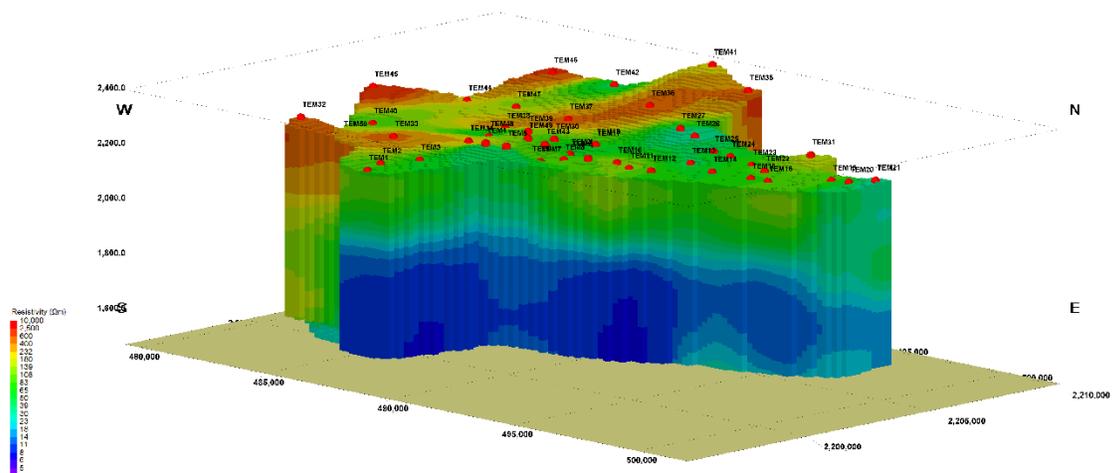


Figura 29 – Modelo 3D con valores de resistividad de 5 -10000 (Ωm) orientación SE.



CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA EN LA PORCIÓN SUR DEL ACUÍFERO VALLE DEL MEZQUITAL MEDIANTE EL MÉTODO GEOFÍSICO DE TRANSITORIO ELECTROMAGNÉTICO EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

Finalmente, al asociar los valores de resistividad, se realizó el modelo 3D de litologías (Figura 30).

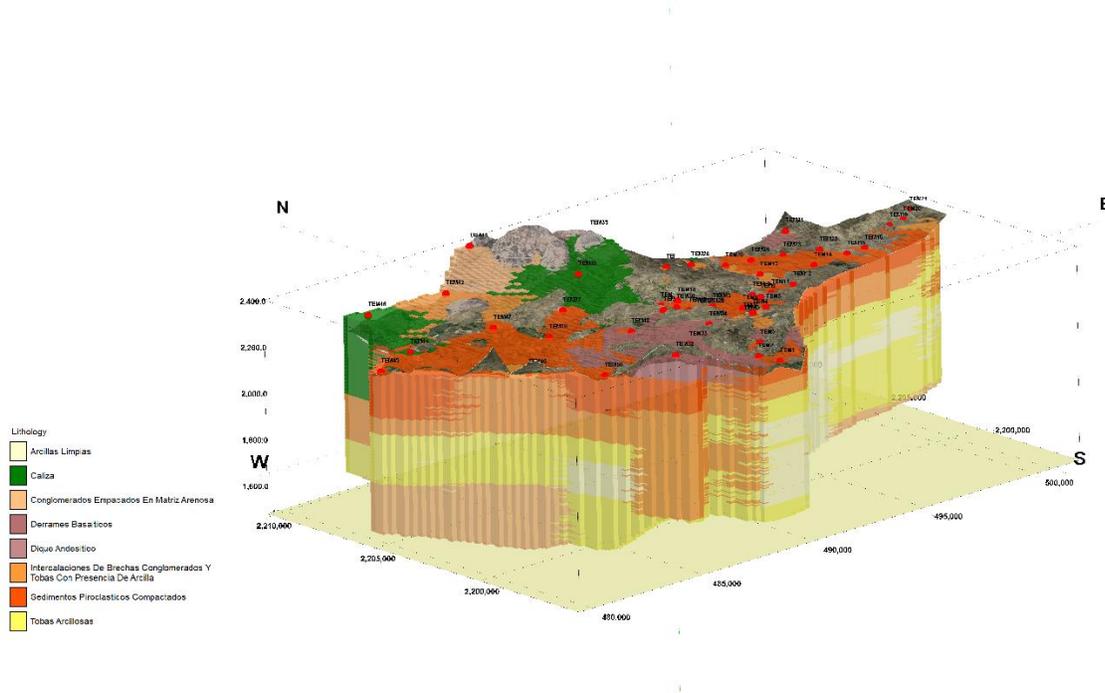


Figura 30 –Modelo Litológico en 3D con orientación SW.



9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1 Conclusiones

1. Se determinaron las propiedades físicas del subsuelo de la zona de estudio; se identificaron ocho unidades geoelectricas que se asocian a las diferentes litologías que se exponen en superficie y en el subsuelo de la zona evaluada. Con base en la respuesta eléctrica y a la posición estratigráfica de las unidades litológicas se infiere que las permeabilidades se ubican en el rango de media a nula. En la tabla 2 se describen las unidades geoelectricas interpretadas las cuales fueron correlacionadas con la geología de la zona de estudio, se les asocia una permeabilidad y se propone su potencial hidráulico.

Unidad geoelectrica	Valor de resistividad	Litología asociada	Permeabilidad inferida	Posibilidades acuíferas
U1-A	100 – 500 (Ωm)	Sedimentos piroclásticos compactados	Baja a nula	Nulas (unidad no saturada)
U1-B	100 – 1000 (Ωm)	Colada de roca ígnea de composición basáltica con diferentes grados de fracturamiento	Media de tipo II (según el grado de fracturamiento)	Regulares a pobres (variación del NE)
U2	50 – 200 (Ωm)	Intercalaciones de brechas, conglomerados y tobas con poca arcilla	Media a buena	Regulares por debajo del NE
U3-A	10 – 50 (Ωm)	Tobas arcillosas	Baja	Pobres
U3-B	5 – 10 (Ωm)	Arcillas limpias	Nula	Nulas
U4	50 – 250 (Ωm)	Conglomerado empacado en matriz arenosa (sedimentos vulcanoclásticos)	Media	Regulares
U5	300 – 2400 (Ωm)	Calizas sanas	Baja	Pobres a nulas
U6	600 – 10000 (Ωm)	Dique andesítico	Nula	Nulas

Tabla 2 – Descripción de las unidades geoelectricas identificadas asociadas a una litología.



2. La aplicación de la técnica de sondeo electromagnético en el dominio del tiempo (TEM) permitió investigar a una profundidad del orden de los 650 m; si bien, los valores que proporciona son puntuales, la cantidad y distribución permite tener una idea de la geometría del subsuelo y correlacionar los valores de resistividad a las diferentes unidades litológicas.

3. Las posibilidades acuíferas de la zona son limitadas; las unidades que presentan potencial son las brechas y conglomerados con poca arcilla (U2) y los conglomerados empacados en matriz arenosa (U4).

4. Con base en los resultados se determina que las mejores zonas de aportación son en la demarcación noreste y noroeste con respecto a la porción sur del Acuífero Valle del Mezquital por las siguientes razones:

El procesamiento e interpretación de la zona de estudio identifica que las unidades **U2** y la **U4** son las que tienen potencial de presentar una mejor permeabilidad con respecto a las demás, es importante mencionar que sus horizontes geoeléctricos deben ser aquellos que tengan el mayor espesor para aprovechar el potencial acuífero, esto quiere decir que, con respecto a la U2, tiene espesores variables de entre 75 a 125 m y la U4 entre 125 a 150m, ambas unidades son las que podrían tener mayor aporte hídrico.

5. La información geofísica se vuelve imprescindible en este tipo de estudios, específicamente en zonas donde se tiene que profundizar la investigación; sin embargo, debe estar correlacionada con las unidades litológicas e hidrogeológicas para que sea útil.

6. A través del análisis de los diferentes perfiles obtenidos, fue posible identificar dentro de la zona de estudio ocho unidades geoeléctricas que presentan parámetros distintos y que gracias a ello fue posible conocer la distribución en profundidad de cada una de ellas y elaborar un modelo 3D de las condiciones del subsuelo, lo cual permite al hidrogeólogo tener una mejor visión, proponer las acciones subsecuentes, reducir la incertidumbre e incrementar el éxito exploratorio.



9.2 Recomendaciones

1. Realizar perforaciones exploratorias de entre 450 y 500 m de profundidad en los sondeos TEM45, TEM44, TEM40, TEM36 y TEM31 (Figura 17) esto con la finalidad de atravesar en su totalidad la U2 y parte de la U4.

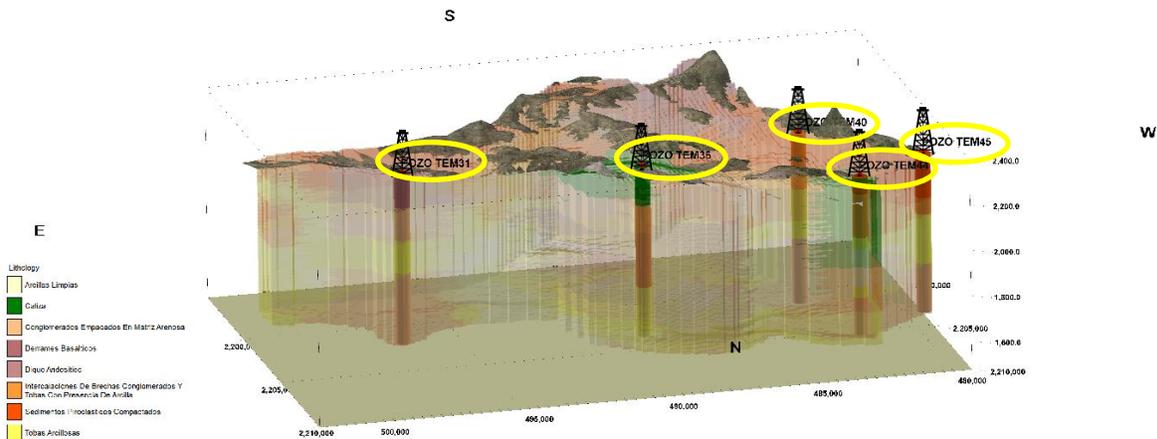


Figura 17 – Localización de los sondeos electromagnéticos con mejores características geohidrológicas con respecto al modelo 3D litológico.

2. Para ampliar más el panorama hidrogeofísico de la zona se recomienda realizar un análisis de la información de intensidad de campo magnético que edita el Servicio Geológico Mexicano para identificar mejor las estructuras y realizar sondeos magnetotelúricos en las zonas noreste y noroeste para definir mejor el basamento hidráulico de las unidades geoelectricas U2 y U4 asociadas a las litologías ya mencionadas anteriormente que presentan el mejor potencial hídrico.



3. Es necesario crear conciencia de la necesidad de contar con información confiable y actualizada. Si bien se sabe que la zona del Mezquital ha sido ampliamente estudiada, no está documentada. Esto limita al hidrogeólogo a tomar decisiones oportunas. Por lo que se plantea la creación de un banco de información que permita contar con la información necesaria y orientar las investigaciones subsecuentes a los sitios donde realmente se requiera de conocimiento.



10. BIBLIOGRAFÍA

1. Aftab Khan, M., Musset, Alan E. (2000). LOOKING INTO THE EARTH, AN INTRODUCTION TO GEOLOGICAL GEOPHYSICS. Cambridge, United Kingdom. Cambridge University Press.
2. Bucker, M., Lozano, S., Ortega, B., Caballero, M., Pérez, L., Caballero, L., Pita de la Paz, C., Sánchez-Galindo, A., Villegas, F., Flores, A., Brown, E., Werne, J., Valero, B., Schwalb, A., Kemna, A., Sánchez-Alvaro, E., Launizar-Martínez, N., Valverde-Placencia, A., Garay-Jiménez, F. (2017). Methods Geoelectrical and Electromagnetic Applied to Paleolimnological Studies: Two Examples from Desiccated Lakes in the Basin of Mexico. Volumen 69, num.2, p. 279 – 298.
3. CartoCrítica. (2015). Investigación, mapas y datos para la sociedad civil. Mapa dinámico de la profundidad de pozos de agua, Estados Unidos Mexicanos de https://cartocritica.org.mx/2015/profundidad_agua_subterranea/
4. CONAGUA. (2020). Actualización de la Disponibilidad Media Anual del Agua subterránea, En el Acuífero Valle del Mezquital (1310), Estado de Hidalgo, México.
5. CONAGUA. (2021). Registro Público de Derechos de Agua (REPDA). Estados Unidos Mexicanos de <https://app.conagua.gob.mx/ConsultaRepda.aspx>
6. Díaz, N. (2016). Estudio Geofísico Con Fines Geohidrológicos En El Predio “Los Lagartos”, Municipio De Jojutla, Estado De Morelos. Tesis de licenciatura. Instituto Politécnico Nacional.
7. Fitzpatrick, R. (2008). MAXWELL’S EQUATIONS AND THE PRINCIPLES OF ELECTROMAGNETISM. Hingham, Massachusetts. Infinity Science Press LLC.
8. INEGI. (2010). Anuario Estadístico del Estado de Hidalgo. Hidalgo, México.
9. Nabighian, M. (1991). ELECTROMAGNETIC METHODS IN APPLIED GEOPHYSICS-APPLICATIONS PART A AND PART B. Tulsa, Oklahoma. Society of Exploration Geophysicists.
10. Rowland, B. (2002). TIME-DOMAIN ELECTROMAGNETIC EXPLORATION. Oregon, United States. Northwest Geophysical Associates Inc.
11. Sandoval, C. (2019). Lineamientos para realizar actividades de exploración Hidrogeofísica. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
12. Servicio Geológico Mexicano. (2010). Carta Geológico-Minera Ciudad de México E14-2. Escala 1:250,000.
13. Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E. (1990). APPLIED GEOPHYSICS SECOND EDITION. Cambridge, United Kingdom. Cambridge University Press.
14. Vozoff, K. (1972). THE MAGNETOTELLURIC METHOD IN THE EXPLORATION OF SEDIMENTARY BASINS. Volume 37, num.1, p. 98 – 141.
15. Yañez, M. (2019). Caracterización del Acuífero Río verde, San Luis Potosí con el Método Magnetotelúrico. Tesis de maestría. Instituto Potosino De Investigación Científica Y Tecnológica, A.C.



CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA EN LA PORCIÓN SUR DEL ACUÍFERO VALLE DEL MEZQUITAL MEDIANTE EL MÉTODO GEOFÍSICO DE TRANSITORIO ELECTROMAGNÉTICO EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

SOFTWARE

- QGIS Hannover Desktop 3.16.6.
- Temix S
- RockWorks 17.
- Global Mapper 21.1
- WinGLink, User's Manual, Edition 4, Geosystem srl, Milan, Italia, 1994.
- Google Earth Pro.
- Office 2020



ANEXOS

ANEXOS



Contenido

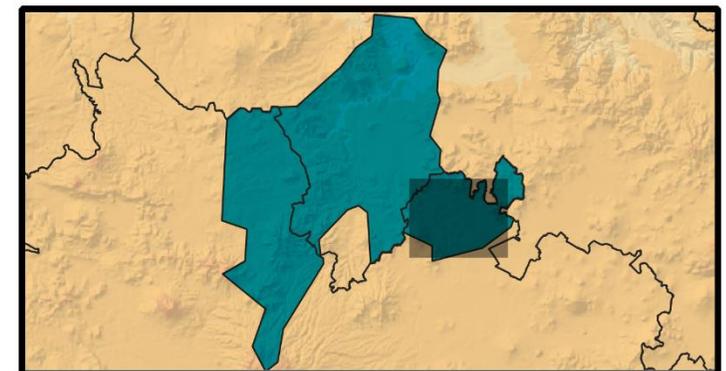
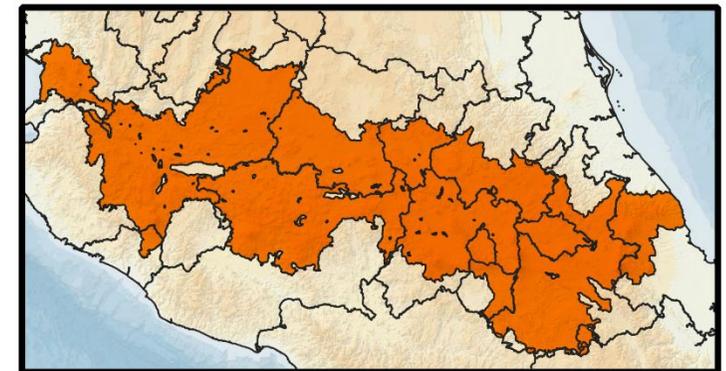
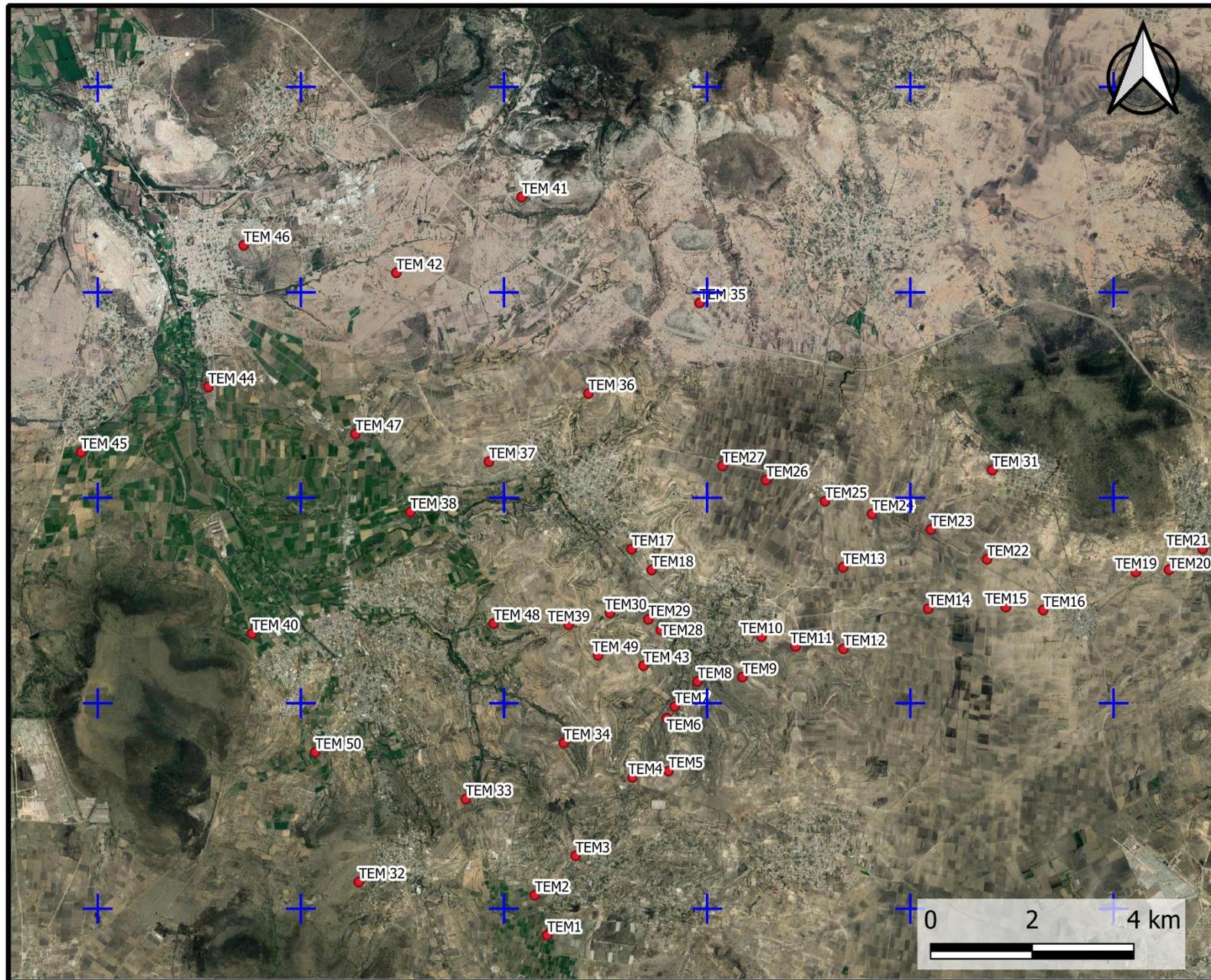
- **Anexo 1 – Planos de referencia**
- **Anexo 2 – Perfiles geoeléctricos**
- **Anexo 3 – Visualización de cortes de resistividad en planta a diferentes elevaciones en la zona de estudio**
- **Anexo 4 – Modelo 3D de resistividades**
- **Anexo 5 – Modelo 3D litológico**
- **Anexo 6 – Gráficas de los TEMs**
- **Anexo 7 – Memoria fotográfica**



ANEXO 1

PLANOS DE REFERENCIA





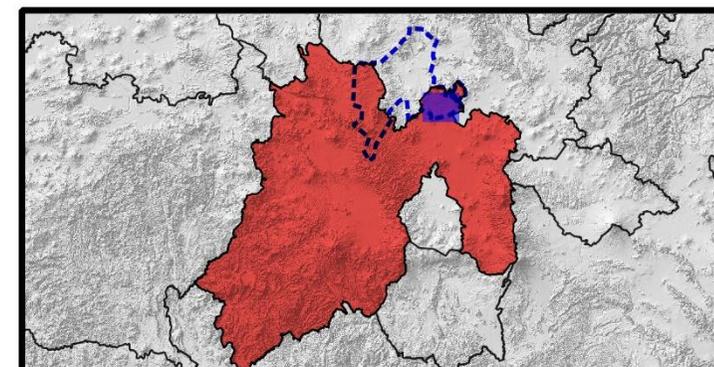
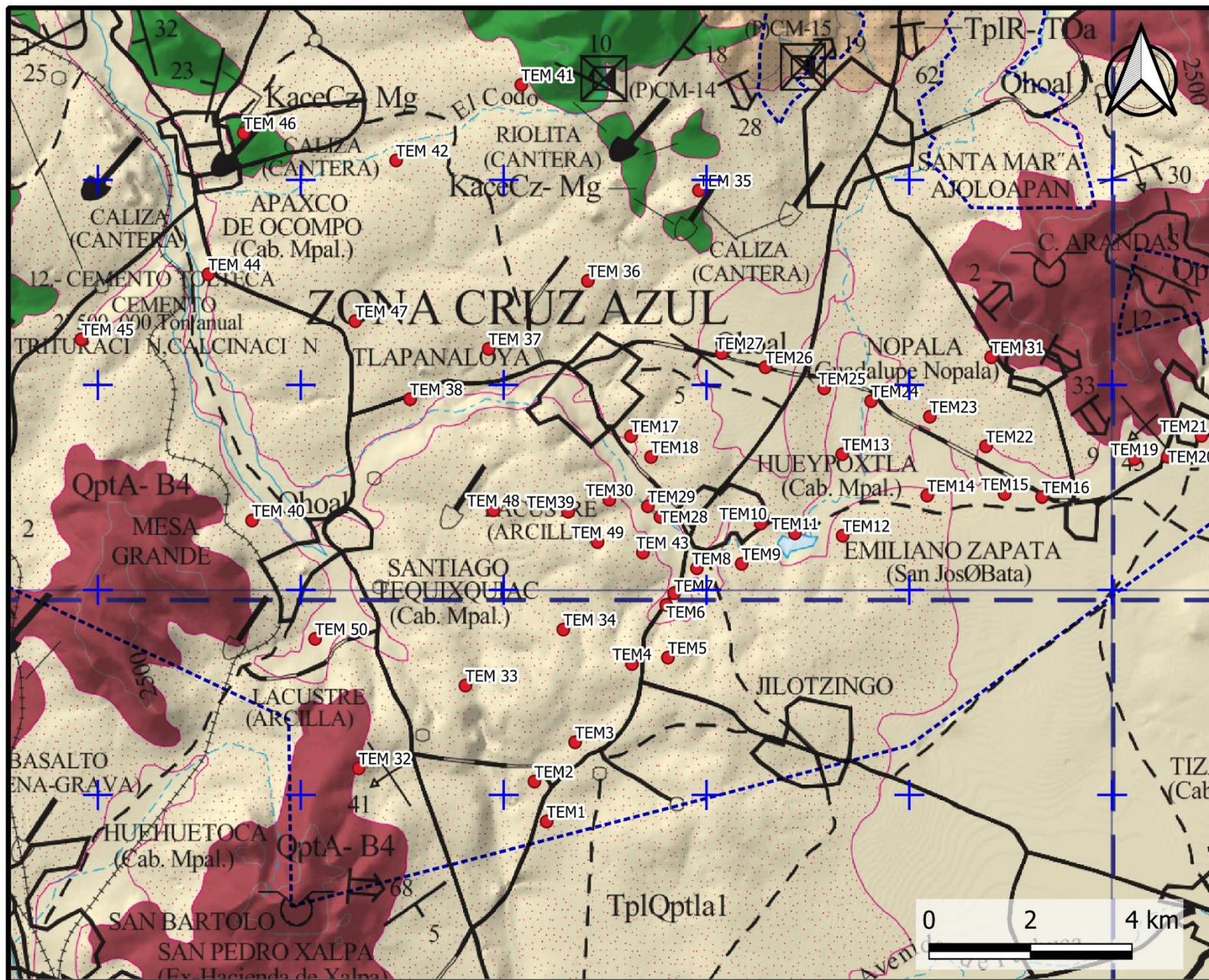
Simbología

- División Política
- Acuífero Valle del Mezquital
- Eje Neovolcánico
- Sondeos Realizados

Proyecto: Acuífero Zona Sur Valle del Mezquital	
Elaboró: Francisco Linares	Proyección: UTM-WGS84-14N



Figura 1.1 – Plano de localización de la zona de estudio



Simbología

- **Sondeos Realizados**
- **Estado de México**
- **División Política**
- ▭ **Acuífero Valle del Mezquital**



CUATERNARIO

- Qhoal ALUVIÓN
- Qho-lm-ar LIMO - ARENA
- QptA-B4 ANDESITA - BASALTO

TERCIARIO NEÓGENO

- TplQptla1 LACUSTRE

CRETÁCICO INFERIOR

- KaceCz-Mg CALIZA - MARGA

CIUDAD DE MÉXICO E14-2

Proyecto: Acuífero Zona Sur Valle del Mezquital

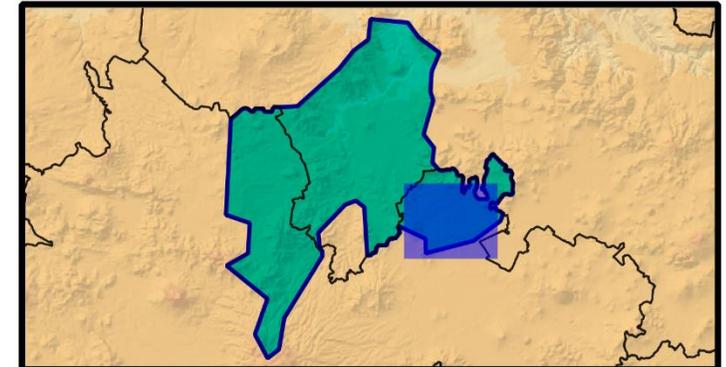
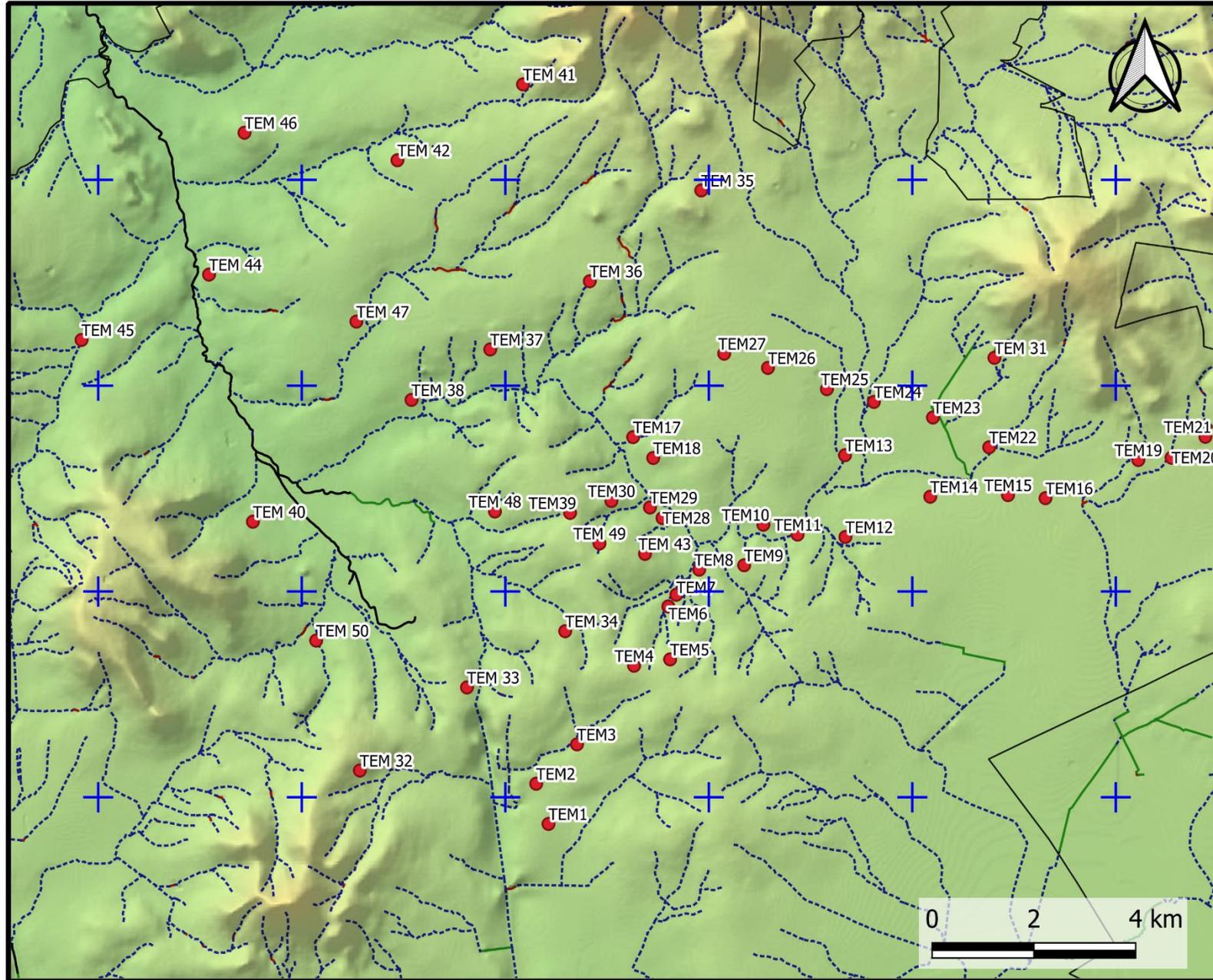
Elaboró: Francisco Linares

Proyección: UTM-WGS84-14N



Figura 1.2 – Plano geológico-estructural de la zona de estudio





Simbología

- **Sondeos Realizados**
- División Política**
- Acuífero Valle del Mezquital**

Tipos De Flujo

- **En Operación**
- - - **Flujo Vertical**
- . . . **Intermitente**
- **Perenne**

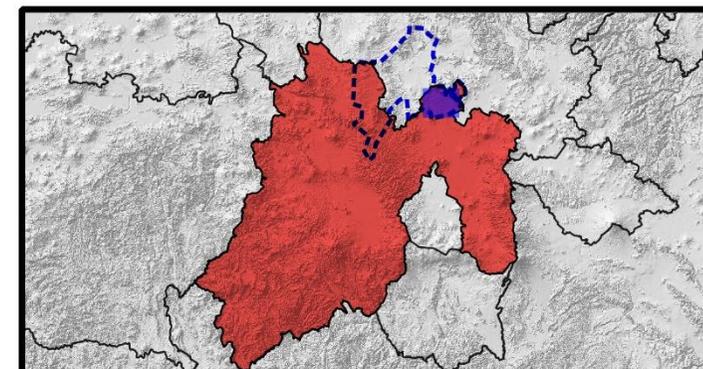
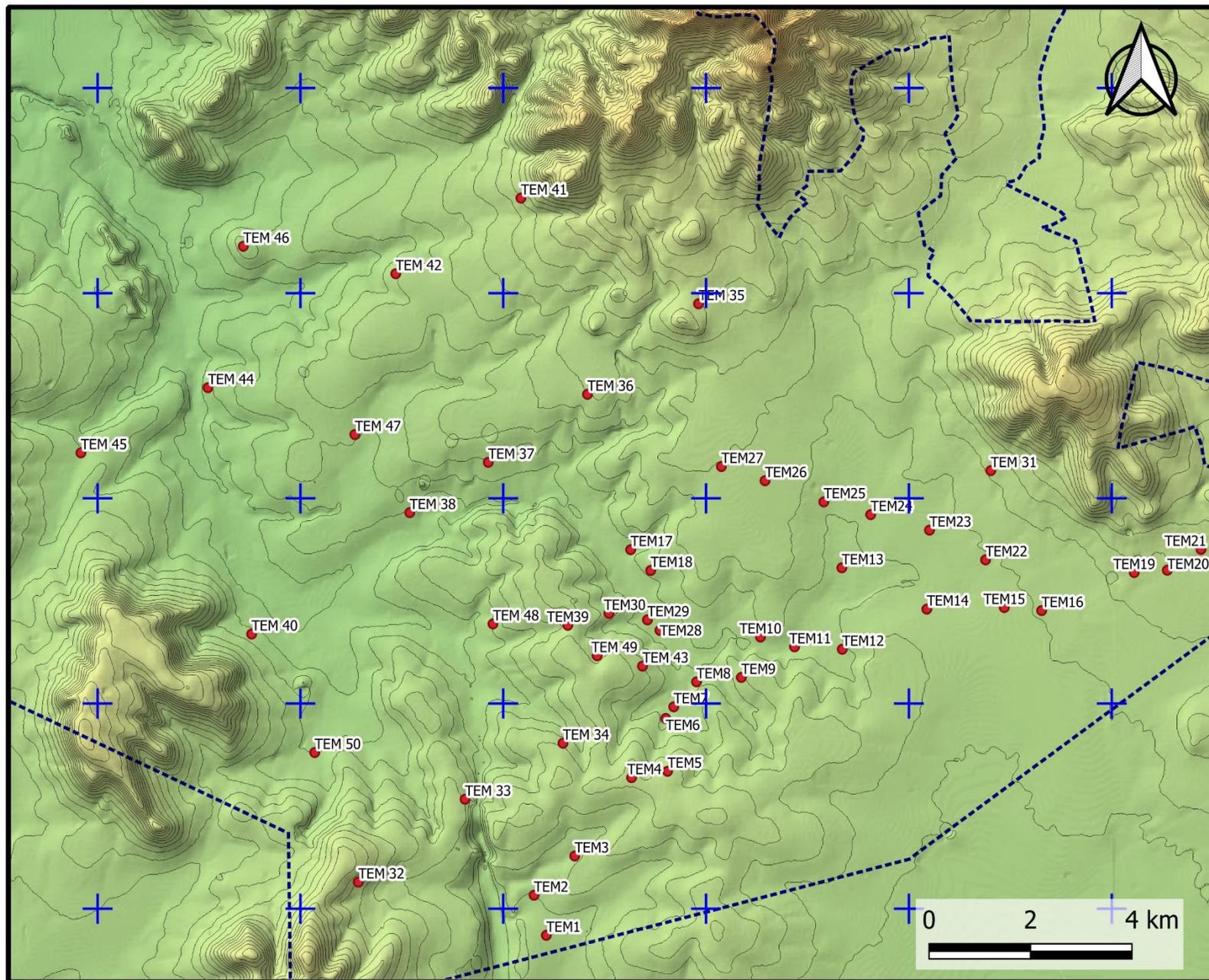
Proyecto: Acuífero Zona Sur Valle del Mezquital

Elaboró: Francisco Linares

Proyección: UTM-WGS84-14N



Figura 1.3 – Plano Hidrográfico de la zona de estudio



Simbología

- Sondeos Realizados
- Estado de México
- División Política
- ⋯ Acuífero Valle del Mezquital

Elevaciones (msnm)

■ 1460	■ 2708
■ 1709	■ 2958
■ 1960	■ 3207
■ 2209	■ 3457
■ 2460	■ 3707

Proyecto: Acuífero Zona Sur Valle del Mezquital

Elaboró: Francisco Linares

Proyección: UTM-WGS84-14N



Figura 1.4 – Plano de elevaciones de la zona de estudio

ANEXO 2

PERFILES GEOELÉCTRICOS



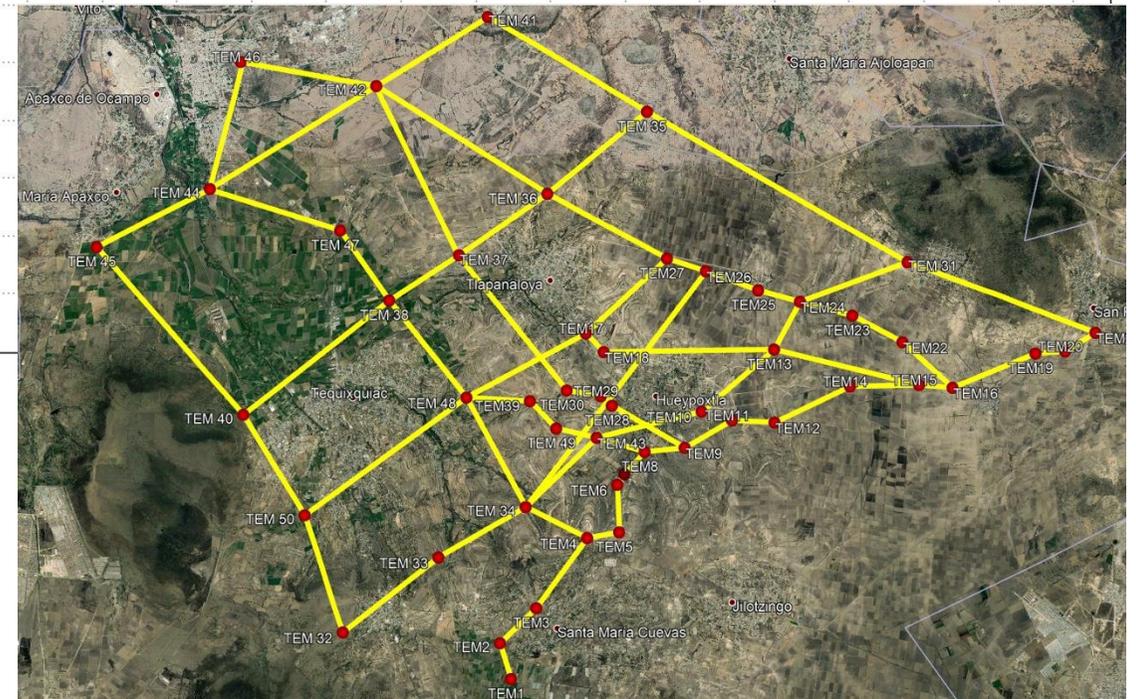
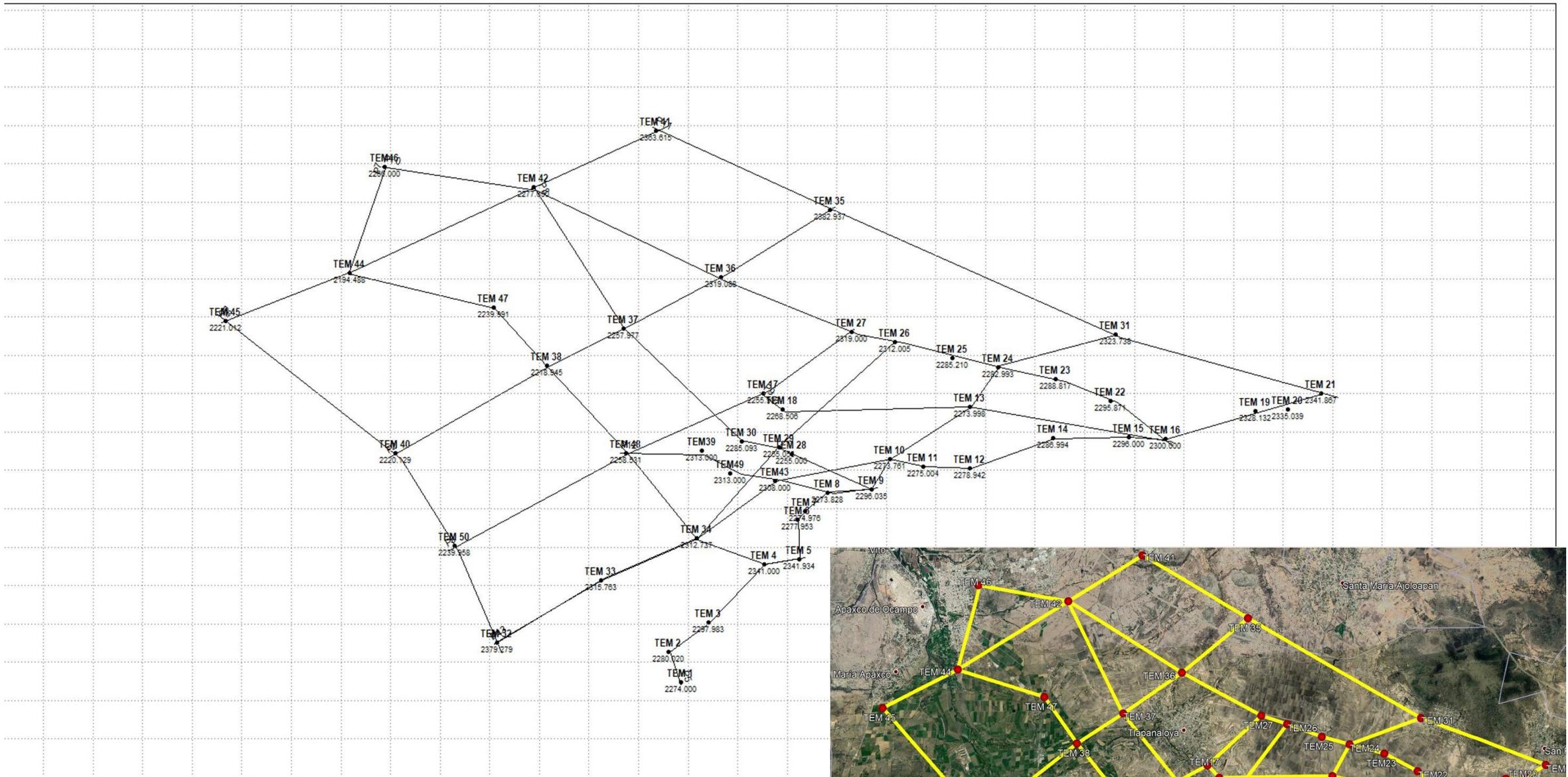
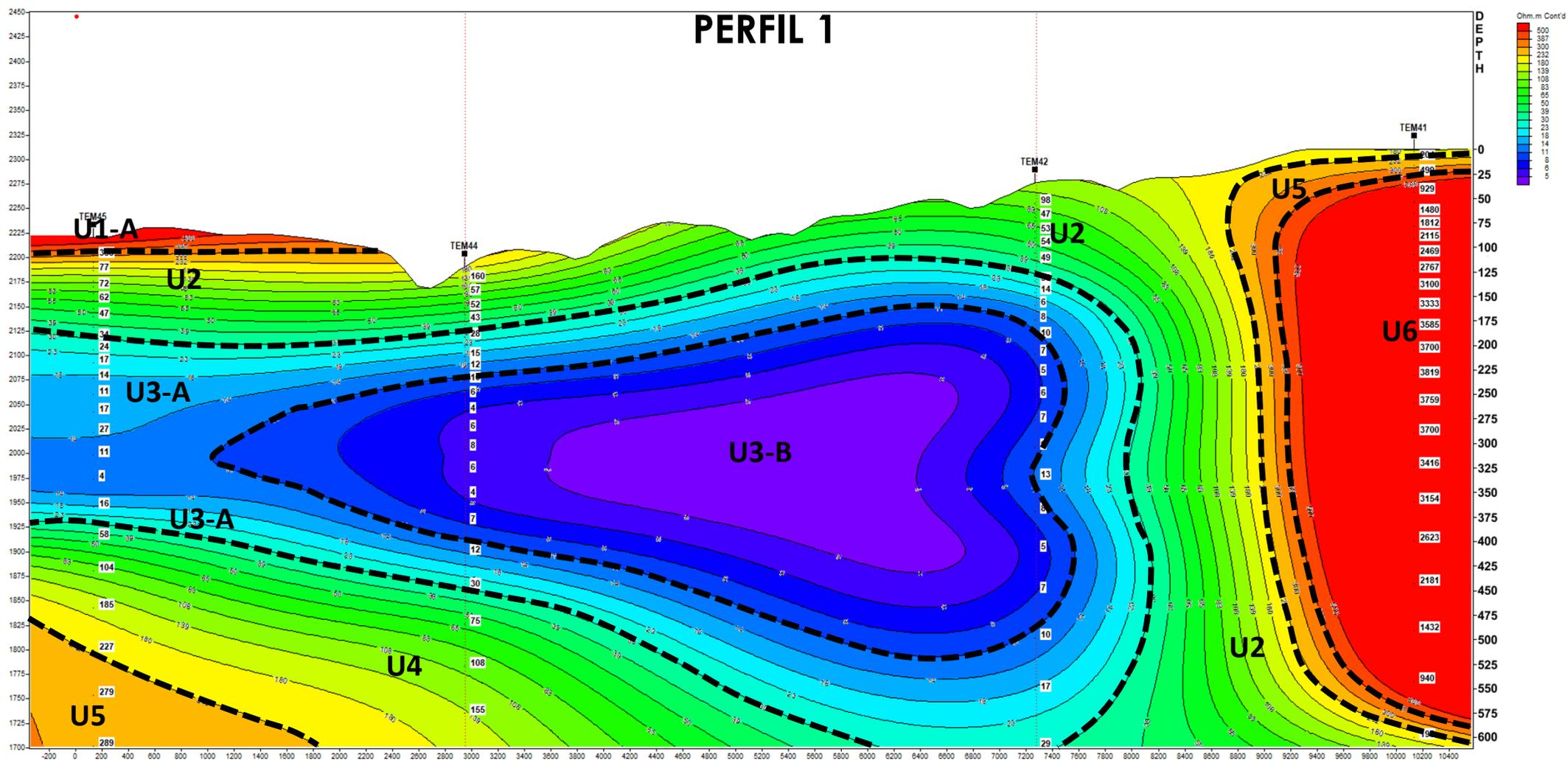


Figura 2.1 – Localización y distribución de los perfiles geoelectricos



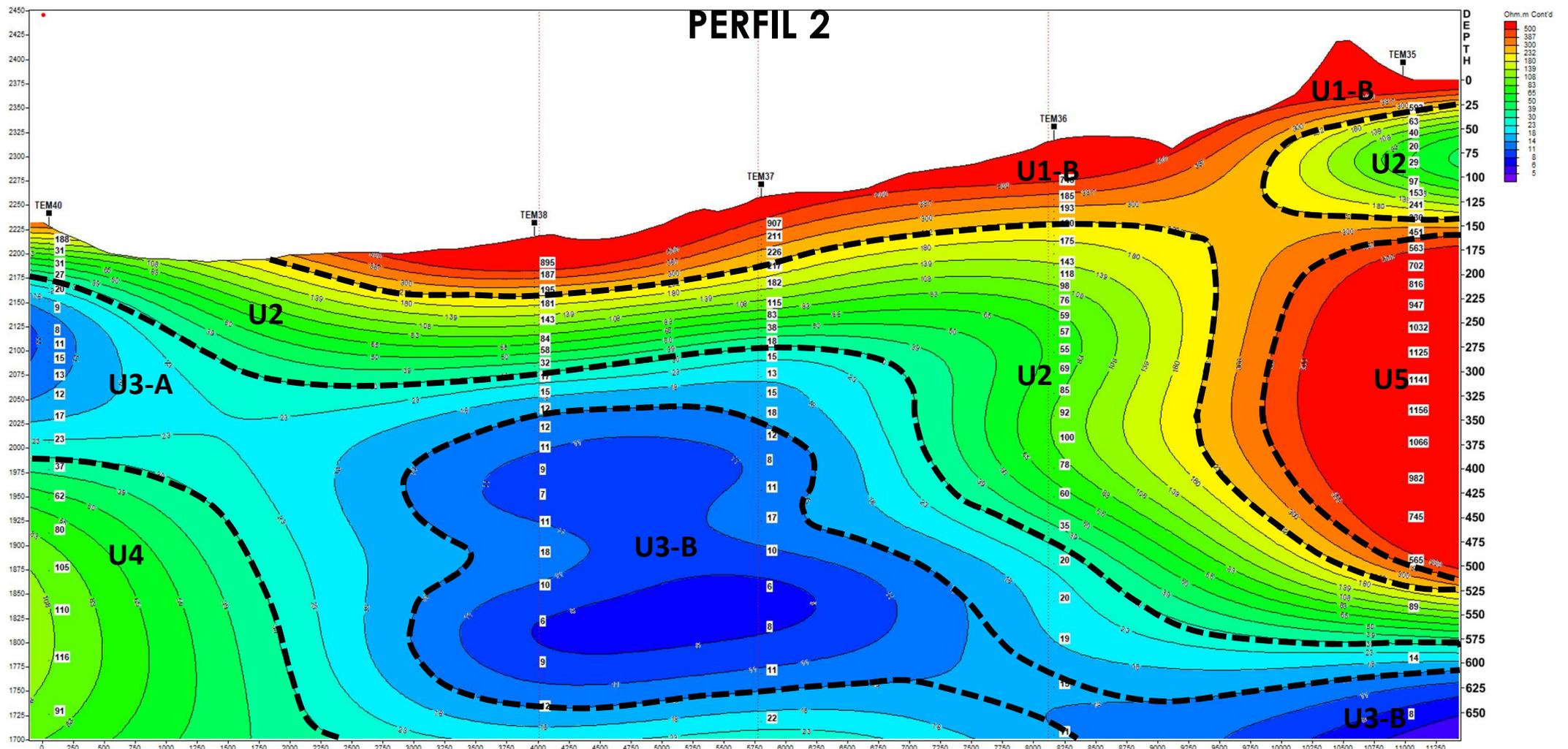


UNIDAD GEOELÉCTRICA	LITOLOGÍA ASOCIADA	UNIDAD GEOELÉCTRICA	LITOLOGÍA ASOCIADA
U1-A	SEDIMENTOS PIROCLÁSTICOS COMPACTADOS.	U4	CONGLOMERADOS EMPACADOS EN MATRIZ ARENOSA .
U2	INTERCALACIONES DE BRECHAS, CONGLOMERADOS Y TOBAS CON POCA PRESENCIA DE ARCILLA .	U5	ROCA CALIZA.
U3-A	TOBAS ARCILLOSAS.	U6	DIQUE ANDESÍTICO.
U3-B	ARCILLAS LIMPIAS.		



Figura 2.2 – Perfil geoelectrico T45-T44-T42-T36-T41

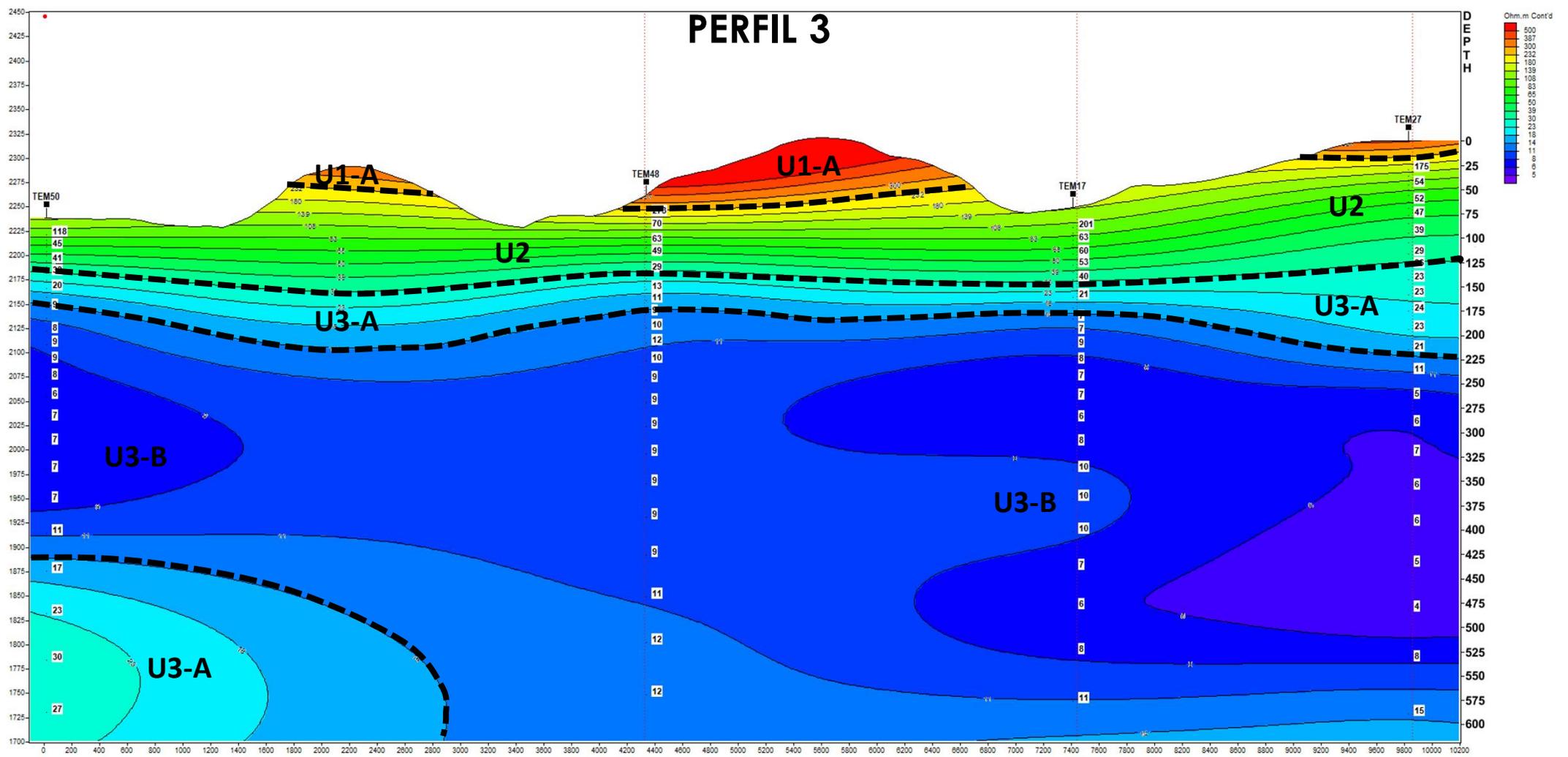




UNIDAD GEOELÉCTRICA A	LITOLOGÍA ASOCIADA	UNIDAD GEOELÉCTRICA	LITOLOGÍA ASOCIADA
U1-B	COLADA DE ROCA ÍGNEA DE COMPOSICIÓN BASÁLTICA CON DIFERENTES GRADOS DE FRACTURAMIENTO.	U3-B	ARCILLAS LIMPIAS.
U2	INTERCALACIONES DE BRECHAS, CONGLOMERADOS Y TOBAS CON POCA PRESENCIA DE ARCILLA .	U4	CONGLOMERADOS EMPACADOS EN MATRIZ ARENOSA .
U3-A	TOBAS ARCILLOSAS.	U5	ROCA CALIZA.
U3-B	ARCILLAS LIMPIAS.		



Figura 2.3 – Perfil geoelectrico T40-T38-T37-T36-T35

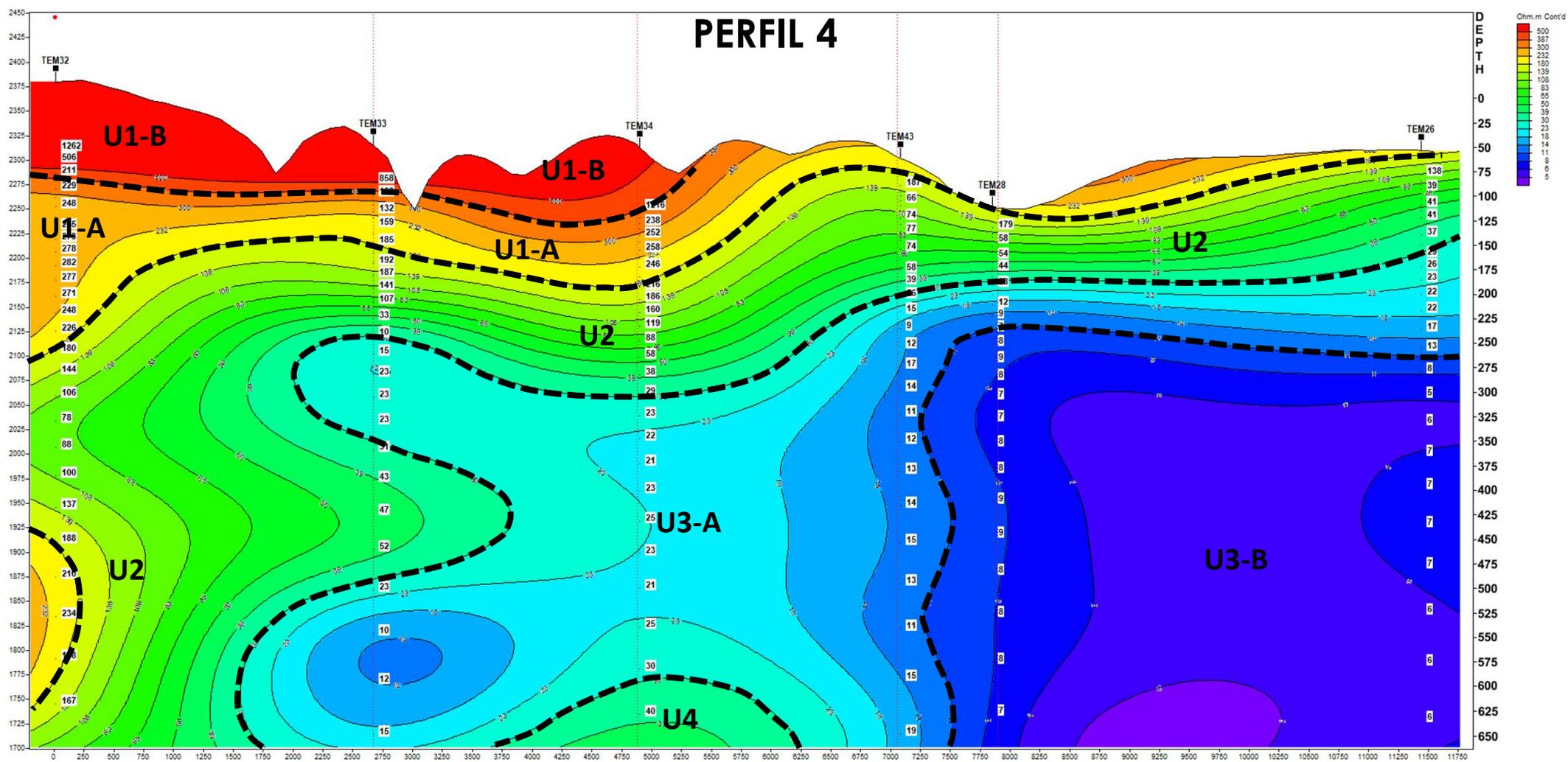


UNIDAD GEOELÉCTRICA	LITOLOGÍA ASOCIADA	UNIDAD GEOELÉCTRICA	LITOLOGÍA ASOCIADA
U1-A	SEDIMENTOS PIROCLÁSTICOS COMPACTADOS.	U3-A	TOBAS ARCILLOSAS.
U2	INTERCALACIONES DE BRECHAS, CONGLOMERADOS Y TOBAS CON POCA PRESENCIA DE ARCILLA .	U3-B	ARCILLAS LIMPIAS.



Figura 2.4 – Perfil geoelectrico T50-T48-T17-T27





UNIDAD GEOELÉCTRICA	LITOLOGÍA ASOCIADA	UNIDAD GEOELÉCTRICA	LITOLOGÍA ASOCIADA
U1-A	SEDIMENTOS PIROCLÁSTICOS COMPACTADOS.	U3-A	TOBAS ARCILLOSAS.
U1-B	COLADA DE ROCA ÍGNEA DE COMPOSICIÓN BASÁLTICA CON DIFERENTES GRADOS DE FRACTURAMIENTO.	U3-B	ARCILLAS LIMPIAS.
U2	INTERCALACIONES DE BRECHAS, CONGLOMERADOS Y TOBAS CON POCA PRESENCIA DE ARCILLA .	U4	CONGLOMERADOS EMPACADOS EN MATRIZ ARENOSA .

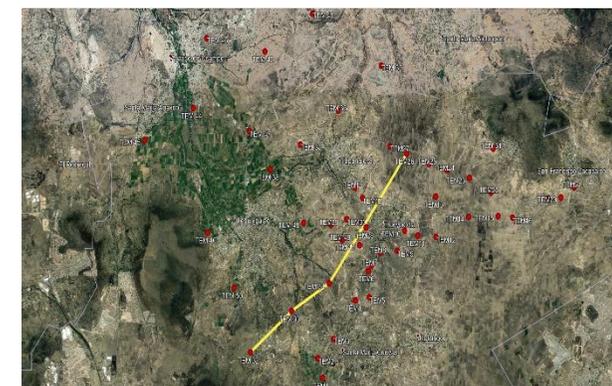
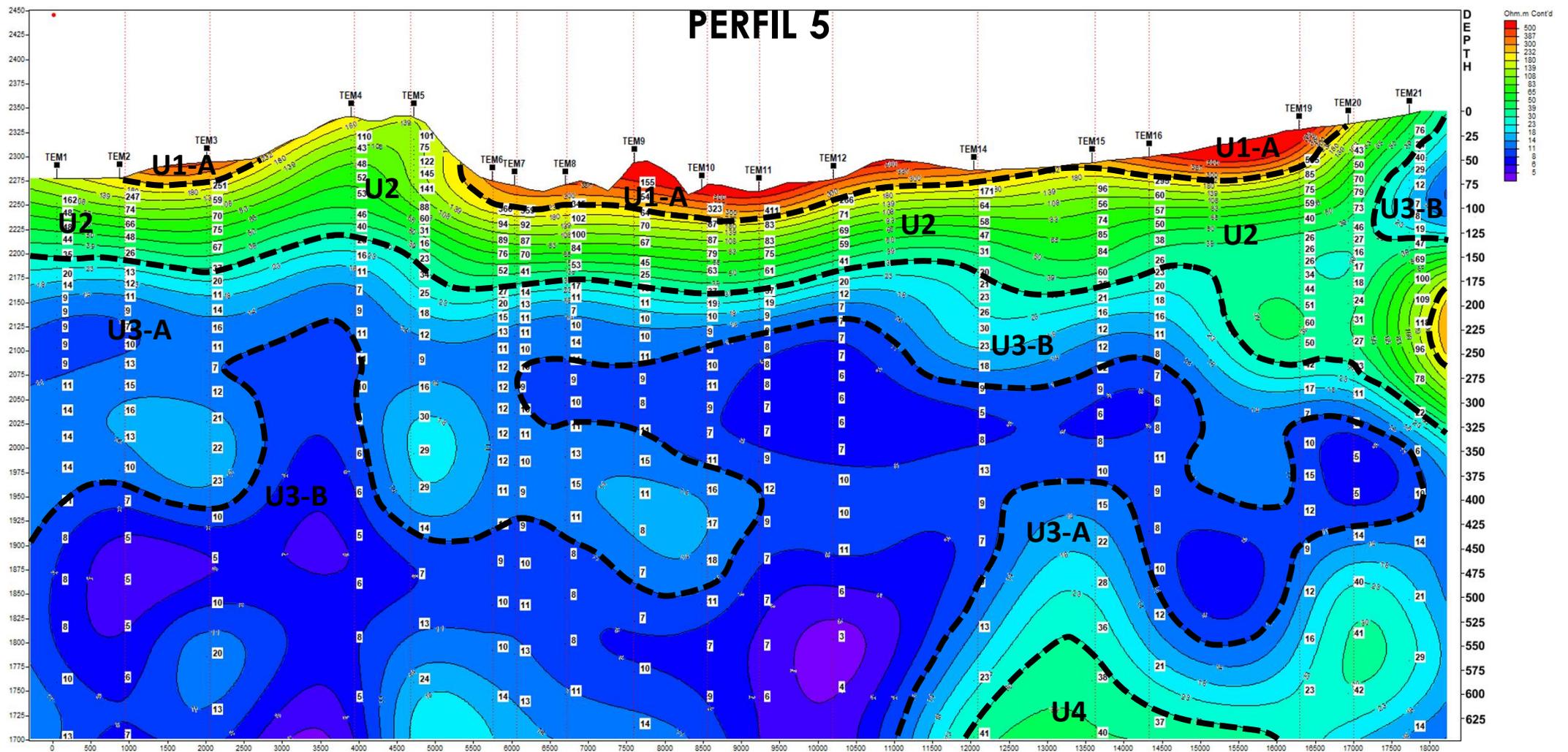


Figura 2.5 – Perfil geoelectrico T32-T33-T34-T43-T28-T26



UNIDAD GEOELÉCTRICA	LITOLOGÍA ASOCIADA	UNIDAD GEOELÉCTRICA	LITOLOGÍA ASOCIADA
U1-A	SEDIMENTOS PIROCLÁSTICOS COMPACTADOS.	U3-B	ARCILLAS LIMPIAS.
U2	INTERCALACIONES DE BRECHAS, CONGLOMERADOS Y TOBAS CON POCA PRESENCIA DE ARCILLA .	U4	CONGLOMERADOS EMPACADOS EN MATRIZ ARENOSA .
U3-A	TOBAS ARCILLOSAS.		

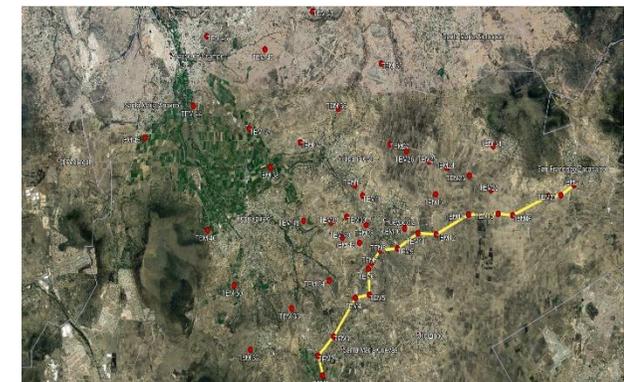
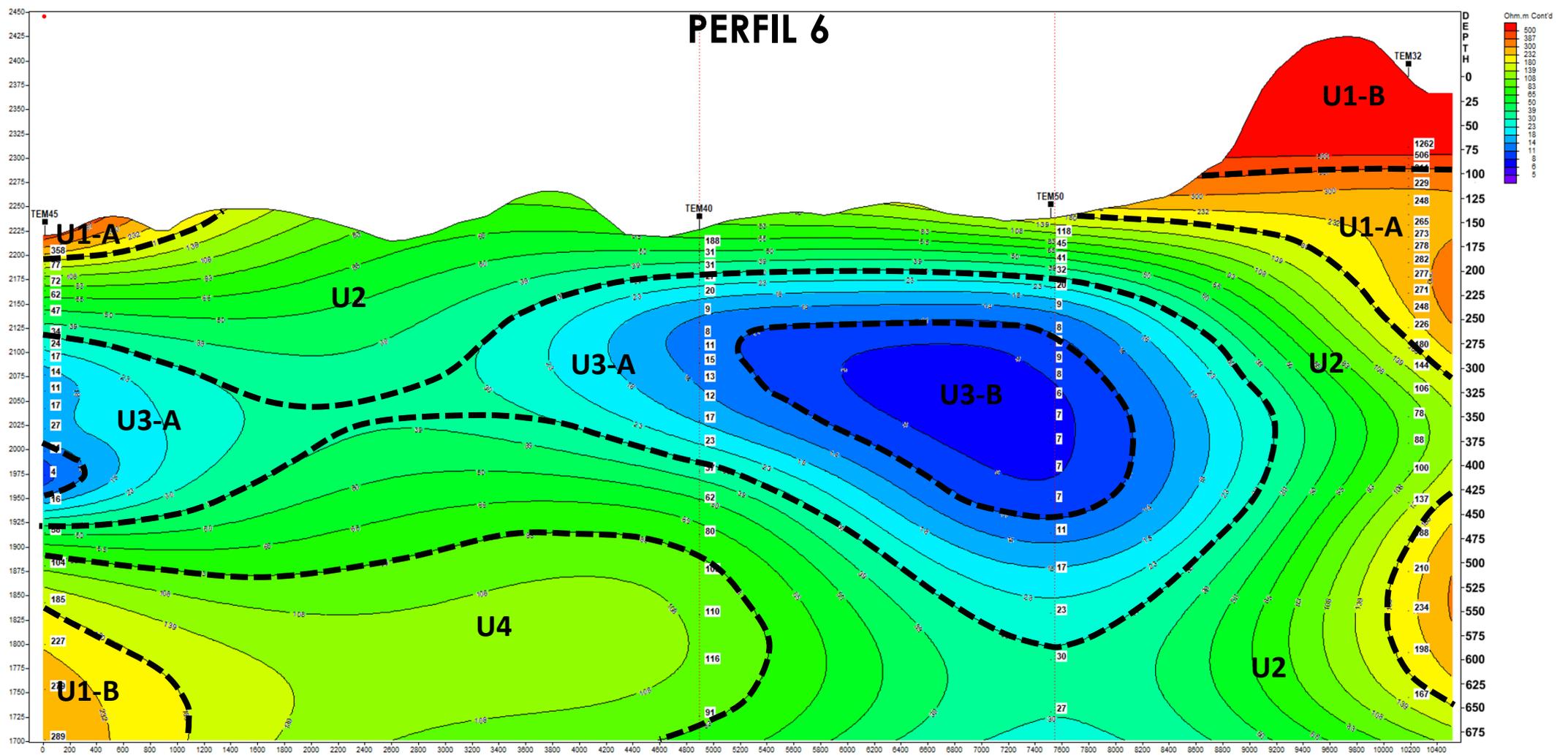


Figura 2.6 – Perfil geoelectrico T1-T2-T3-T4-T5-T6-T7-T8-T9-T10-T11-T12-T14-T15-T16-T19-T20-T21

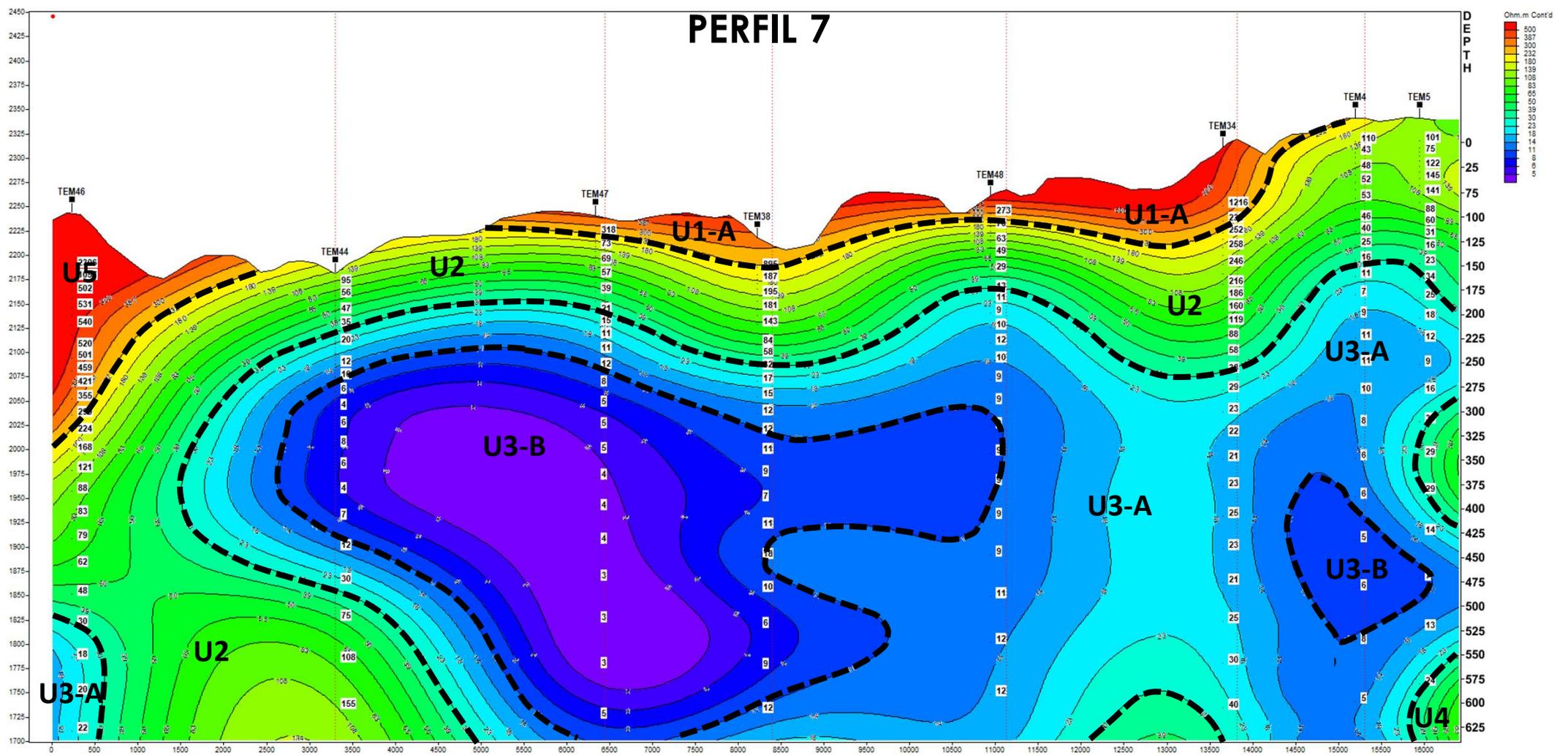




UNIDAD GEOELÉCTRICA	LITOLOGÍA ASOCIADA	UNIDAD GEOELÉCTRICA	LITOLOGÍA ASOCIADA
U1-A	SEDIMENTOS PIROCLÁSTICOS COMPACTADOS.	U3-A	TOBAS ARCILLOSAS.
U1-B	COLADA DE ROCA ÍGNEA DE COMPOSICIÓN BASÁLTICA CON DIFERENTES GRADOS DE FRACTURAMIENTO.	U3-B	ARCILLAS LIMPIAS.
U2	INTERCALACIONES DE BRECHAS, CONGLOMERADOS Y TOBAS CON POCA PRESENCIA DE ARCILLA .	U4	CONGLOMERADOS EMPACADOS EN MATRIZ ARENOSA .



Figura 2.7 – Perfil geoelectrico T45-T40-T50-T32



UNIDAD GEOELÉCTRICA	LITOLOGÍA ASOCIADA	UNIDAD GEOELÉCTRICA	LITOLOGÍA ASOCIADA
U1-A	SEDIMENTOS PIROCLÁSTICOS COMPACTADOS.	U3-B	ARCILLAS LIMPIAS.
U2	INTERCALACIONES DE BRECHAS, CONGLOMERADOS Y TOBAS CON POCA PRESENCIA DE ARCILLA .	U4	CONGLOMERADOS EMPACADOS EN MATRIZ ARENOSA .
U3-A	TOBAS ARCILLOSAS.	U5	ROCA CALIZA.

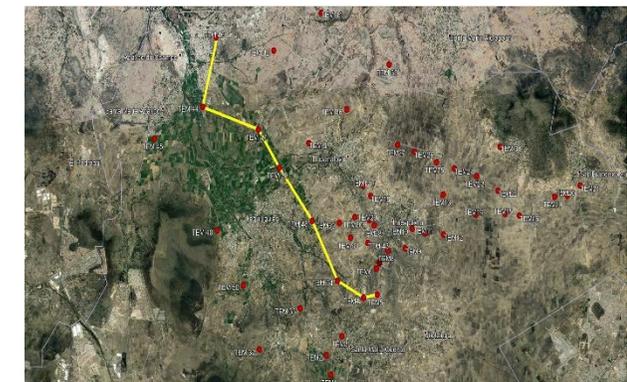
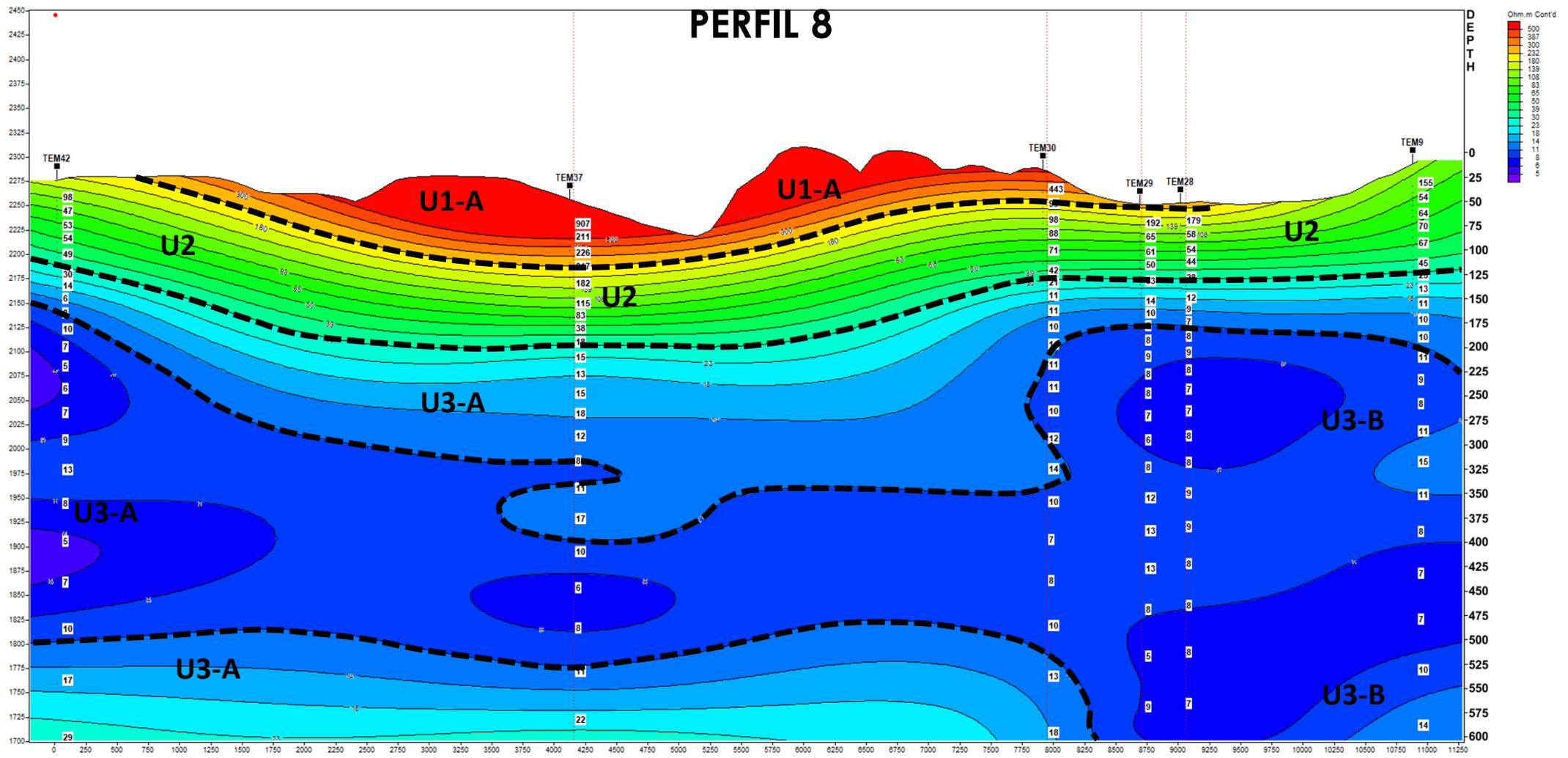


Figura 2.8 – Perfil geoelectrico T46-T44-T47-T38-T48-T34-T4-T5

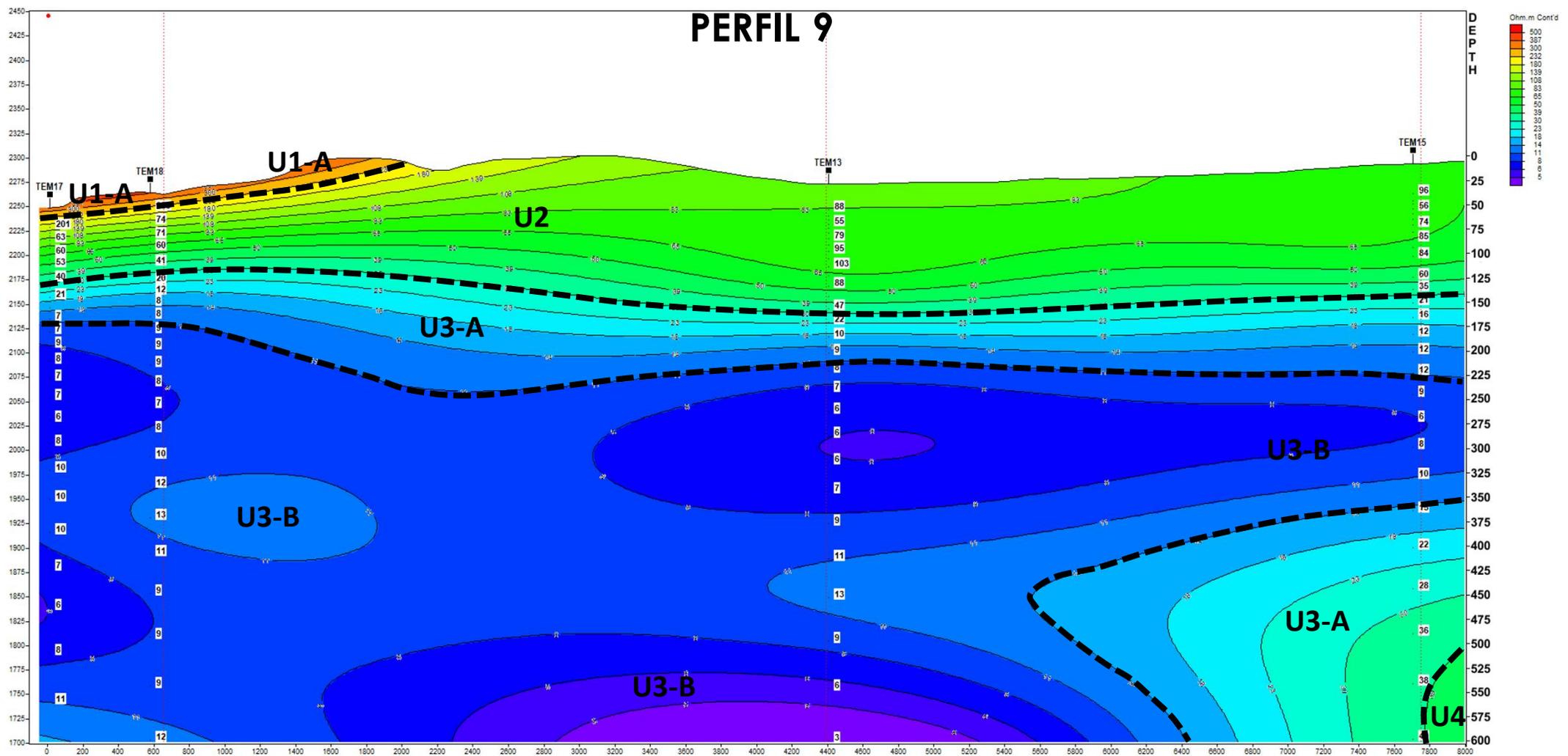




UNIDAD GEOELÉCTRICA	LITOLOGÍA ASOCIADA	UNIDAD GEOELÉCTRICA	LITOLOGÍA ASOCIADA
U1-A	SEDIMENTOS PIROCLÁSTICOS COMPACTADOS.	U3-B	ARCILLAS LIMPIAS.
U2	INTERCALACIONES DE BRECHAS, CONGLOMERADOS Y TOBAS CON POCA PRESENCIA DE ARCILLA .		
U3-A	TOBAS ARCILLOSAS.		



Figura 2.9 – Perfil geoelectrico T42-T37-T30-T29-T28-T9

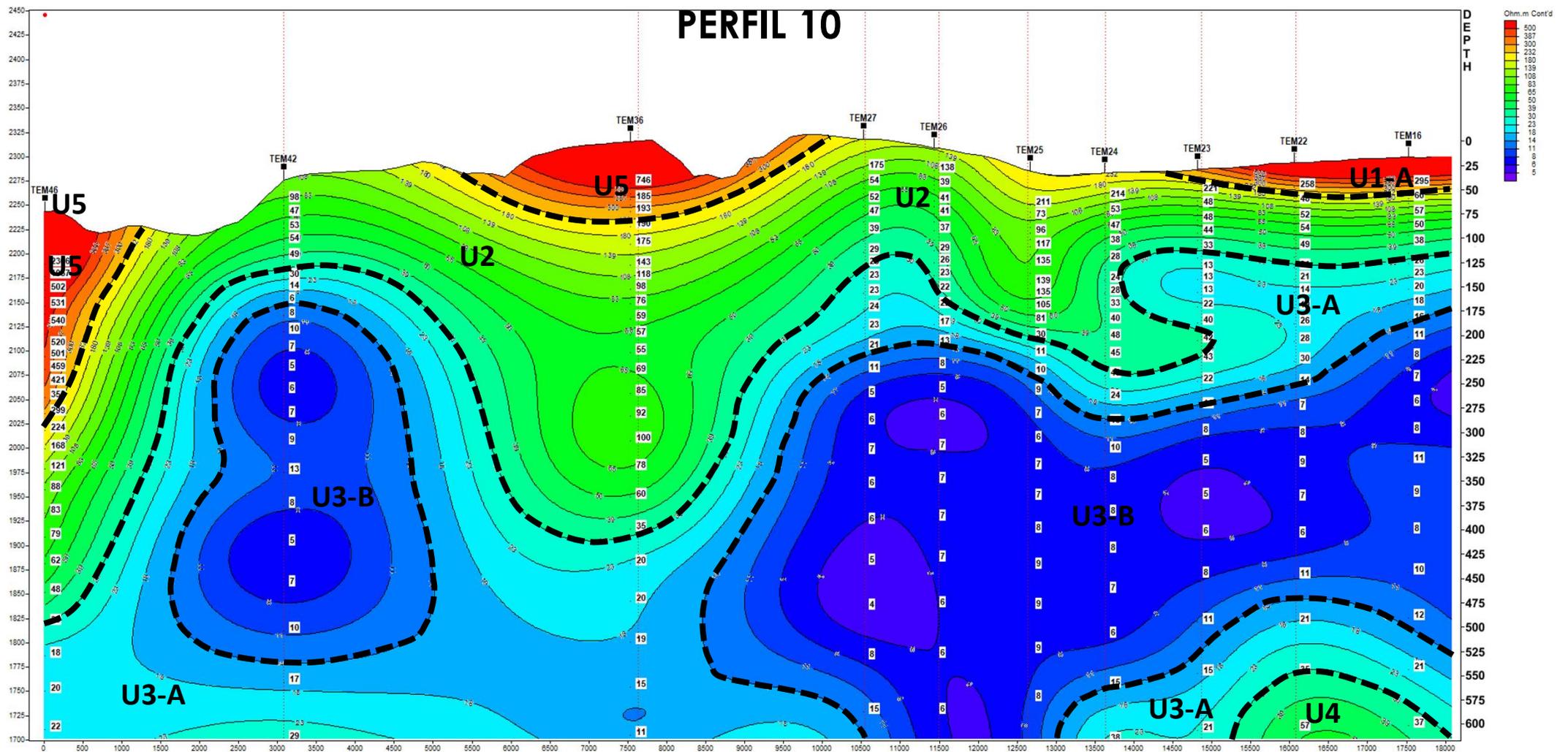


UNIDAD GEOELÉCTRICA	LITOLOGÍA ASOCIADA	UNIDAD GEOELÉCTRICA	LITOLOGÍA ASOCIADA
U1-A	SEDIMENTOS PIROCLÁSTICOS COMPACTADOS.	U3-B	ARCILLAS LIMPIAS.
U2	INTERCALACIONES DE BRECHAS, CONGLOMERADOS Y TOBAS CON POCA PRESENCIA DE ARCILLA .	U4	CONGLOMERADOS EMPACADOS EN MATRIZ ARENOSA .
U3-A	TOBAS ARCILLOSAS.		



Figura 2.10 – Perfil geoelectrico T17-T18-T13-T15



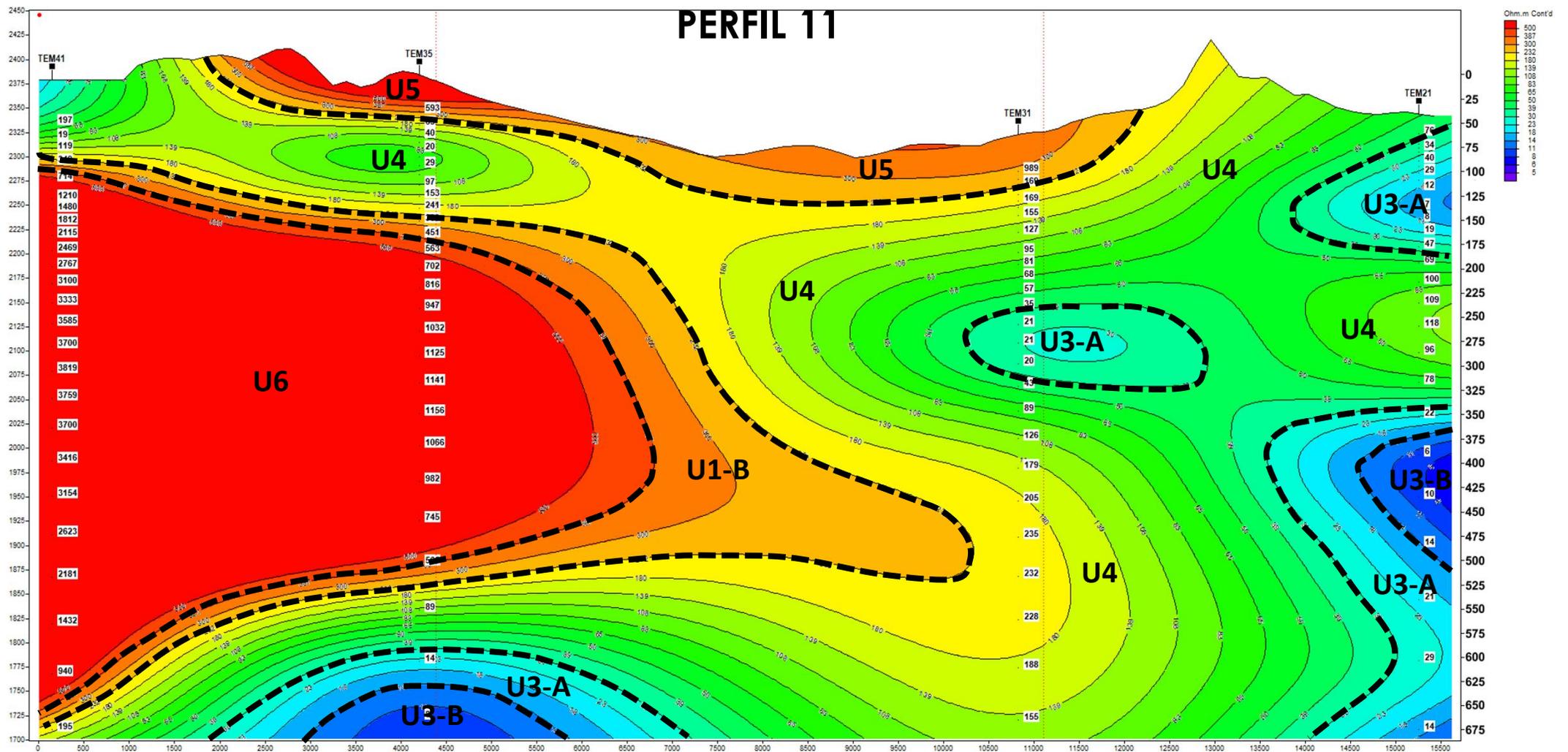


UNIDAD GEOELÉCTRICA	LITOLOGÍA ASOCIADA	UNIDAD GEOELÉCTRICA	LITOLOGÍA ASOCIADA
U1-A	SEDIMENTOS PIROCLÁSTICOS COMPACTADOS.	U3-B	ARCILLAS LIMPIAS.
U2	INTERCALACIONES DE BRECHAS, CONGLOMERADOS Y TOBAS CON POCA PRESENCIA DE ARCILLA .	U4	CONGLOMERADOS EMPACADOS EN MATRIZ ARENOSA .
U3-A	TOBAS ARCILLOSAS.	U5	ROCA CALIZA.



Figura 2.11 – Perfil geoelectrico T46-T42-T36-T27-T26-T25-T24-T23-T22-T16

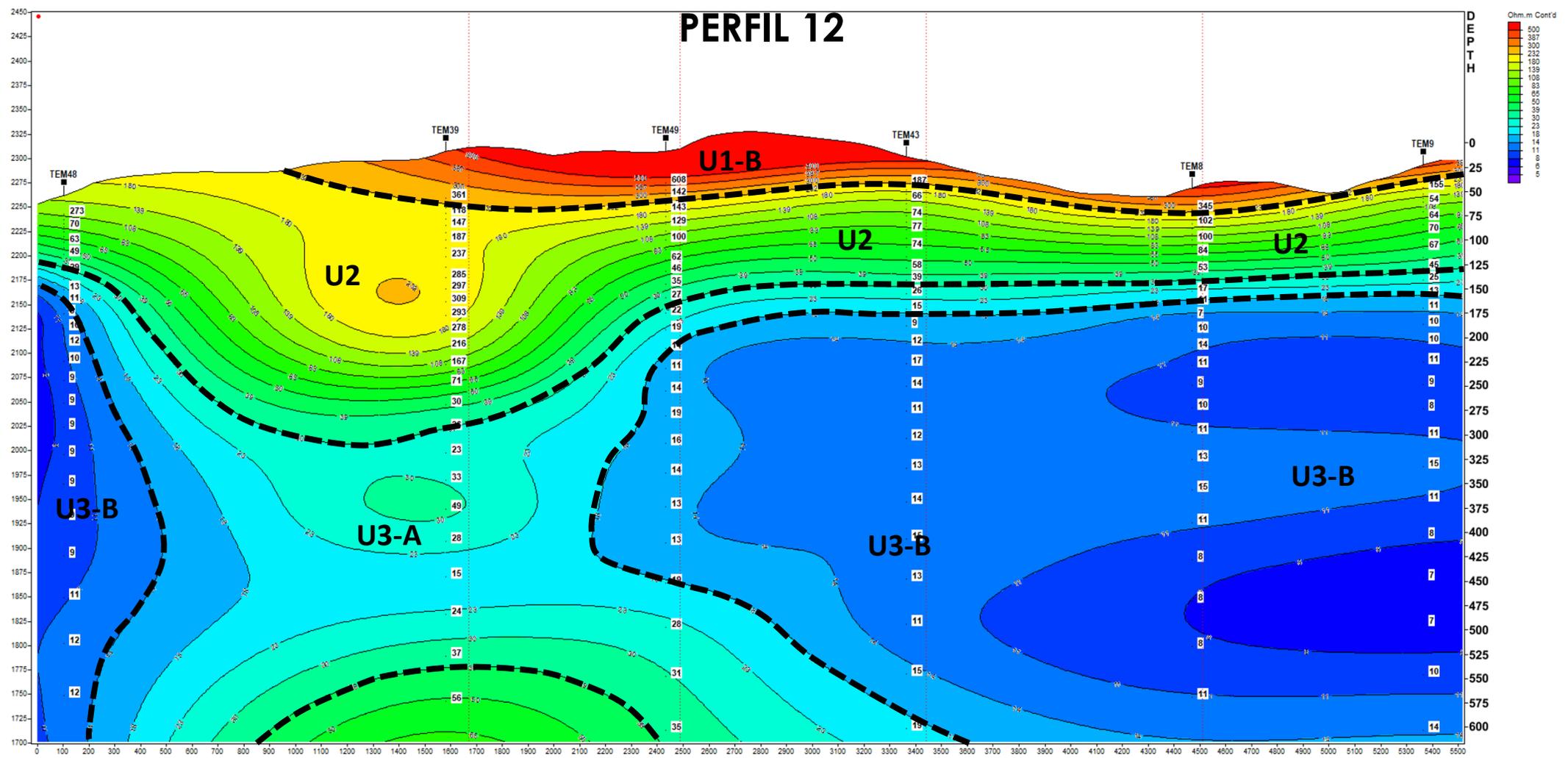




UNIDAD GEOELÉCTRICA	LITOLOGÍA ASOCIADA	UNIDAD GEOELÉCTRICA	LITOLOGÍA ASOCIADA
U1-A	SEDIMENTOS PIROCLÁSTICOS COMPACTADOS.	U3-B	ARCILLAS LIMPIAS.
U1-B	COLADA DE ROCA ÍGNEA DE COMPOSICIÓN BASÁLTICA CON DIFERENTES GRADOS DE FRACTURAMIENTO.	U4	CONGLOMERADOS EMPACADOS EN MATRIZ ARENOSA .
U2	INTERCALACIONES DE BRECHAS, CONGLOMERADOS Y TOBAS CON POCA PRESENCIA DE ARCILLA .	U5	ROCA CALIZA.
U3-A	TOBAS ARCILLOSAS.	U6	DIQUE ANDESÍTICO.



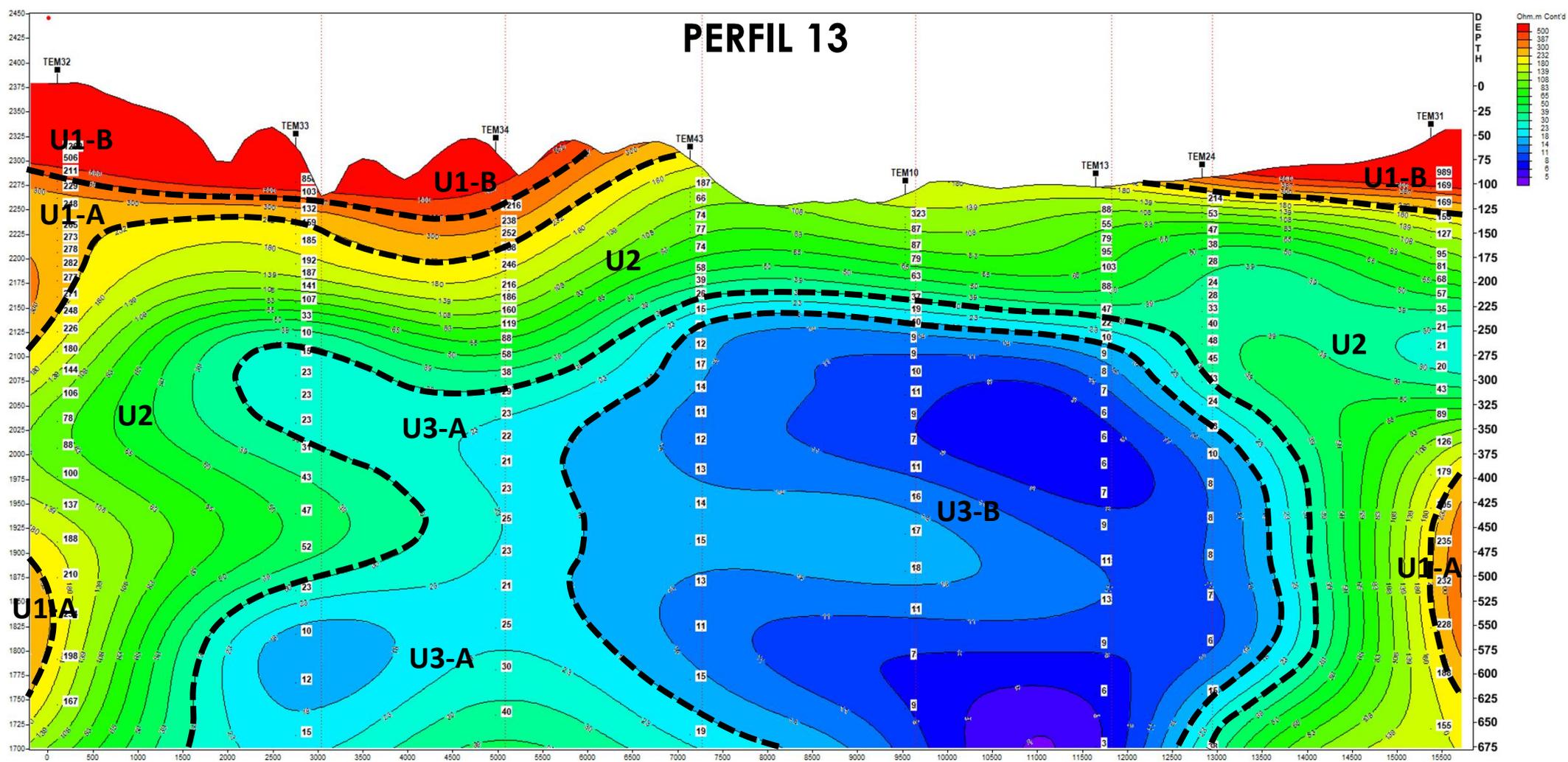
Figura 2.12 – Perfil geoelectrico T41-T35-T31-T21



UNIDAD GEOELÉCTRICA	LITOLOGÍA ASOCIADA	UNIDAD GEOELÉCTRICA	LITOLOGÍA ASOCIADA
U1-B	COLADA DE ROCA ÍGNEA DE COMPOSICIÓN BASÁLTICA CON DIFERENTES GRADOS DE FRACTURAMIENTO.	U3-B	ARCILLAS LIMPIAS.
U2	INTERCALACIONES DE BRECHAS, CONGLOMERADOS Y TOBAS CON POCA PRESENCIA DE ARCILLA .		
U3-A	TOBAS ARCILLOSAS.		



Figura 2.13 – Perfil geoelectrico T48-T39-T49-T43-T8-T9



UNIDAD GEOELÉCTRICA	LITOLOGÍA ASOCIADA	UNIDAD GEOELÉCTRICA	LITOLOGÍA ASOCIADA
U1-A	SEDIMENTOS PIROCLÁSTICOS COMPACTADOS.	U3-B	ARCILLAS LIMPIAS.
U1-B	COLADA DE ROCA ÍGNEA DE COMPOSICIÓN BASÁLTICA CON DIFERENTES GRADOS DE FRACTURAMIENTO.		
U2	INTERCALACIONES DE BRECHAS, CONGLOMERADOS Y TOBAS CON POCA PRESENCIA DE ARCILLA .		
U3-A	TOBAS ARCILLOSAS.		

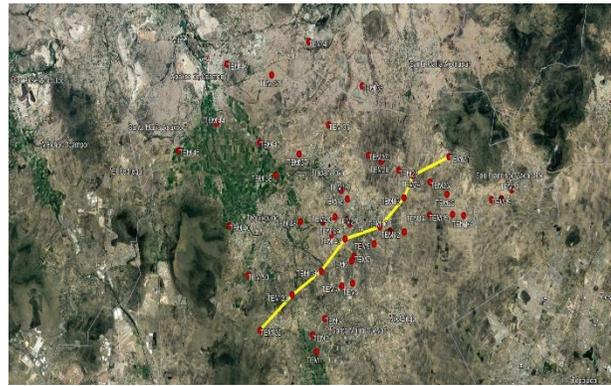


Figura 2.14 – Perfil geoelectrico T32-T33-T34-T43-T10-T13-T24-T31

ANEXO 3

VISUALIZACIÓN DE CORTES DE RESISTIVIDAD EN PLANTA A DIFERENTES ELEVACIONES Y SOBREPONICIÓN DE LOS MISMOS EN LA ZONA DE ESTUDIO



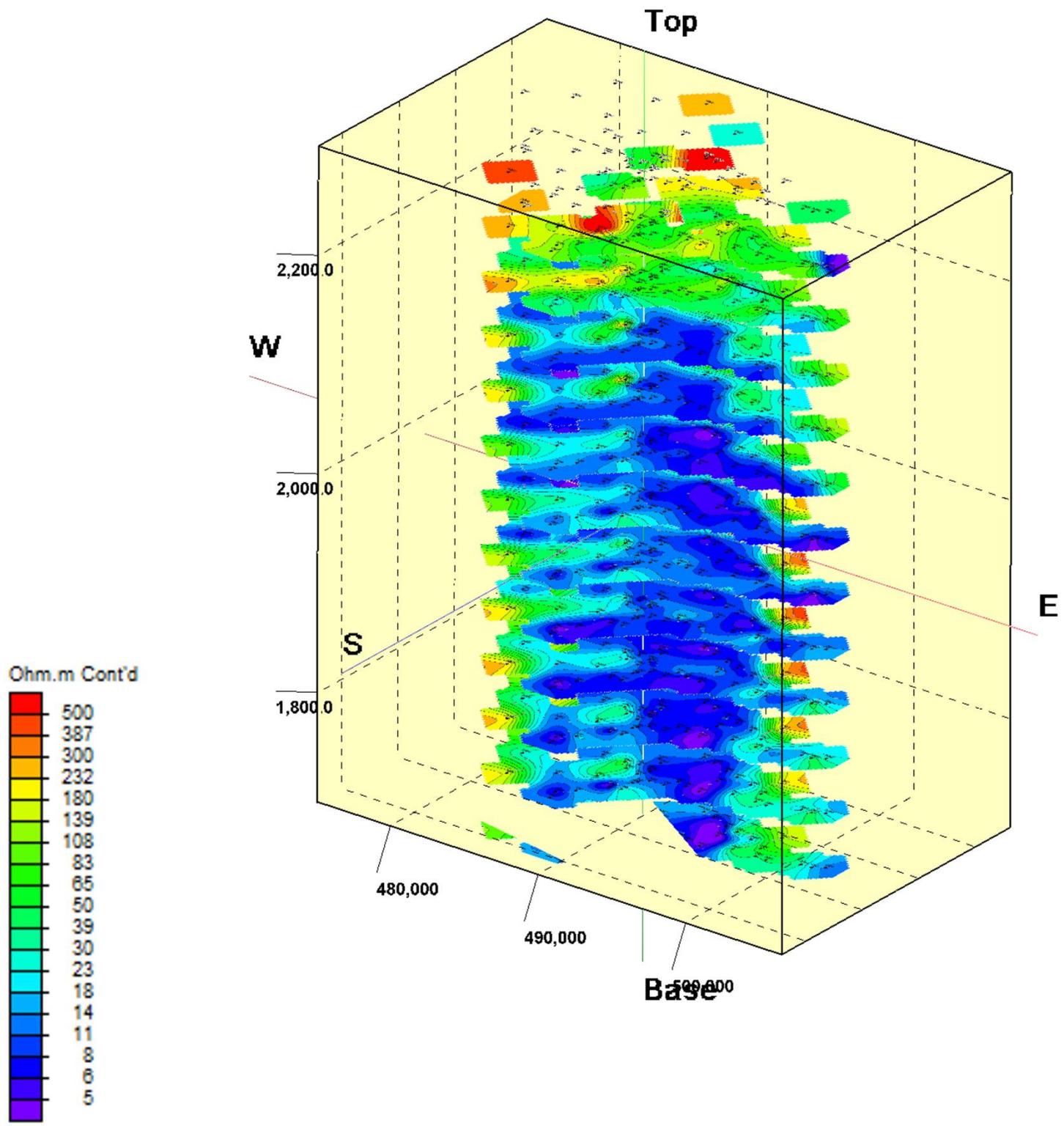


Figura 3.1 – Vista General de Cortes en Planta Orientación NW-SE.



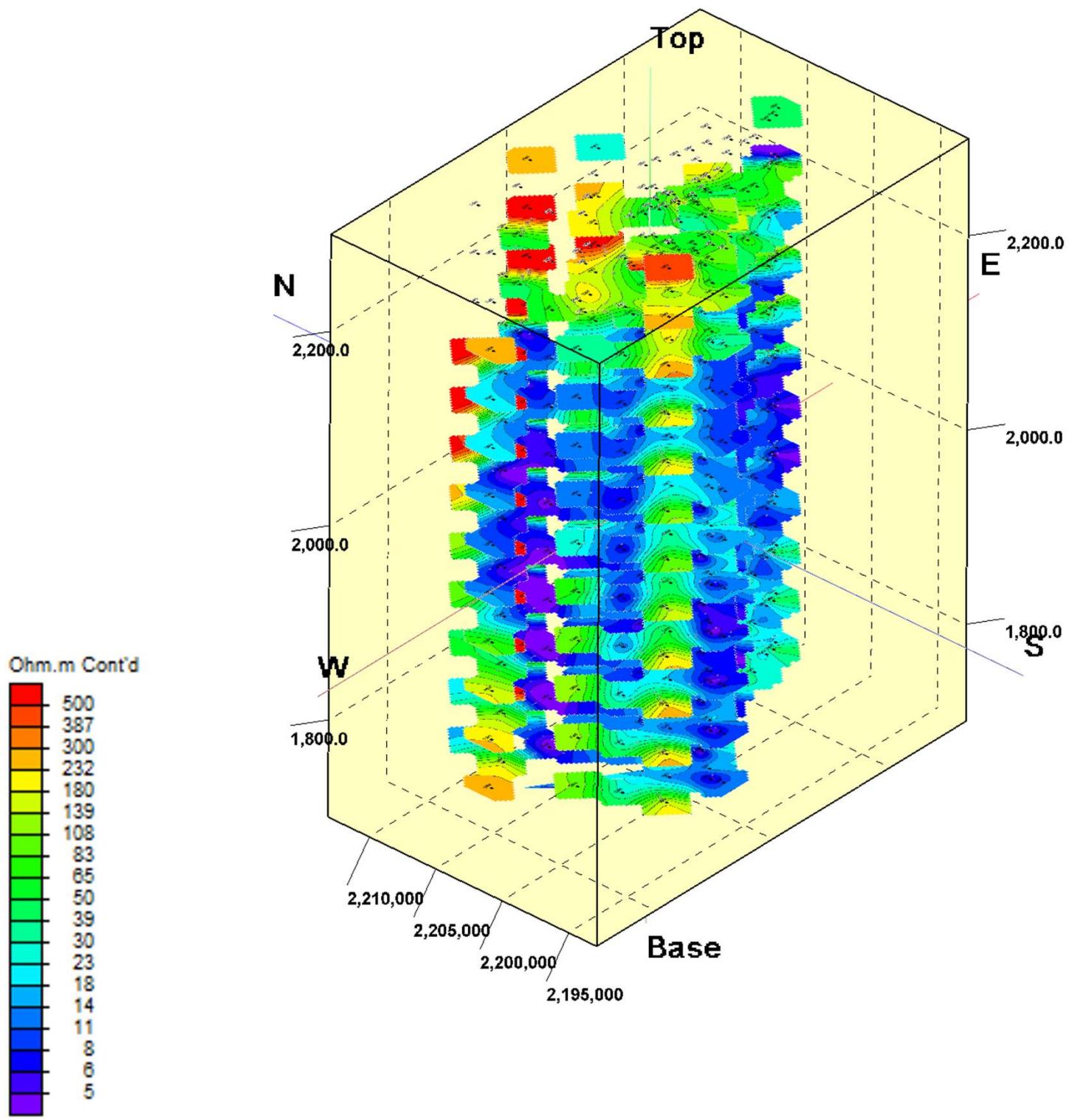


Figura 3.2 – Vista General de Cortes en Planta Orientación NE-SW.



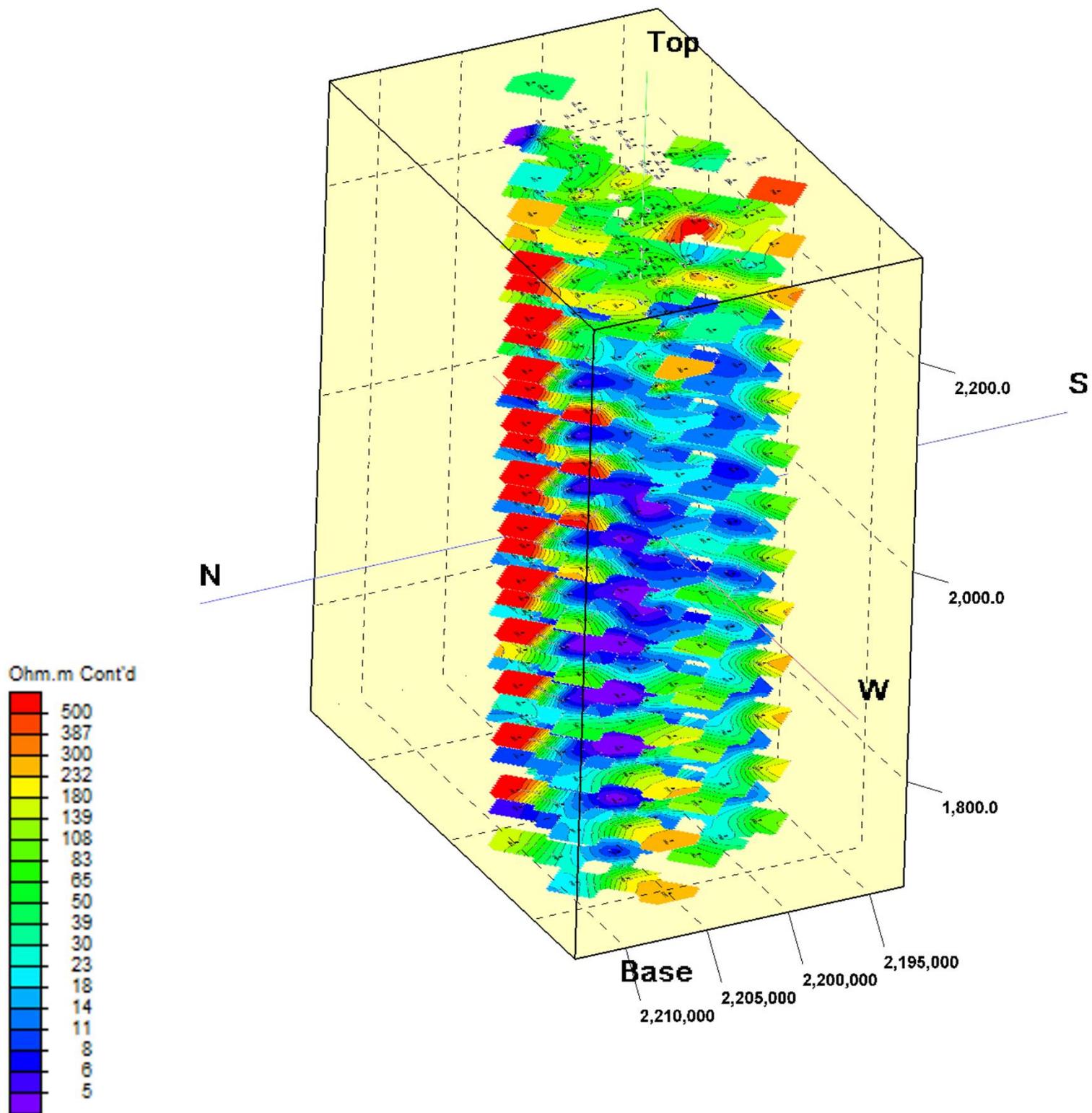


Figura 3.3 – Vista General de Cortes en Planta Orientación NW.



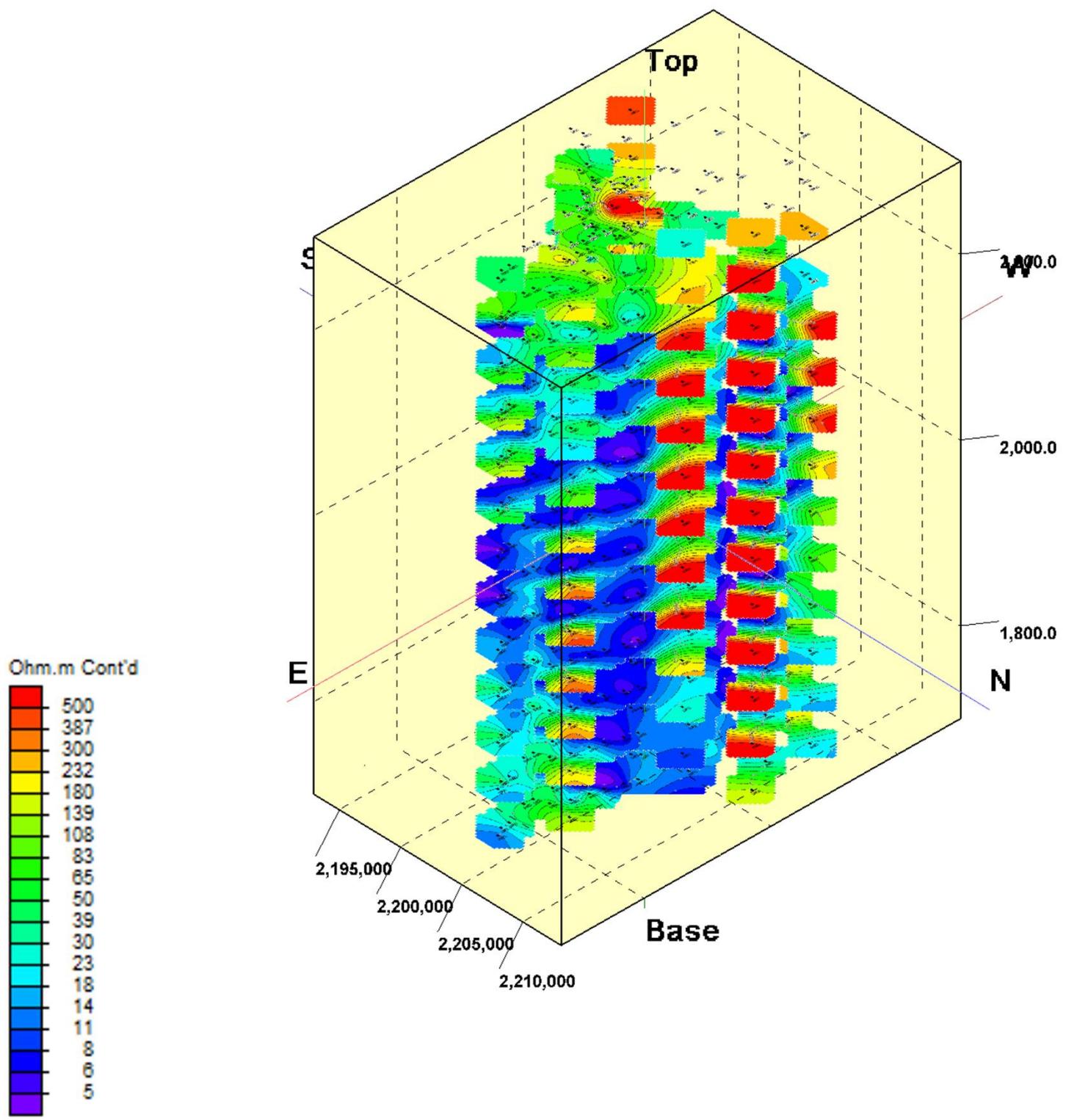


Figura 3.4 – Vista General de Cortes en Planta Orientación SW-NE.



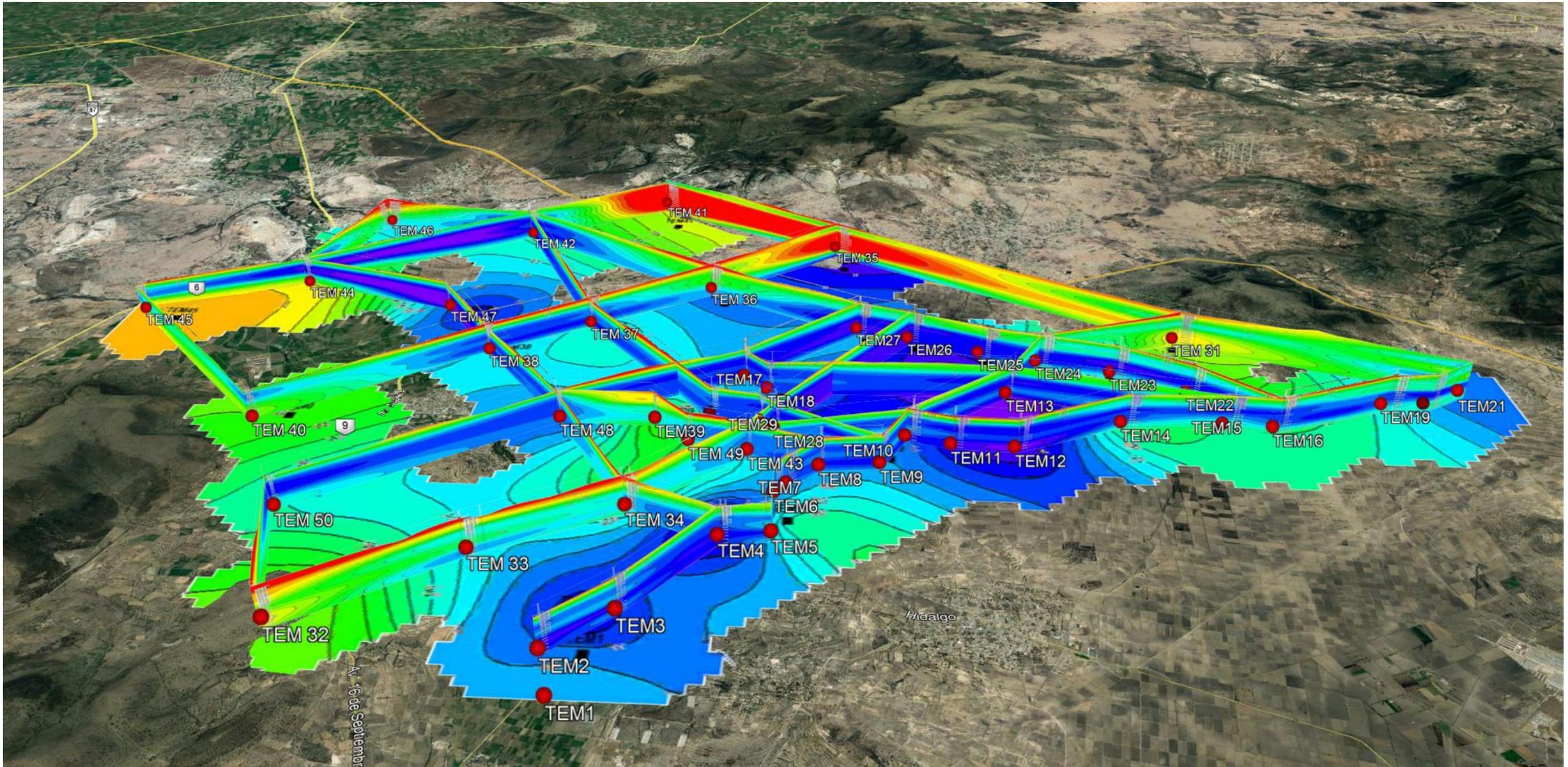


Figura 3.5 – Cortes y secciones con sobreposición satelital a 1700 m.s.n.m.



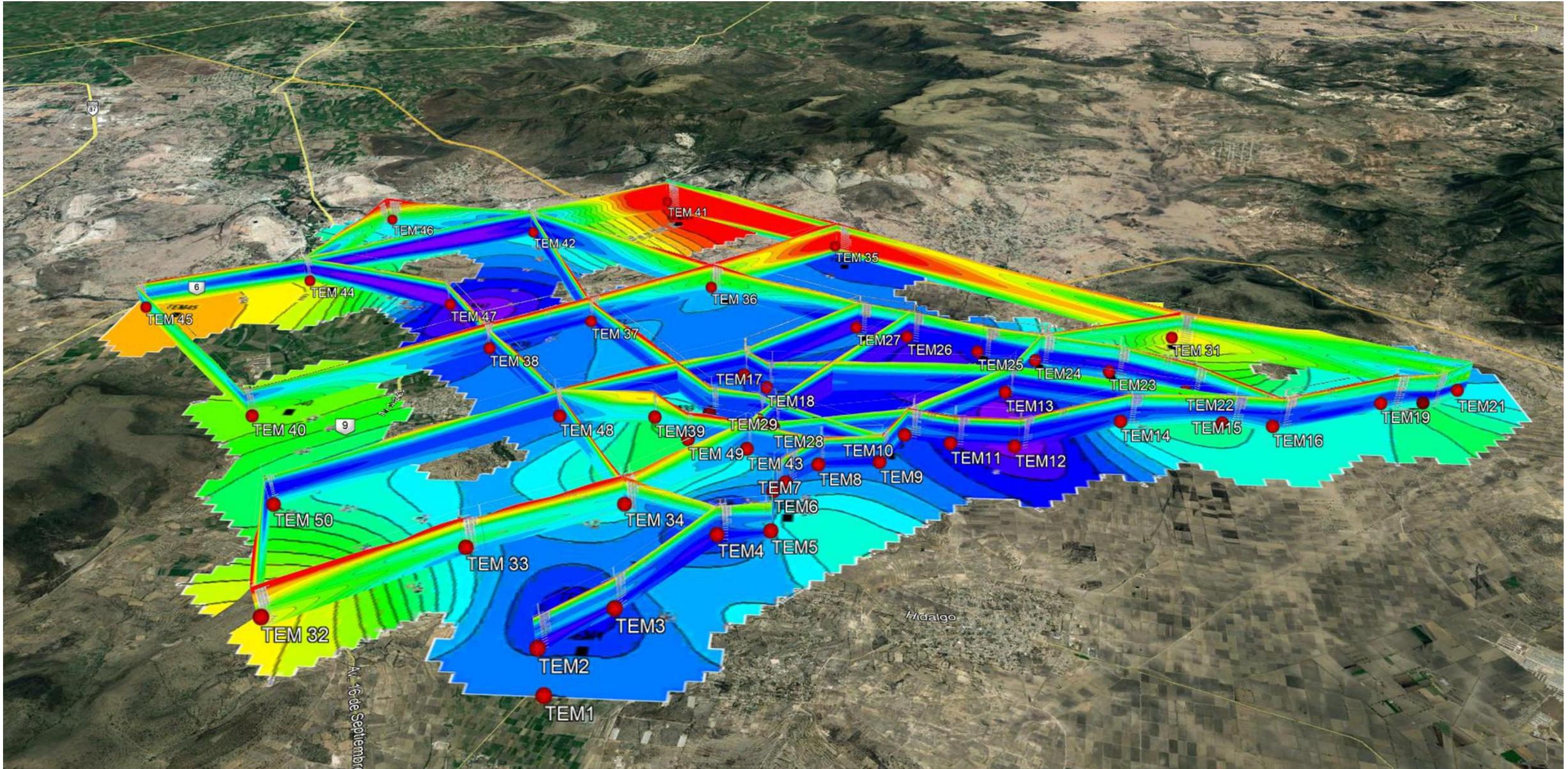


Figura 3.6 – Cortes y secciones con sobreposición satelital a 1750 m.s.n.m.



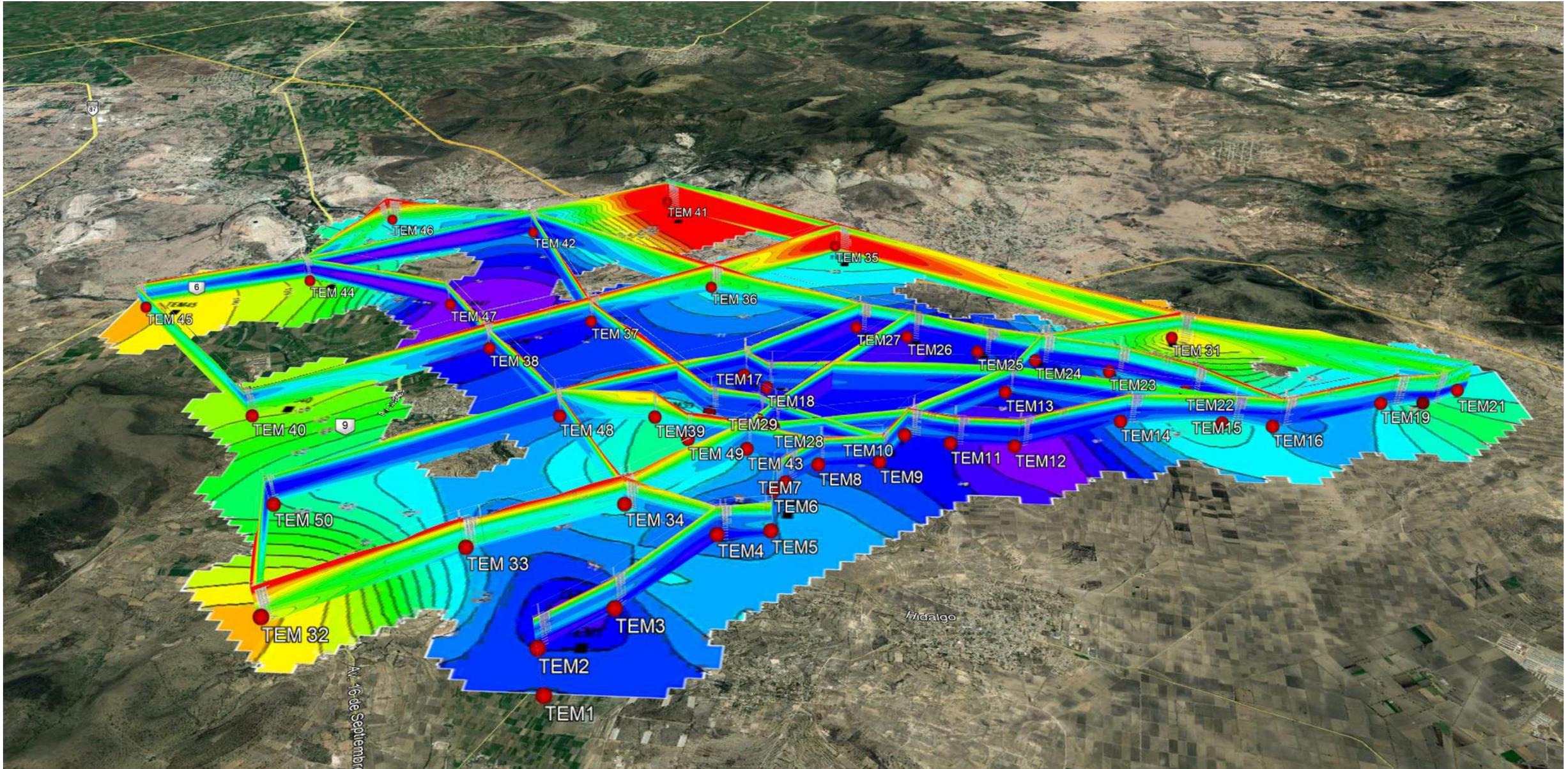


Figura 3.7 – Cortes y secciones con sobreposición satelital a 1800 m.s.n.m.



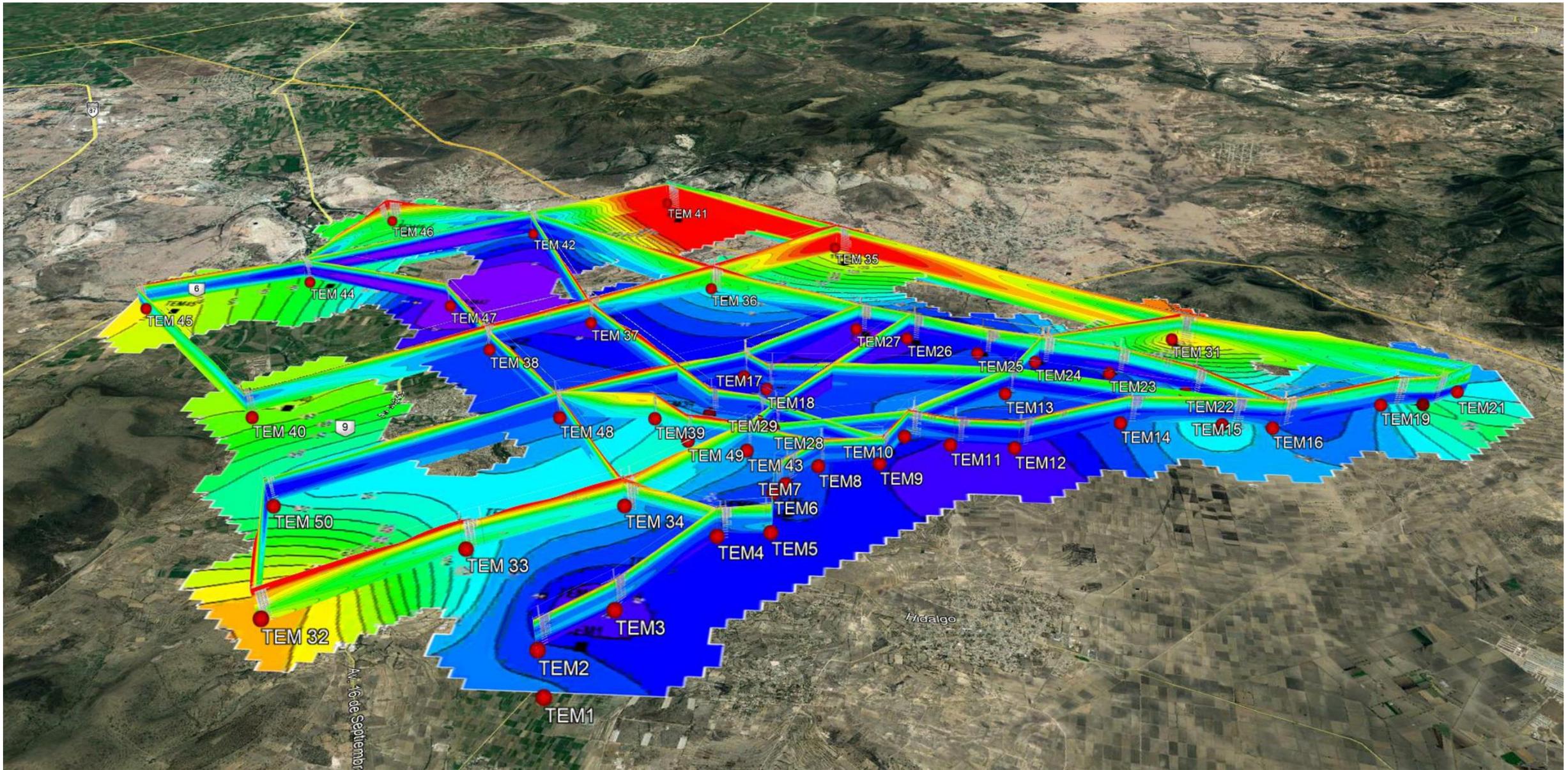


Figura 3.8 – Cortes y secciones con sobreposición satelital a 1850 m.s.n.m.



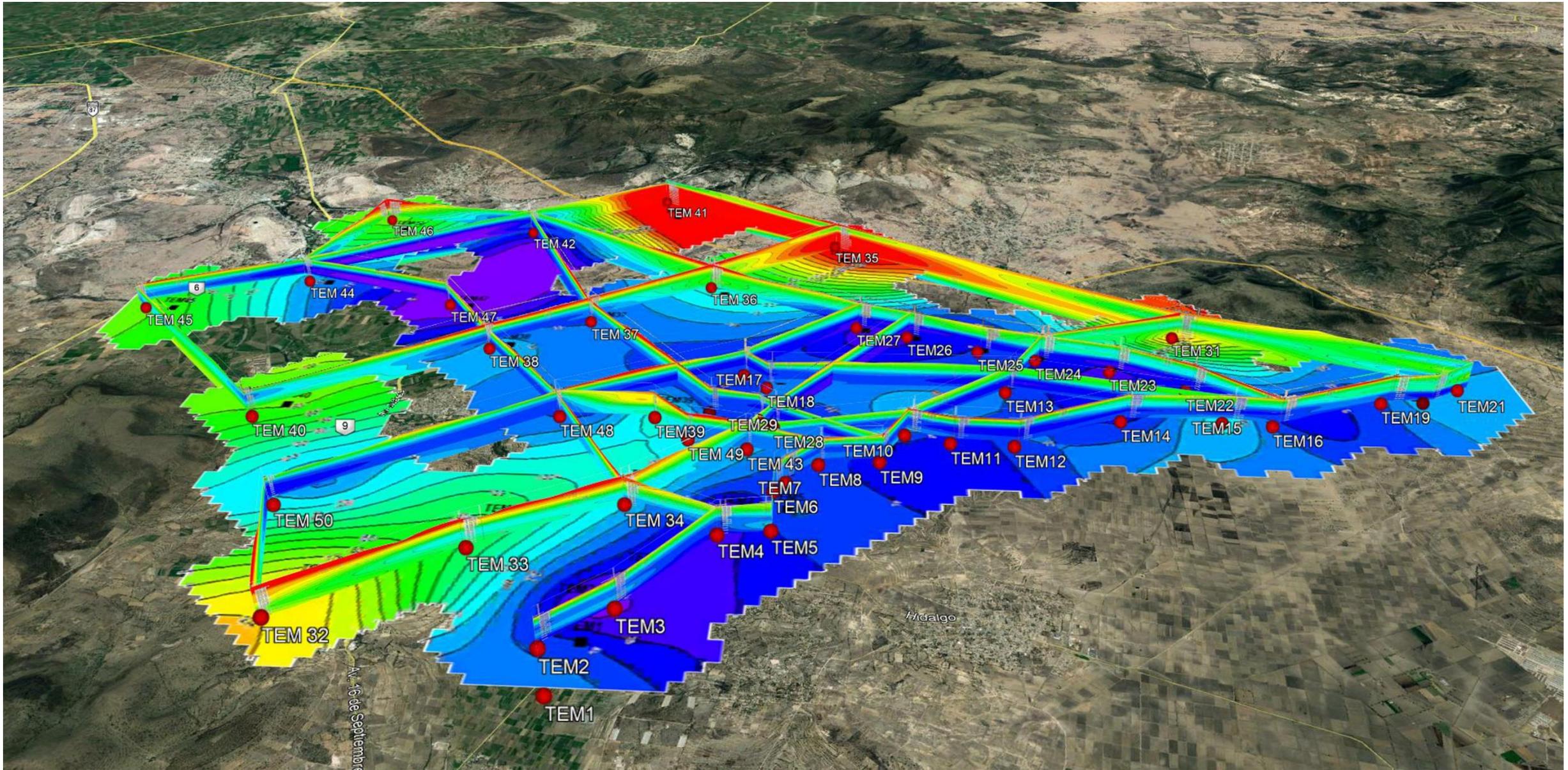


Figura 3.9 – Cortes y secciones con sobreposición satelital a 1900 m.s.n.m.



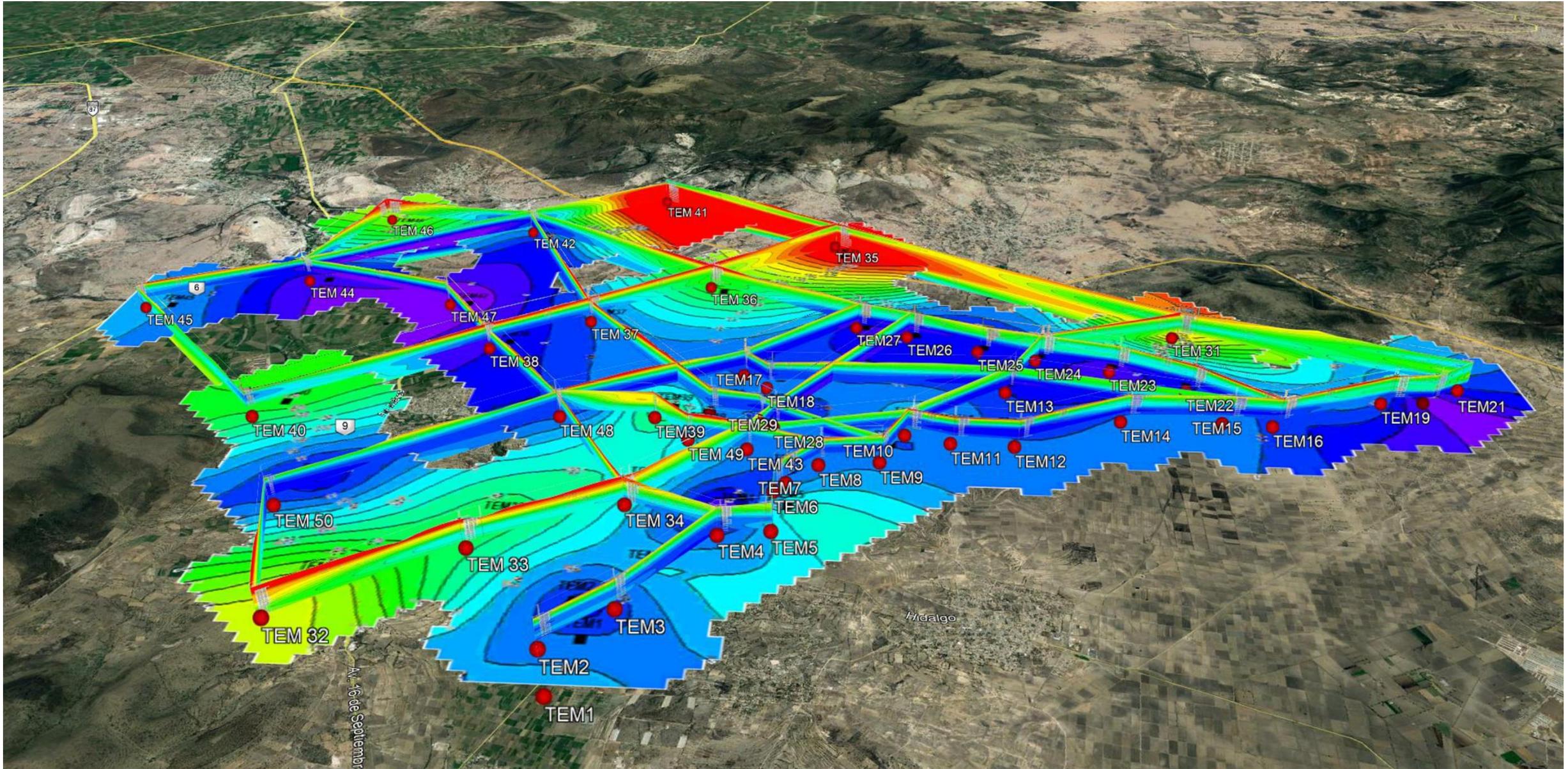


Figura 3.10 – Cortes y secciones con sobreposición satelital a 1950 m.s.n.m.



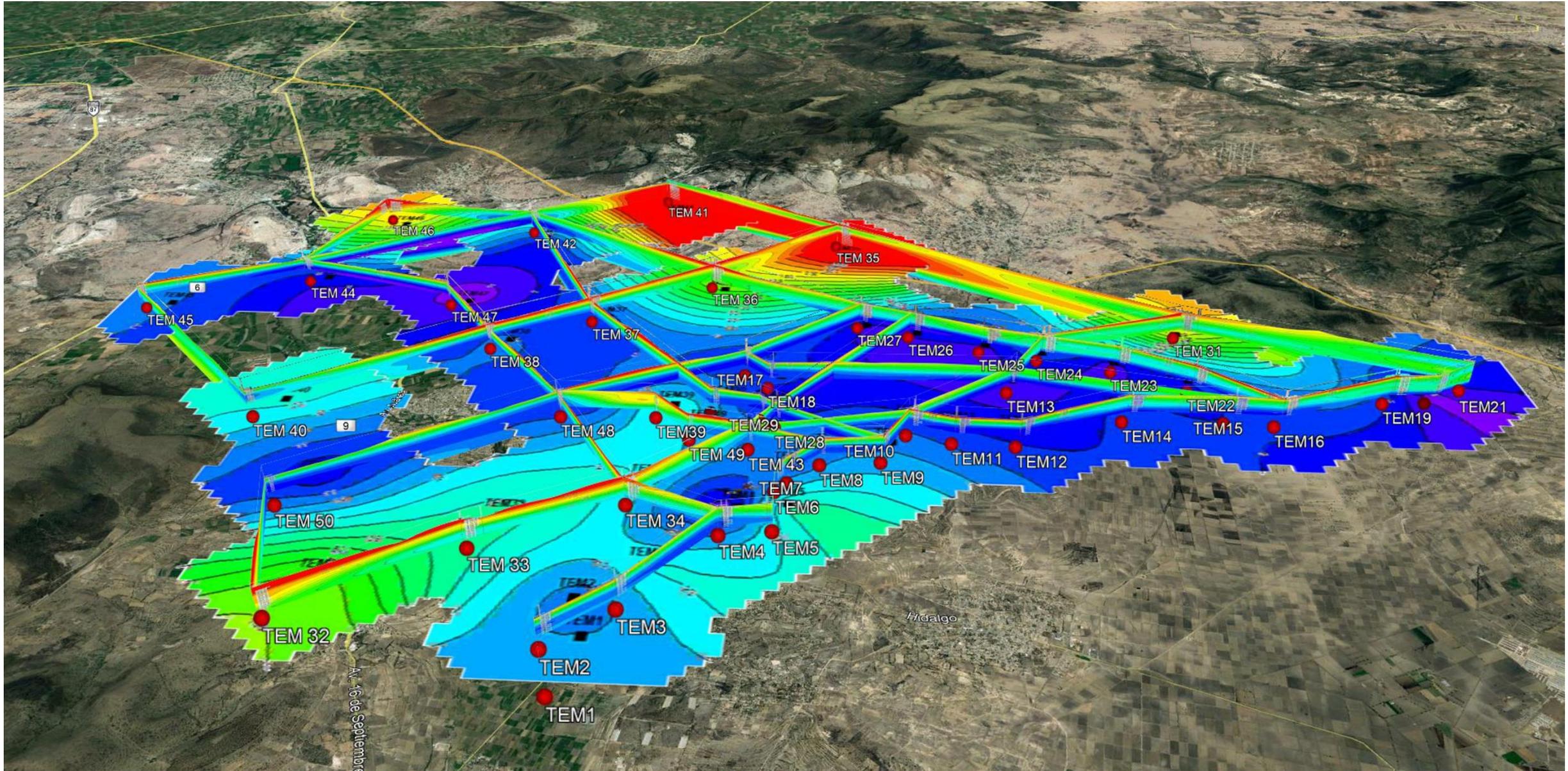


Figura 3.11 – Cortes y secciones con sobreposición satelital a 2000 m.s.n.m.



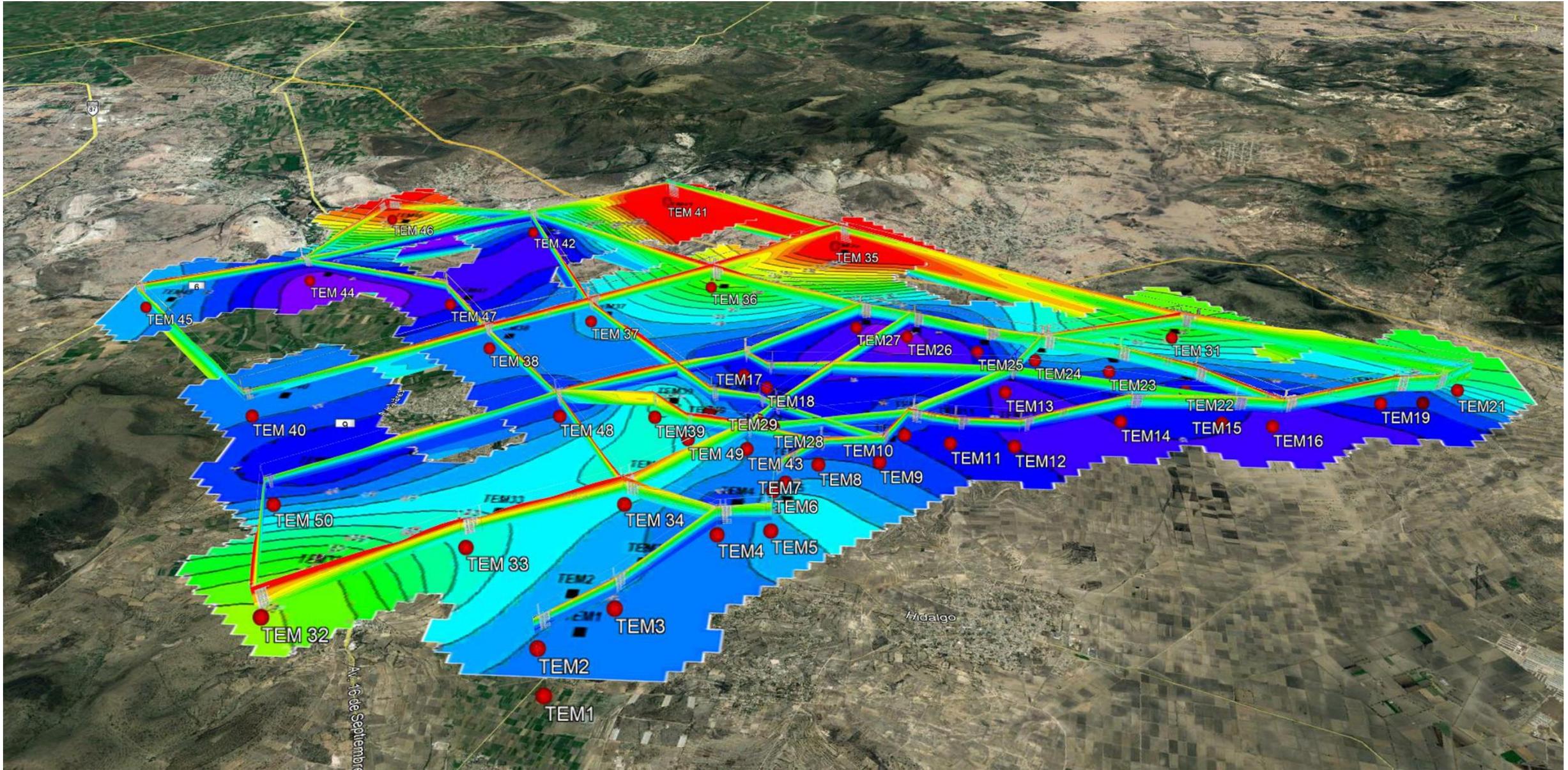


Figura 3.12 – Cortes y secciones con sobreposición satelital a 2050 m.s.n.m.



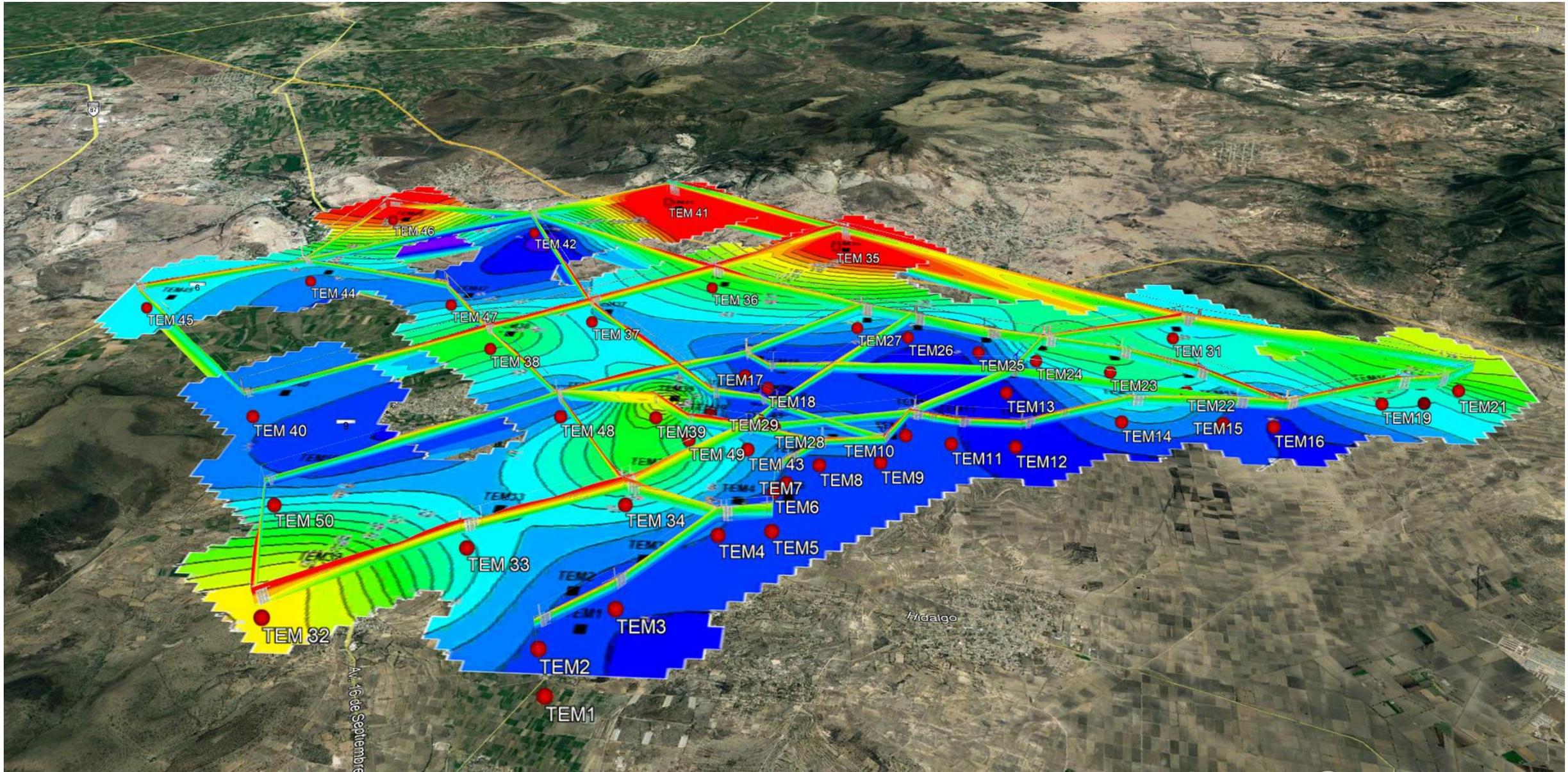


Figura 3.13 – Cortes y secciones con sobreposición satelital a 2100 m.s.n.m.



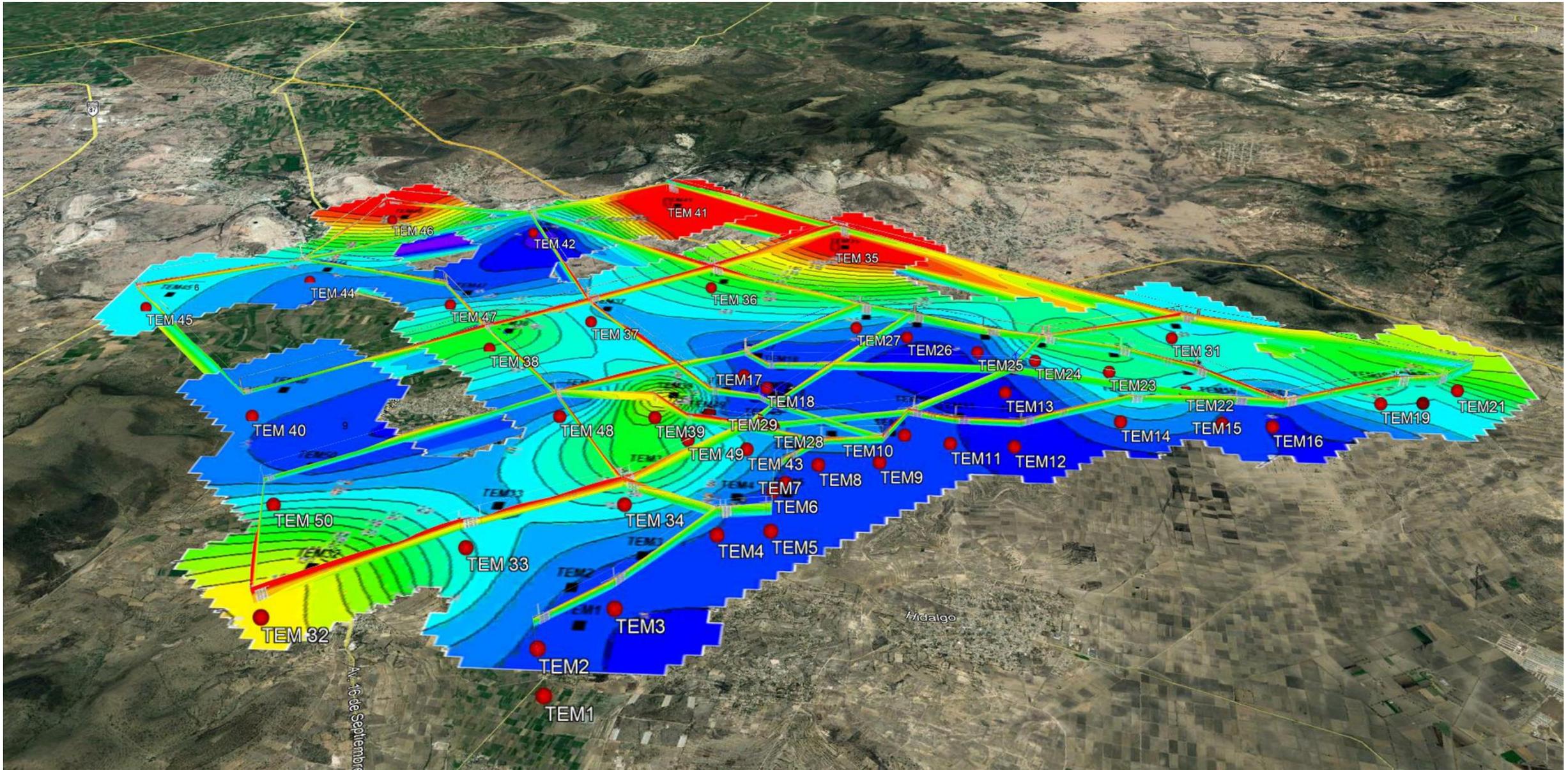


Figura 3.14 – Cortes y secciones con sobreposición satelital a 2150 m.s.n.m.



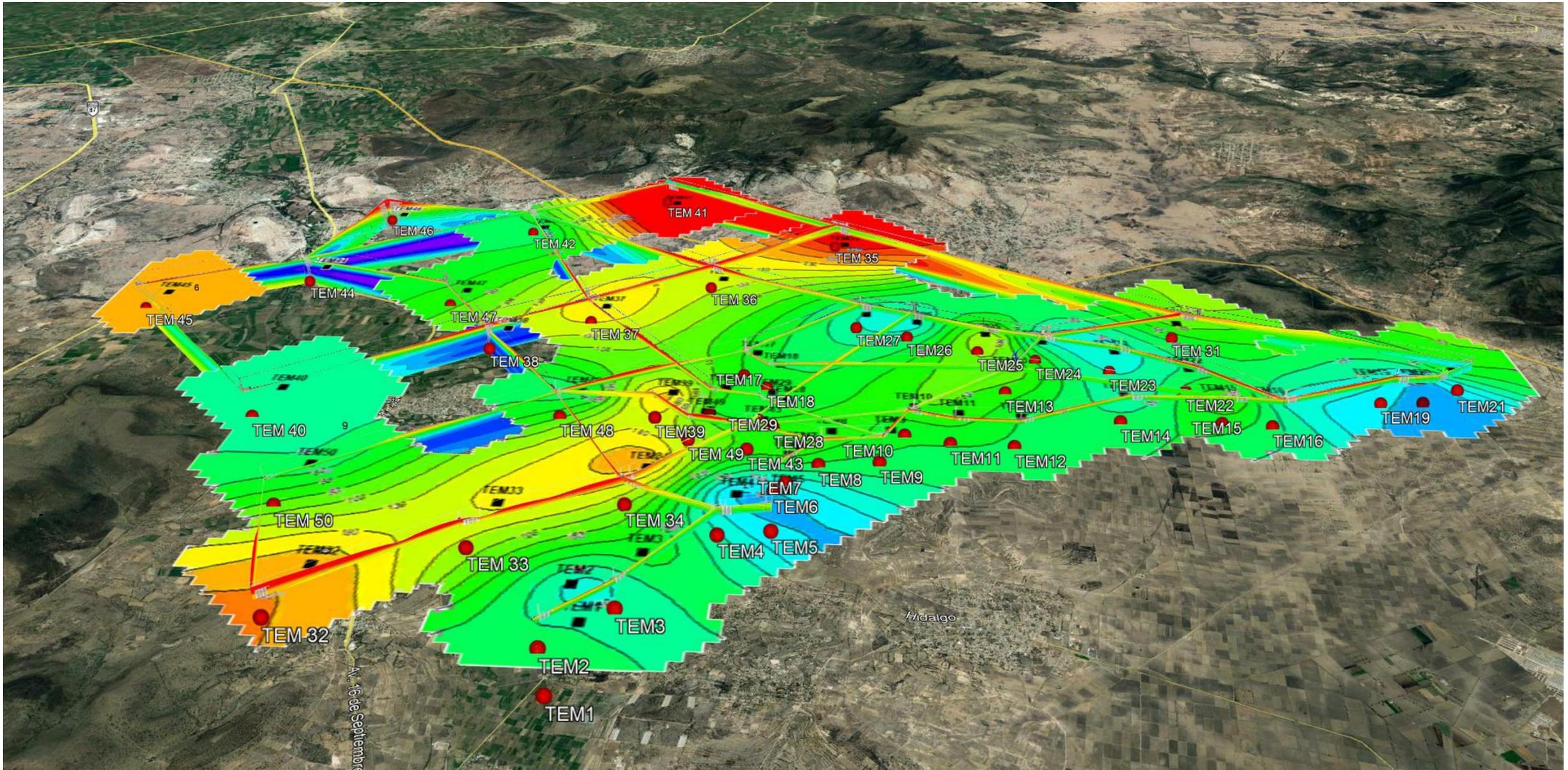


Figura 3.15 – Cortes y secciones con sobreposición satelital a 2200 m.s.n.m.



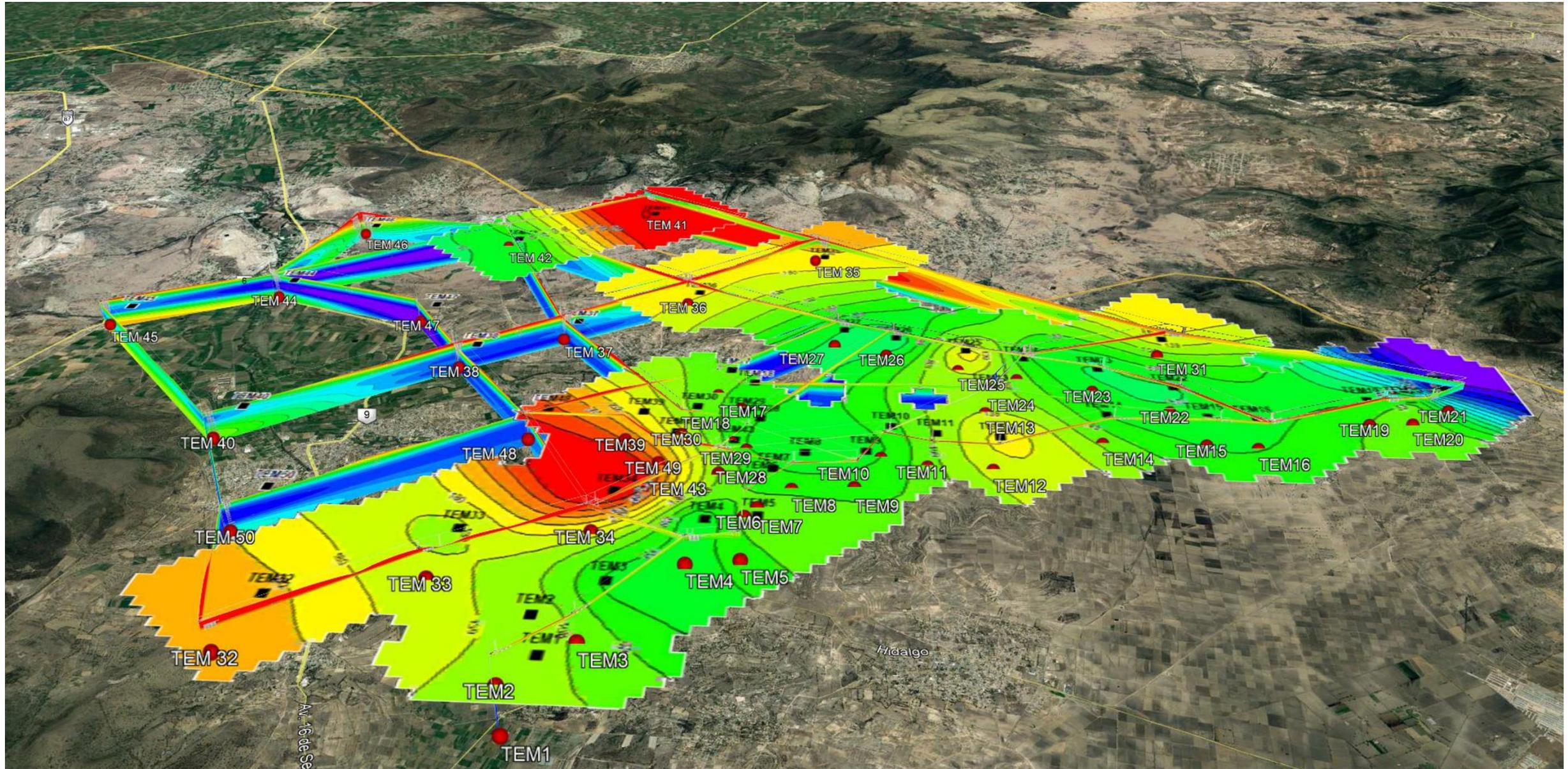


Figura 3.16 – Cortes y secciones con sobreposición satelital a 2250 m.s.n.m.

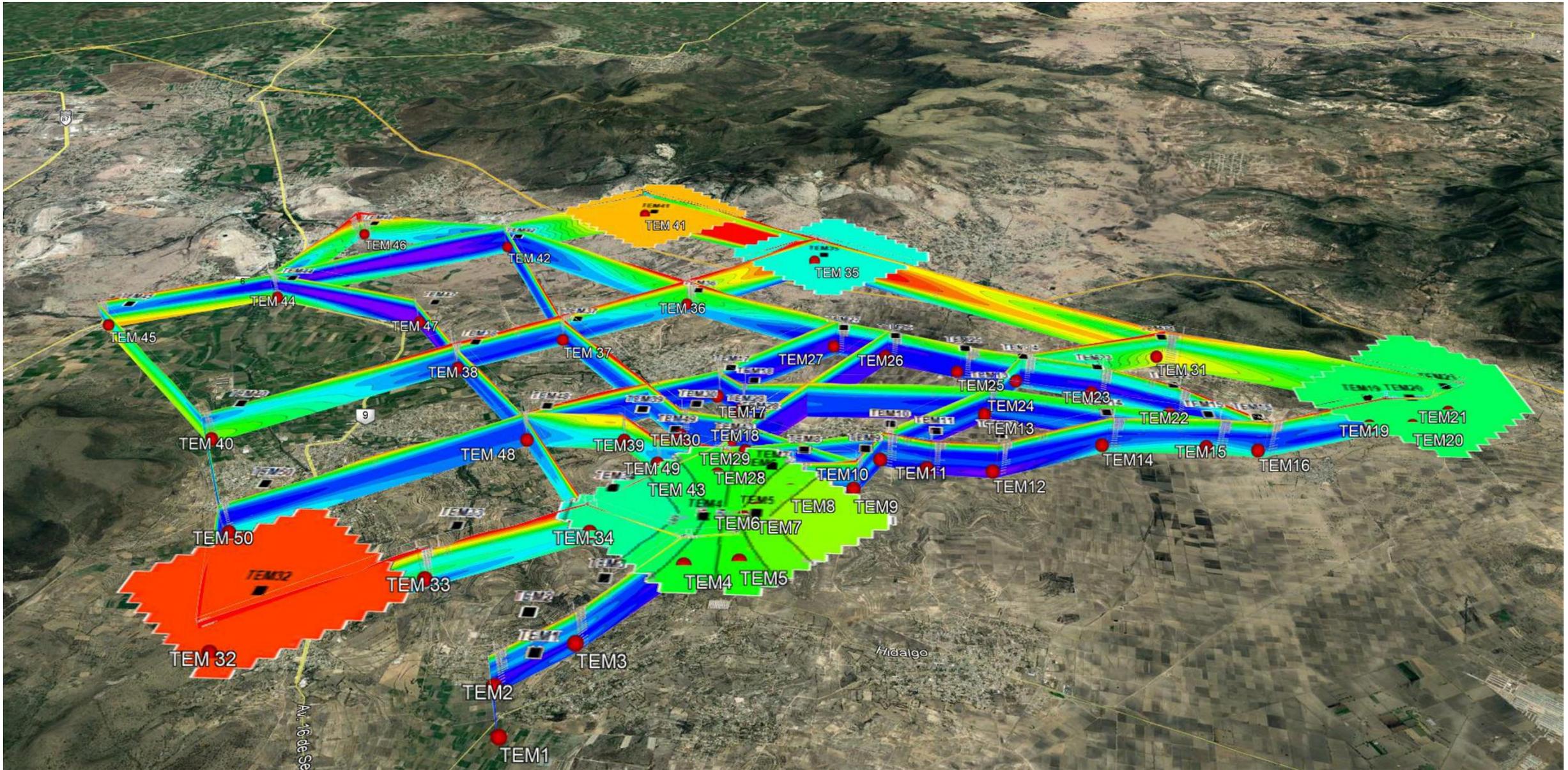
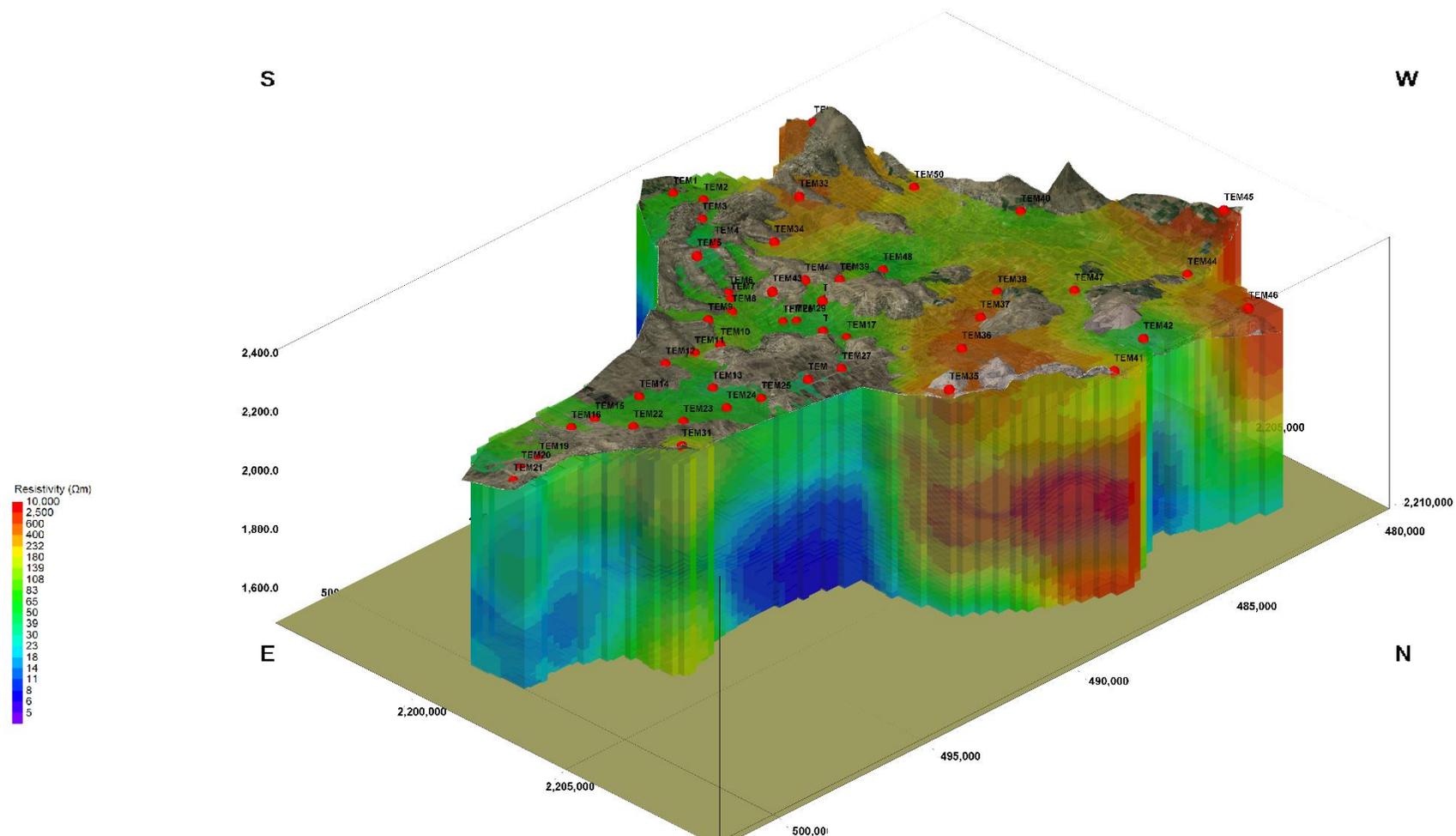


Figura 3.17 – Cortes y secciones con sobreposición satelital a 2300 m.s.n.m.

ANEXO 4

MODELO SÓLIDO 3D DE RESISTIVIDADES



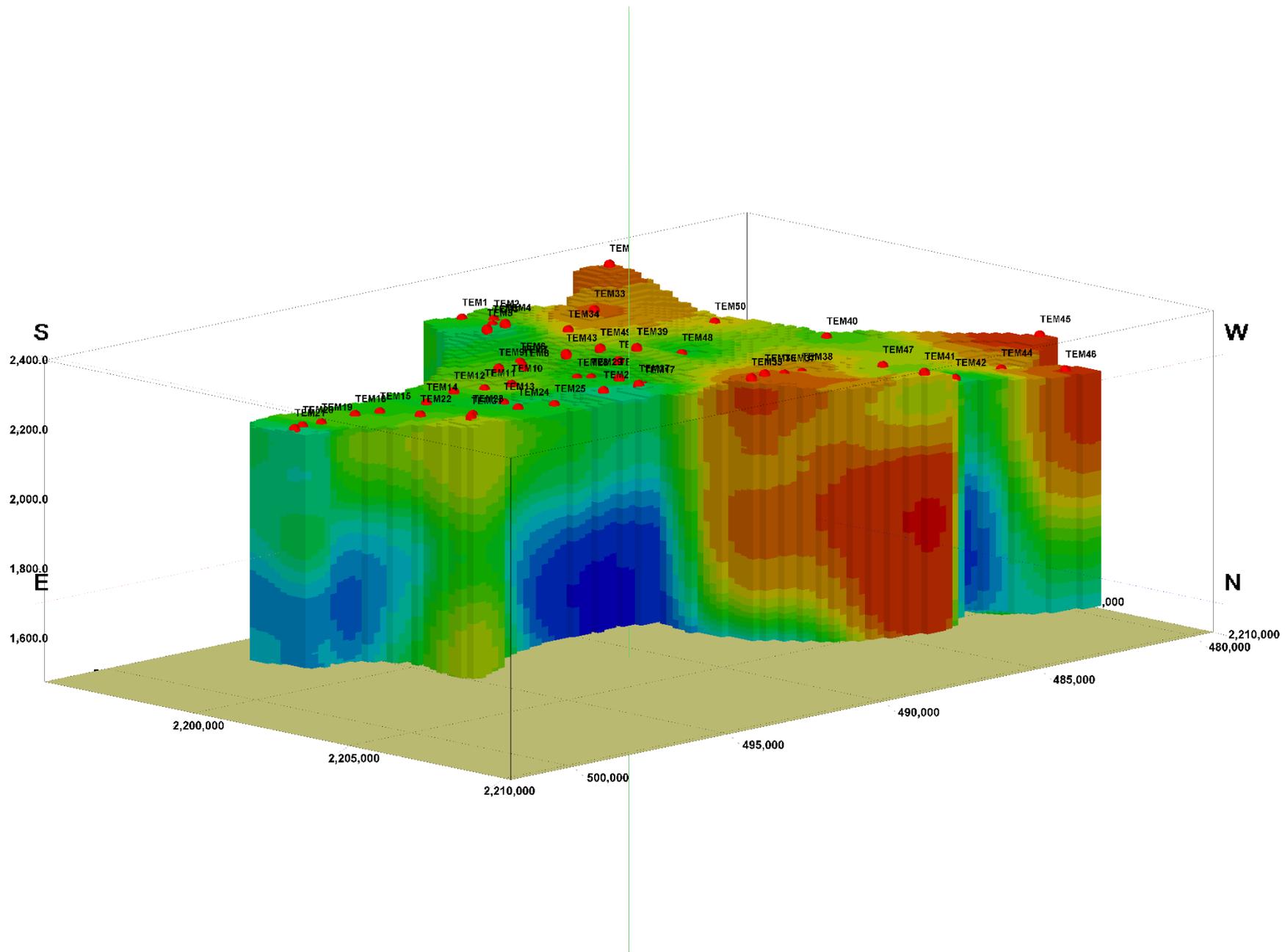
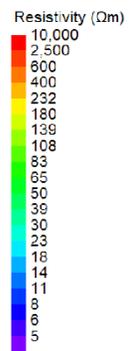


Figura 4.1 – Vista General del Modelo en 3D de resistividades con orientación NE.



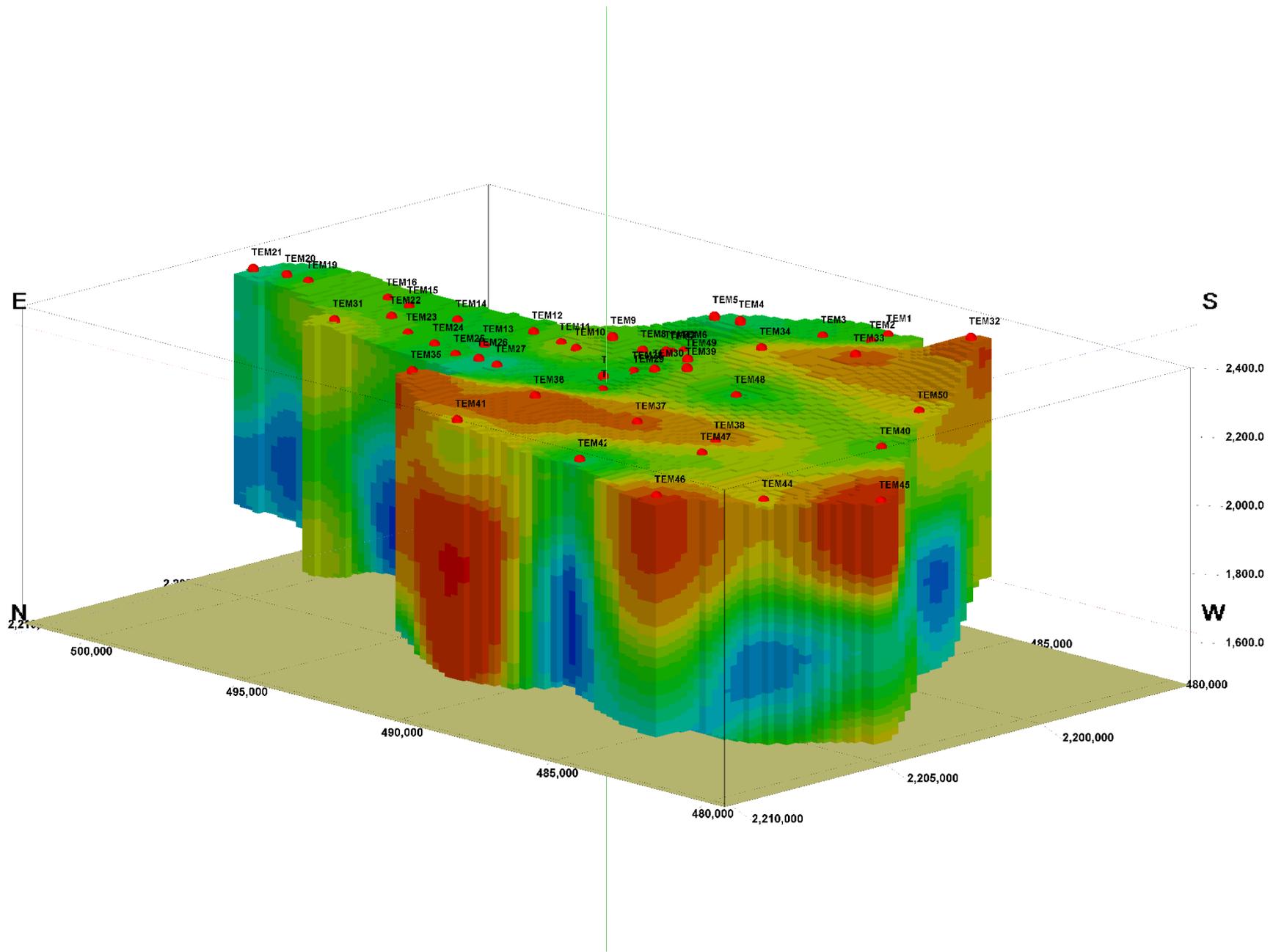
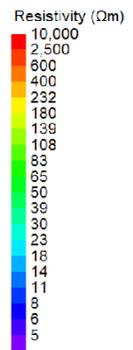


Figura 4.2 – Vista General del Modelo en 3D de resistividades con orientación NW.



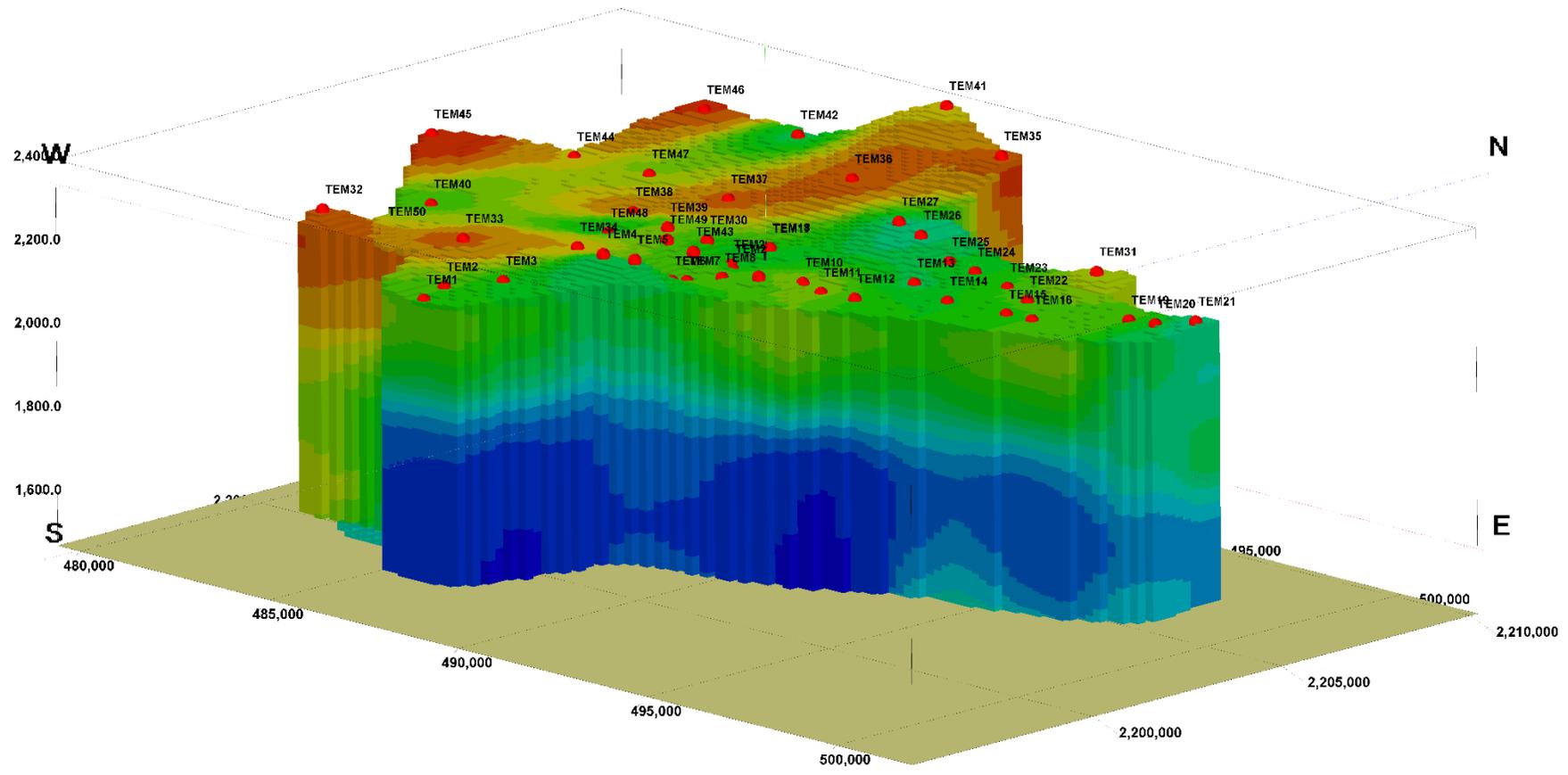
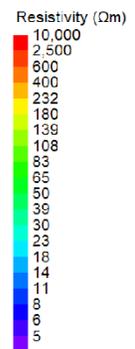


Figura 4.3 – Vista General del Modelo en 3D de resistividades con orientación SE.



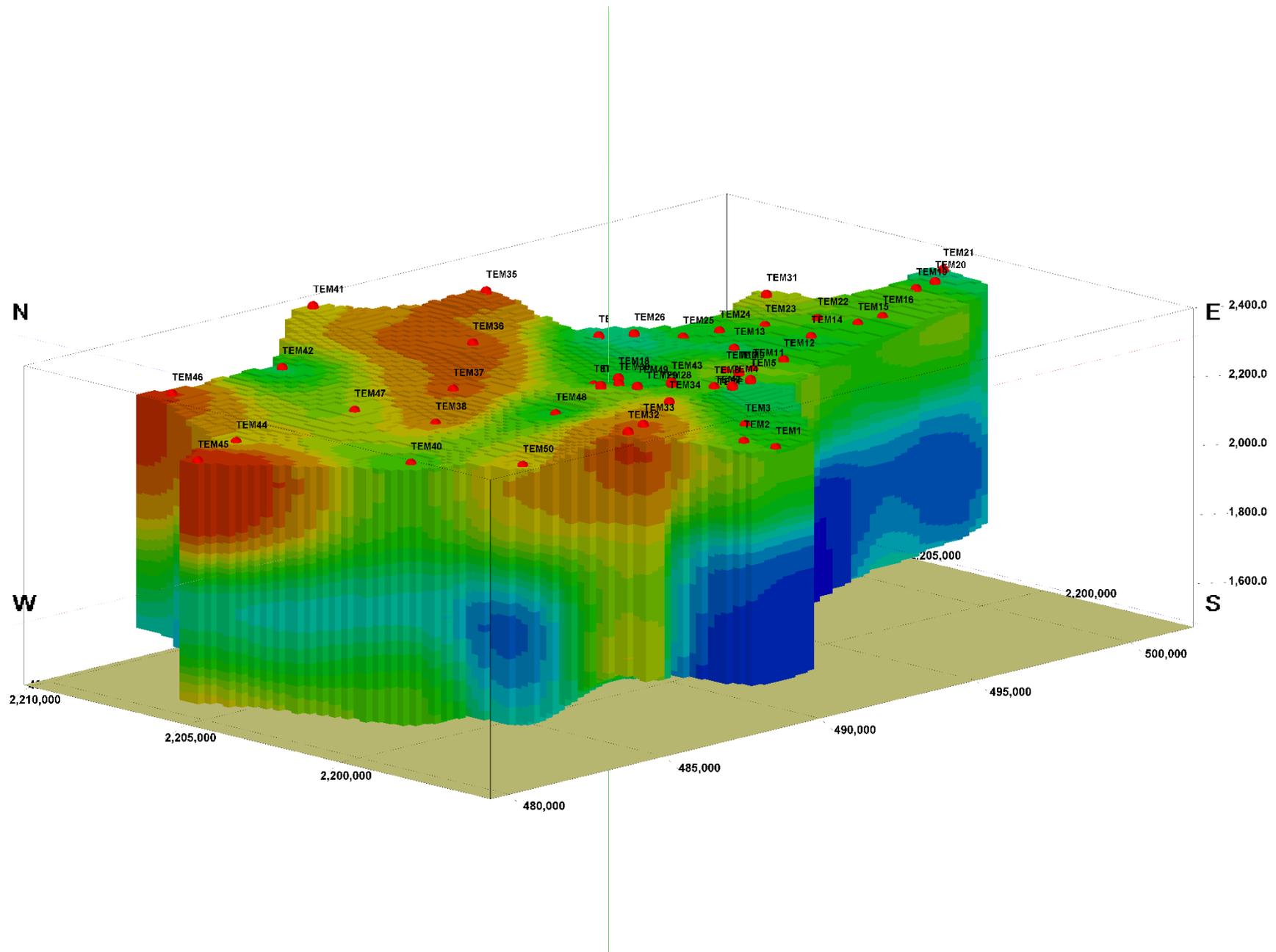
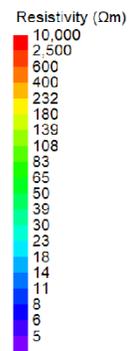
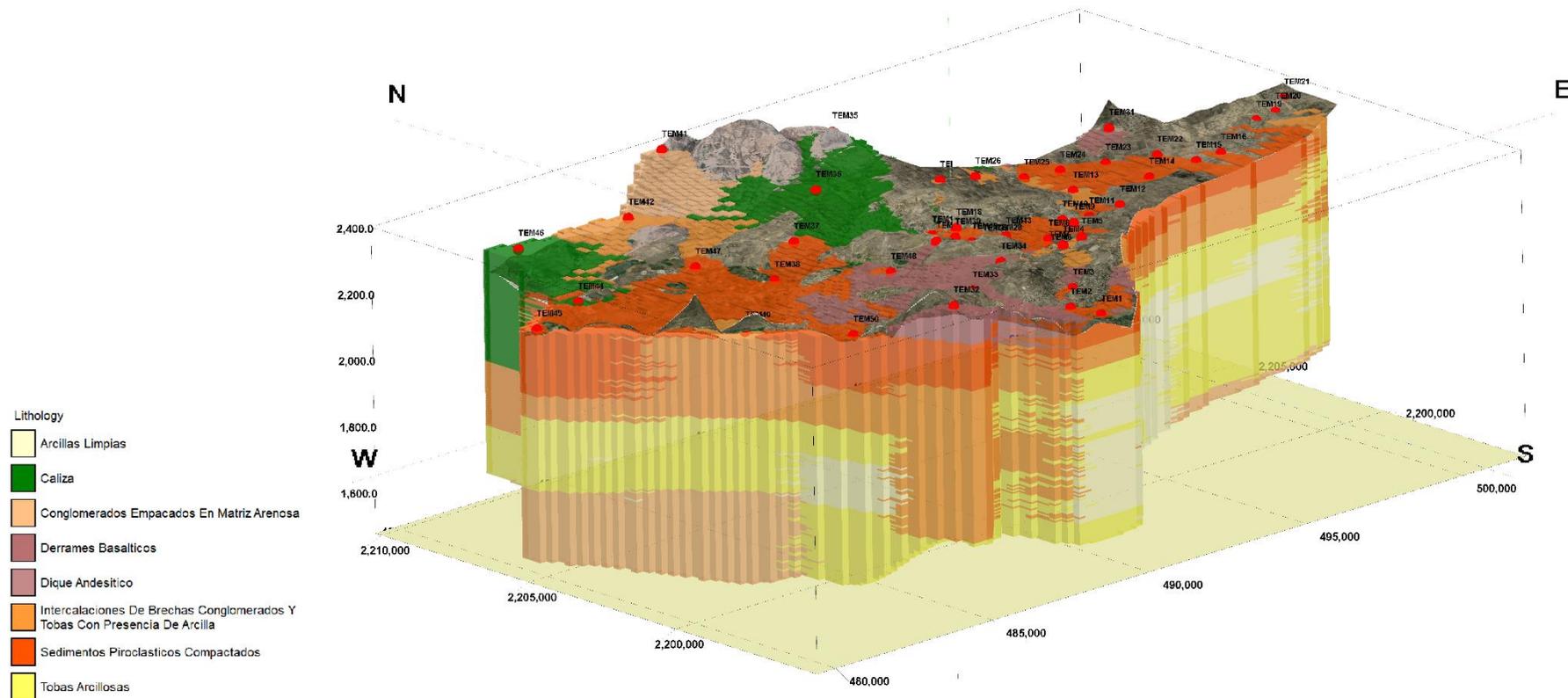


Figura 4.4 – Vista General del Modelo en 3D de resistividades con orientación SW.



ANEXO 5

MODELO 3D LITOLÓGICO



Lithology

- Arcillas Limpias
- Caliza
- Conglomerados Empacados En Matriz Arenosa
- Derrames Basálticos
- Dique Andesítico
- Intercalaciones De Brechas Conglomerados Y Tobas Con Presencia De Arcilla
- Sedimentos Piroclásticos Compactados
- Tobas Arcillosas

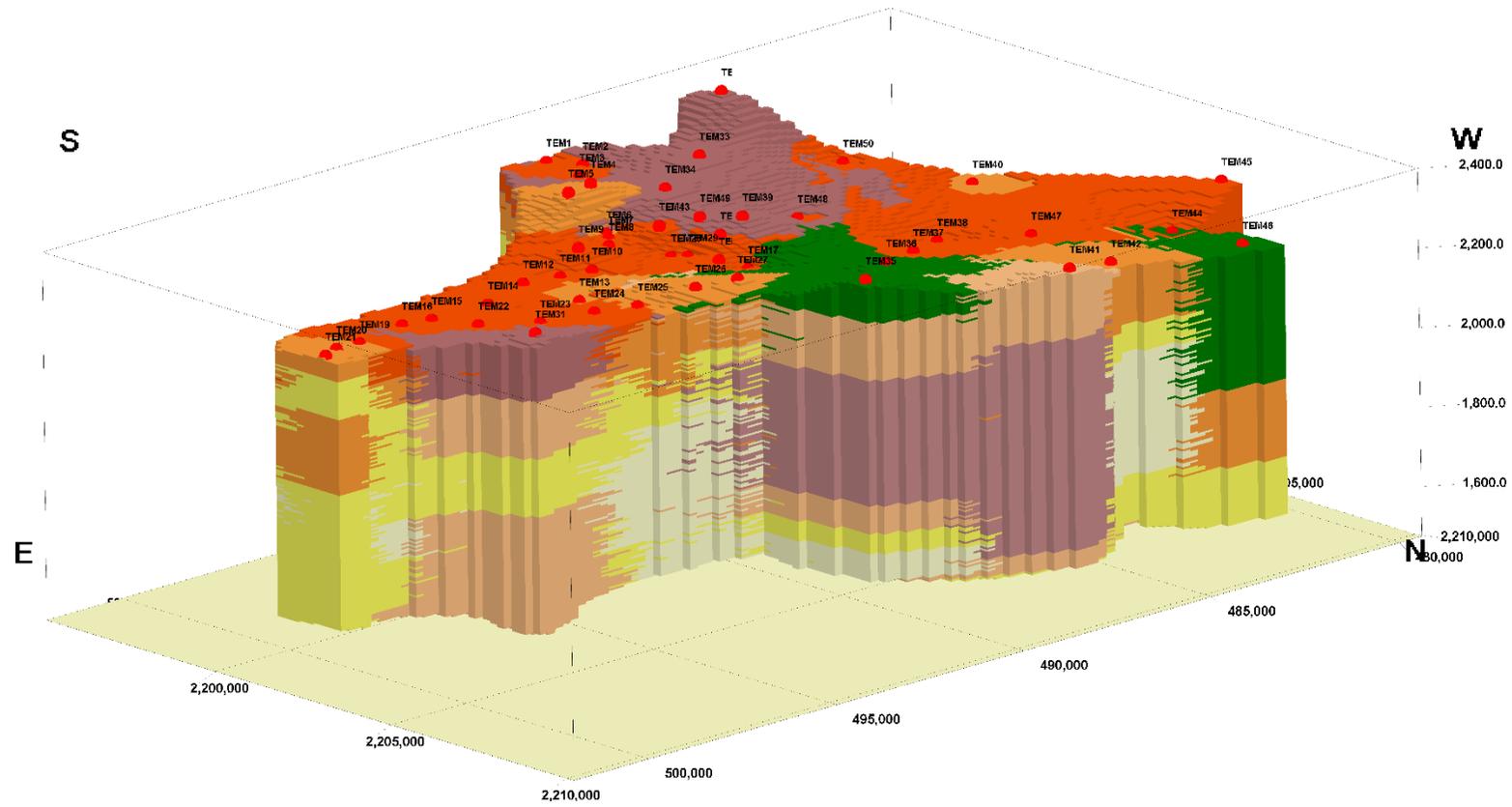


Figura 5.1 – Vista General del Modelo en 3D de resistividades con orientación NE.



- Lithology
- Arcillas Limpias
 - Caliza
 - Conglomerados Empacados En Matriz Arenosa
 - Derrames Basálticos
 - Dique Andesítico
 - Intercalaciones De Brechas Conglomerados Y Tobas Con Presencia De Arcilla
 - Sedimentos Piroclásticos Compactados
 - Tobas Arcillosas

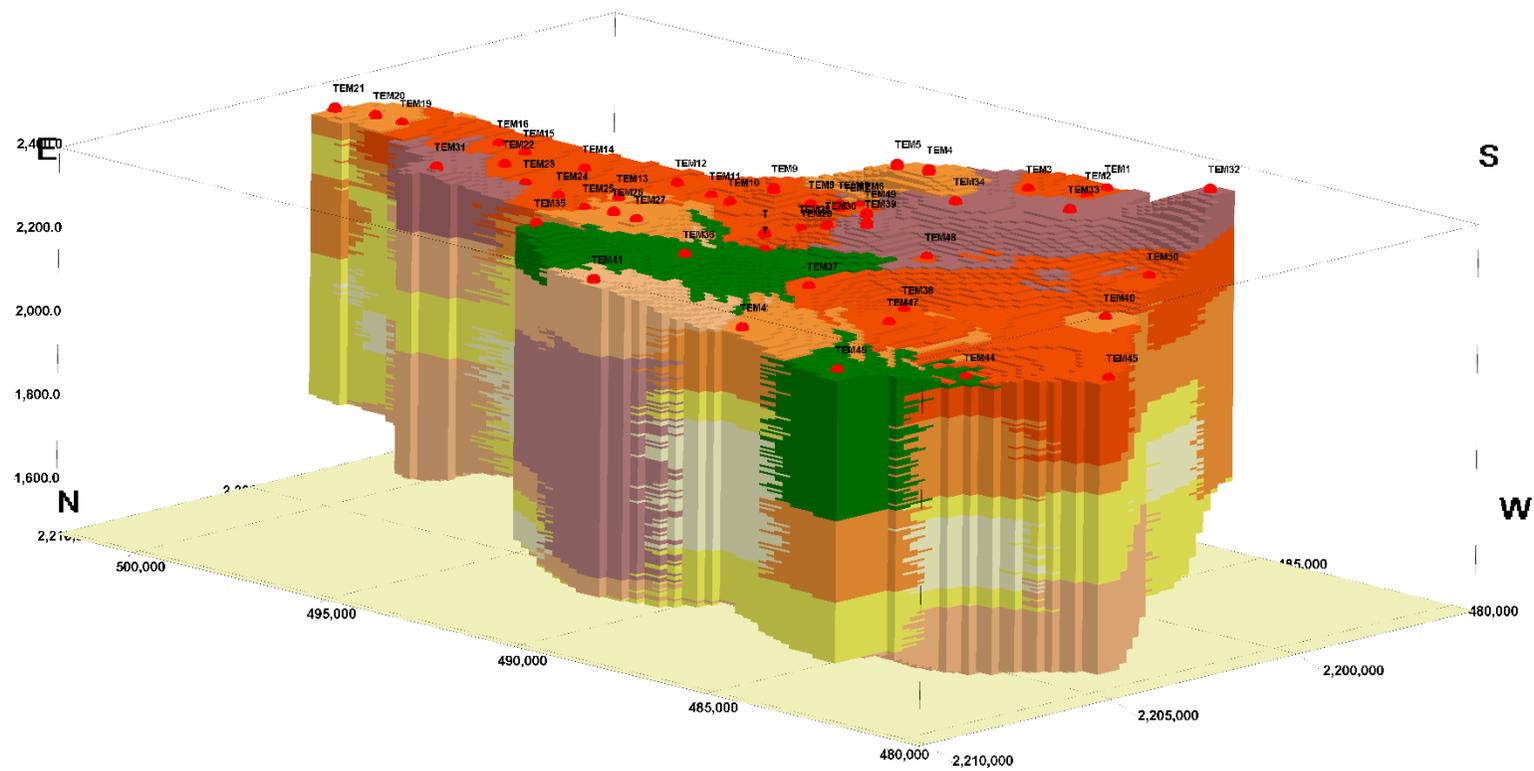


Figura 5.2 – Vista General del Modelo en 3D de resistividades con orientación NW.



- Lithology
- Arcillas Limpias
 - Caliza
 - Conglomerados Empacados En Matriz Arenosa
 - Derrames Basálticos
 - Dique Andesítico
 - Intercalaciones De Brechas Conglomerados Y Tobas Con Presencia De Arcilla
 - Sedimentos Piroclásticos Compactados
 - Tobas Arcillosas

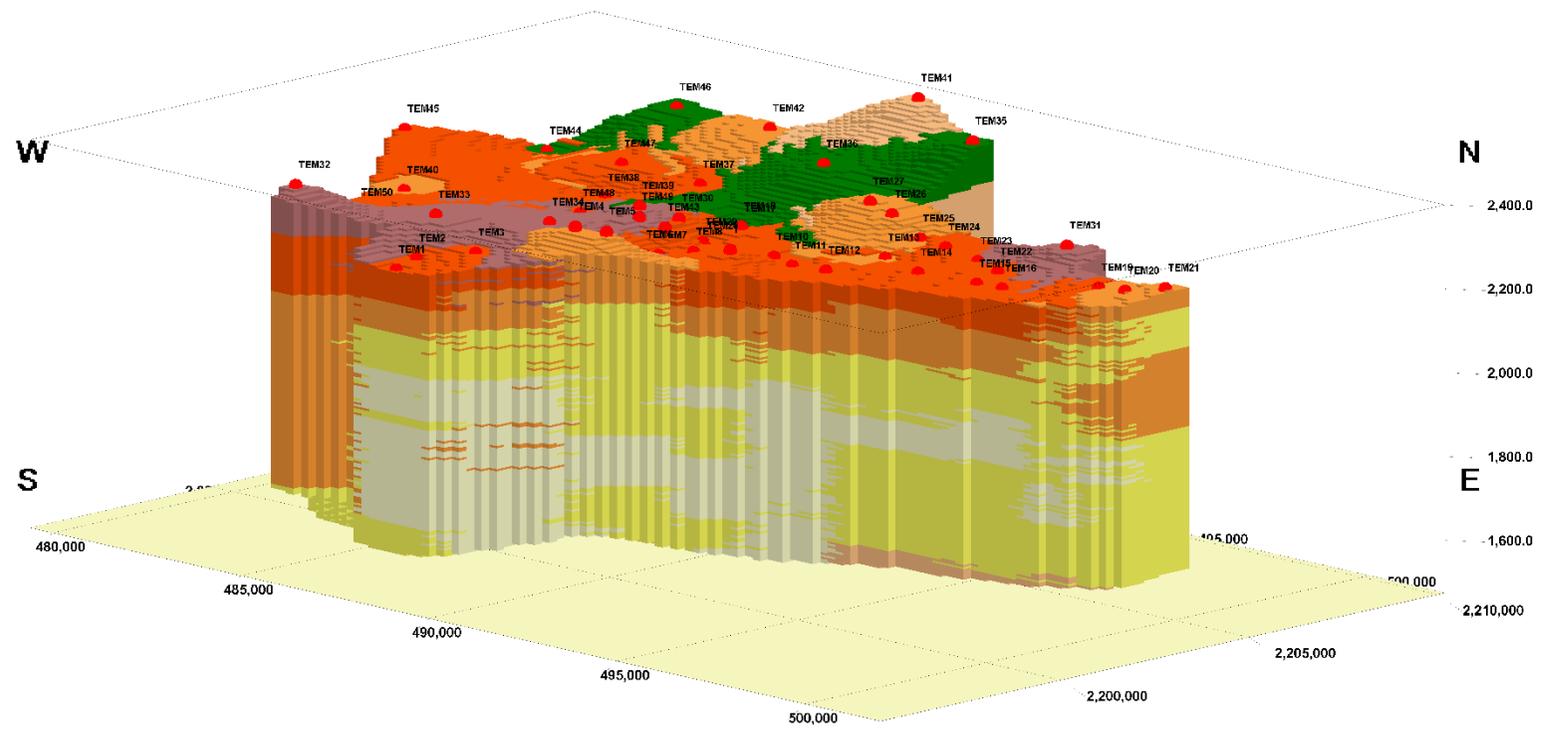


Figura 5.3 – Vista General del Modelo en 3D de resistividades con orientación SE.



- Lithology
- Arcillas Limpias
 - Caliza
 - Conglomerados Empacados En Matriz Arenosa
 - Derrames Basálticos
 - Dique Andesítico
 - Intercalaciones De Brechas Conglomerados Y Tobas Con Presencia De Arcilla
 - Sedimentos Piroclásticos Compactados
 - Tobas Arcillosas

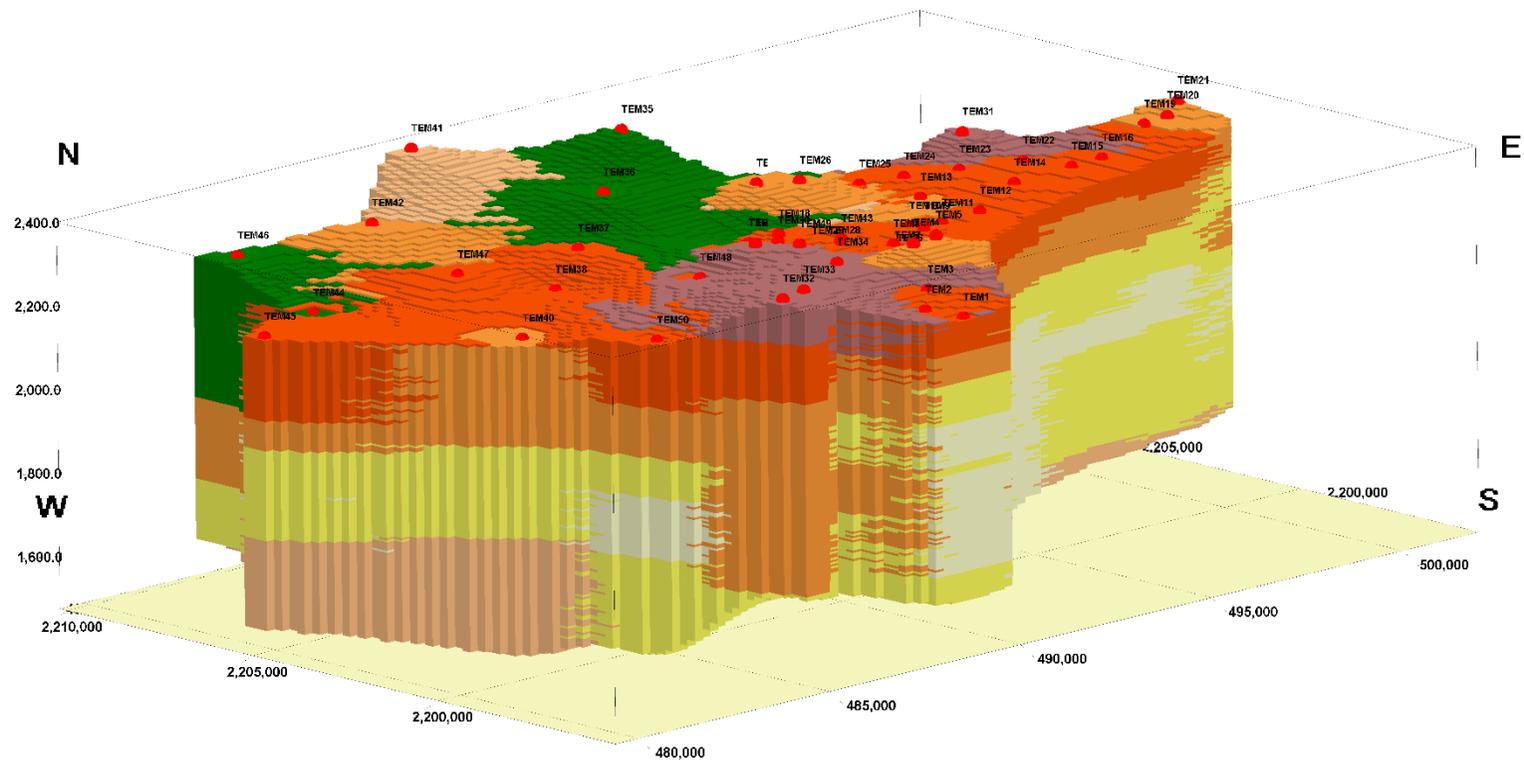


Figura 5.4 – Vista General del Modelo en 3D de resistividades con orientación SW.



ANEXO 6

GRÁFICAS DE LOS SONDEOS POR TRANSITORIO ELECTROMAGNÉTICO (TEMs)



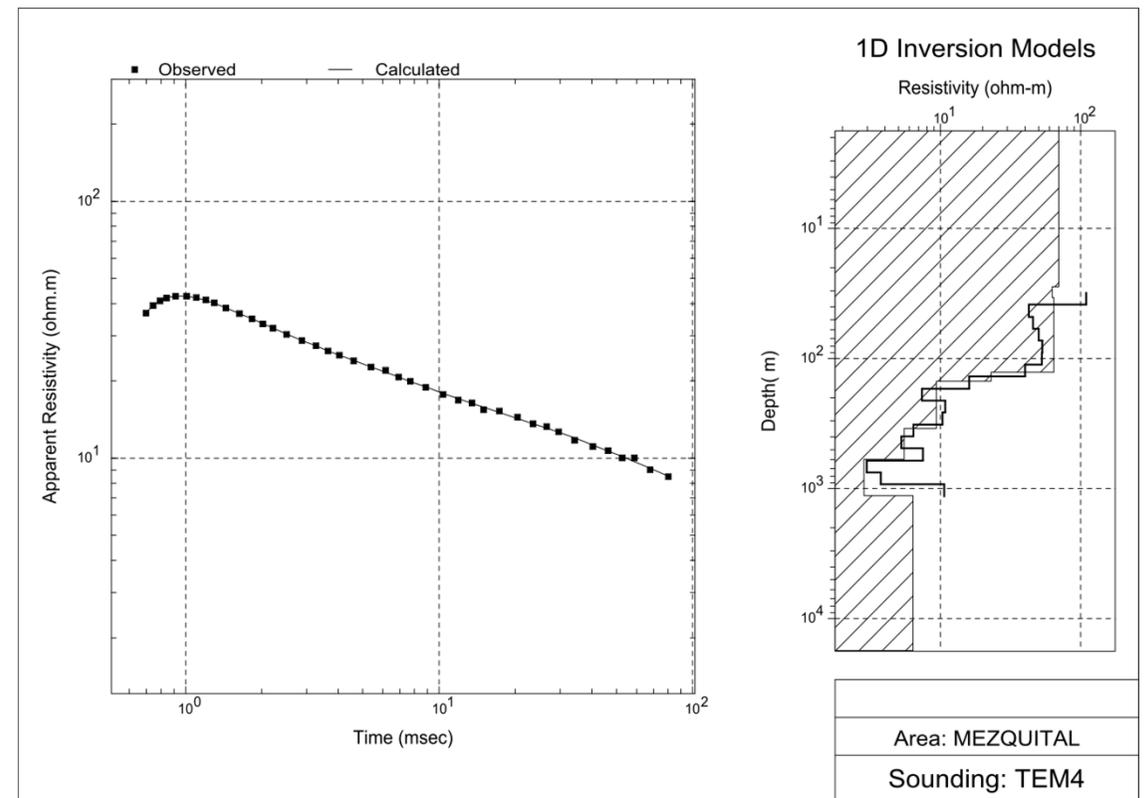
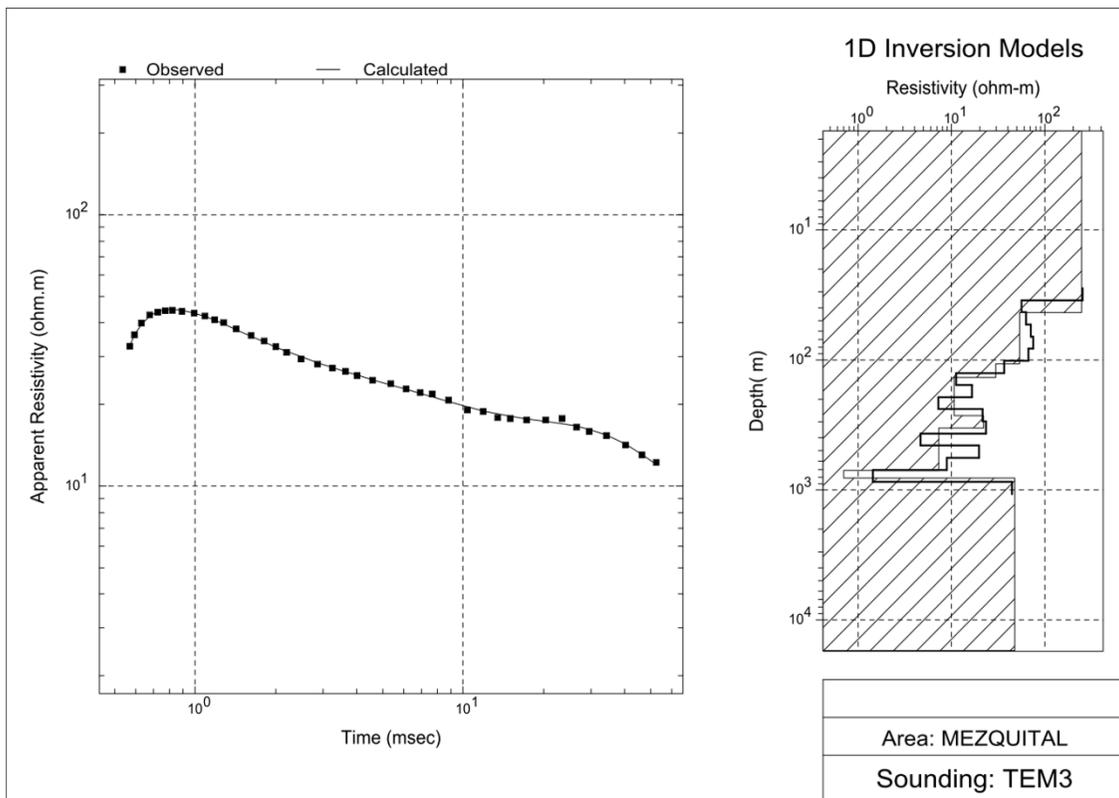
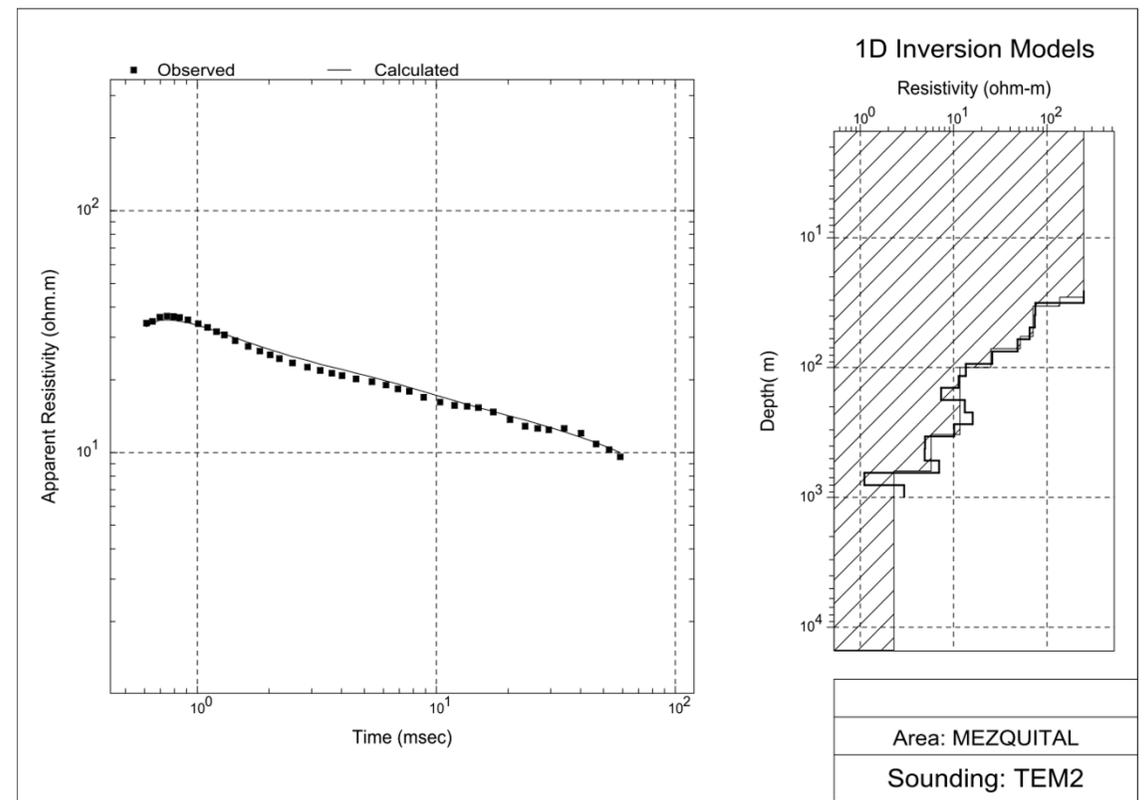
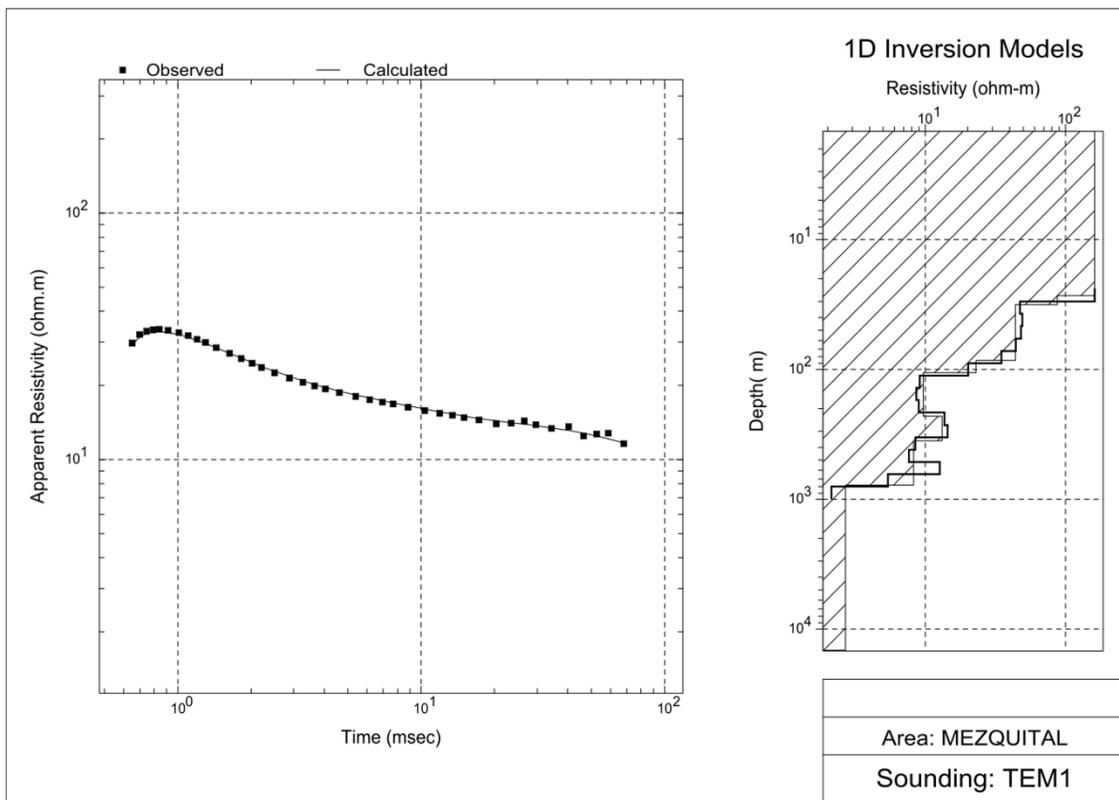


Figura 6.1 – Gráficas de Resistividad TEMS 1 – 4

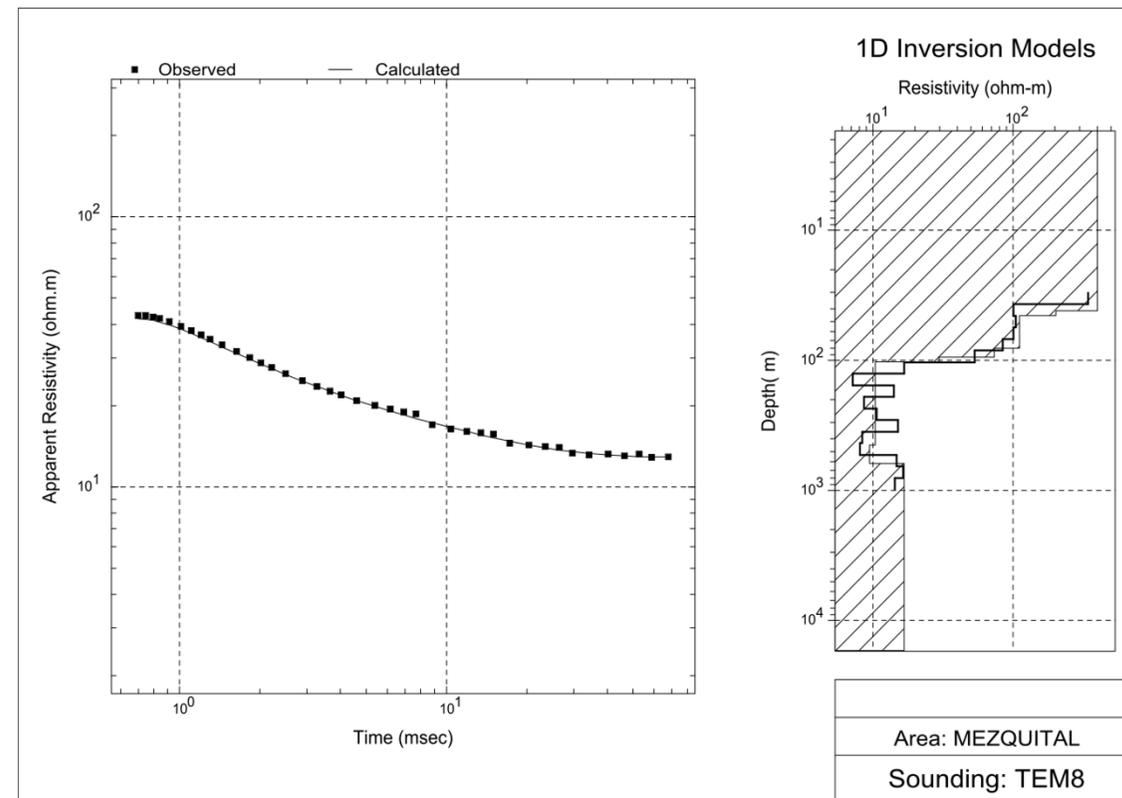
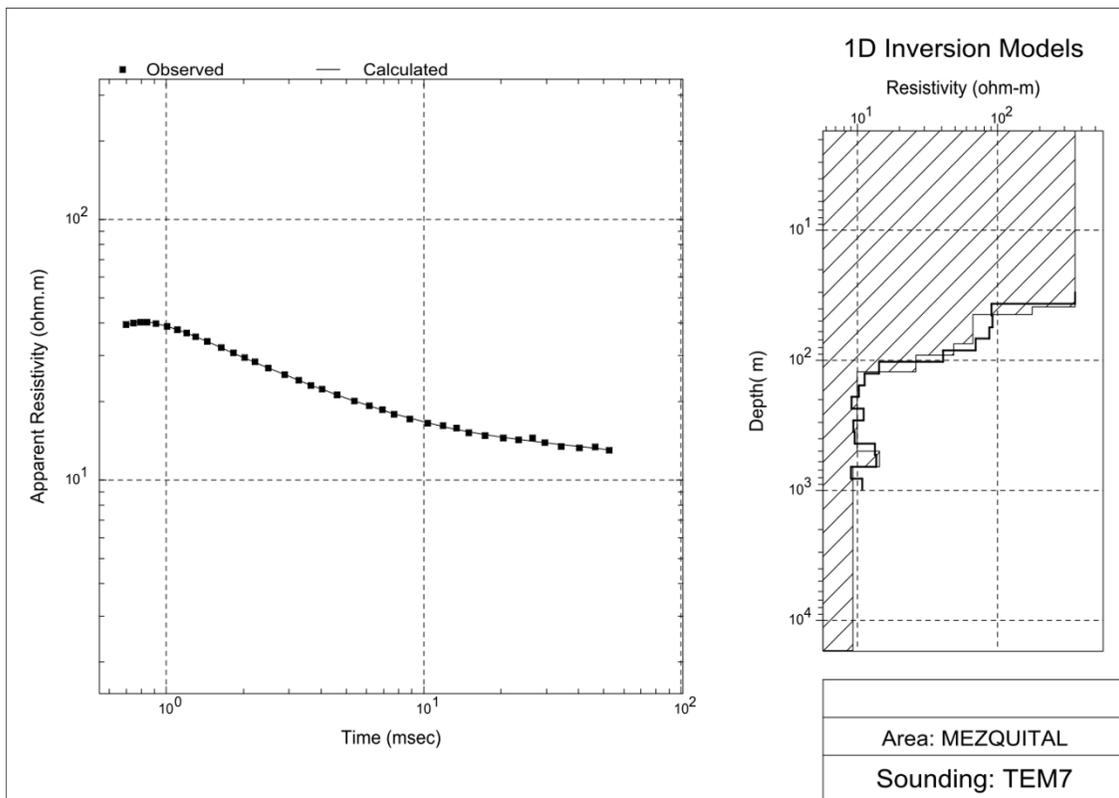
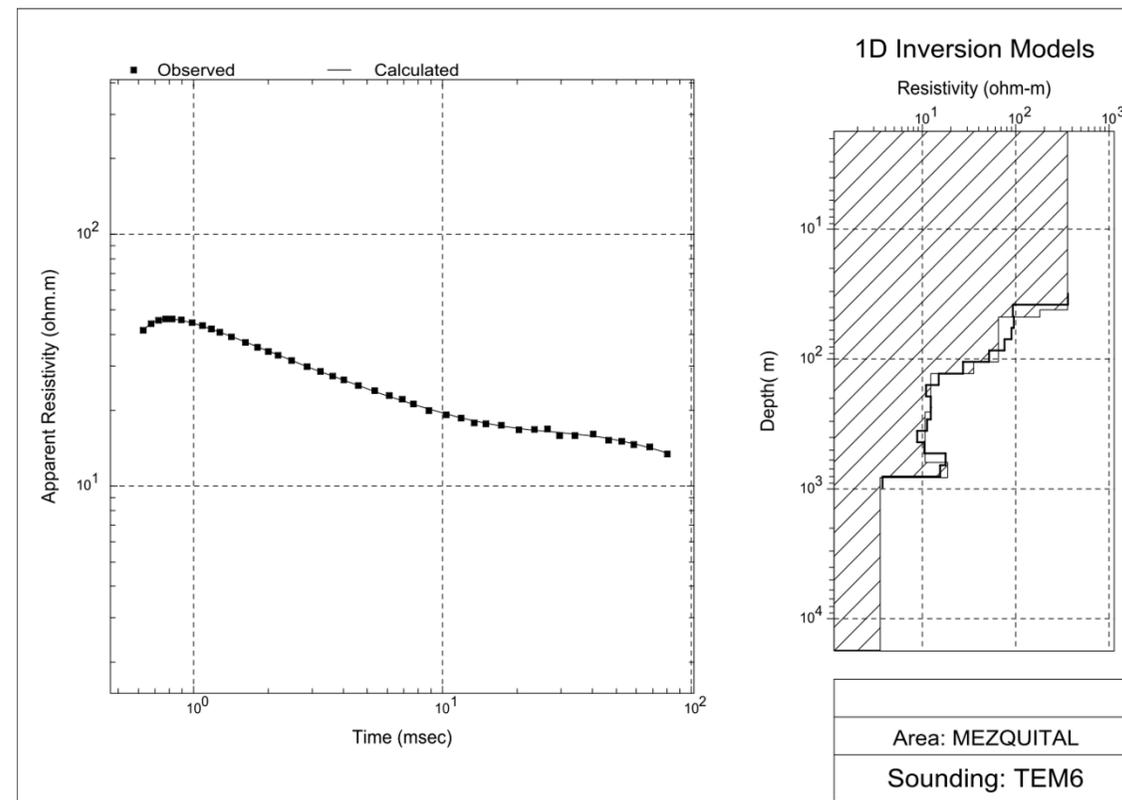
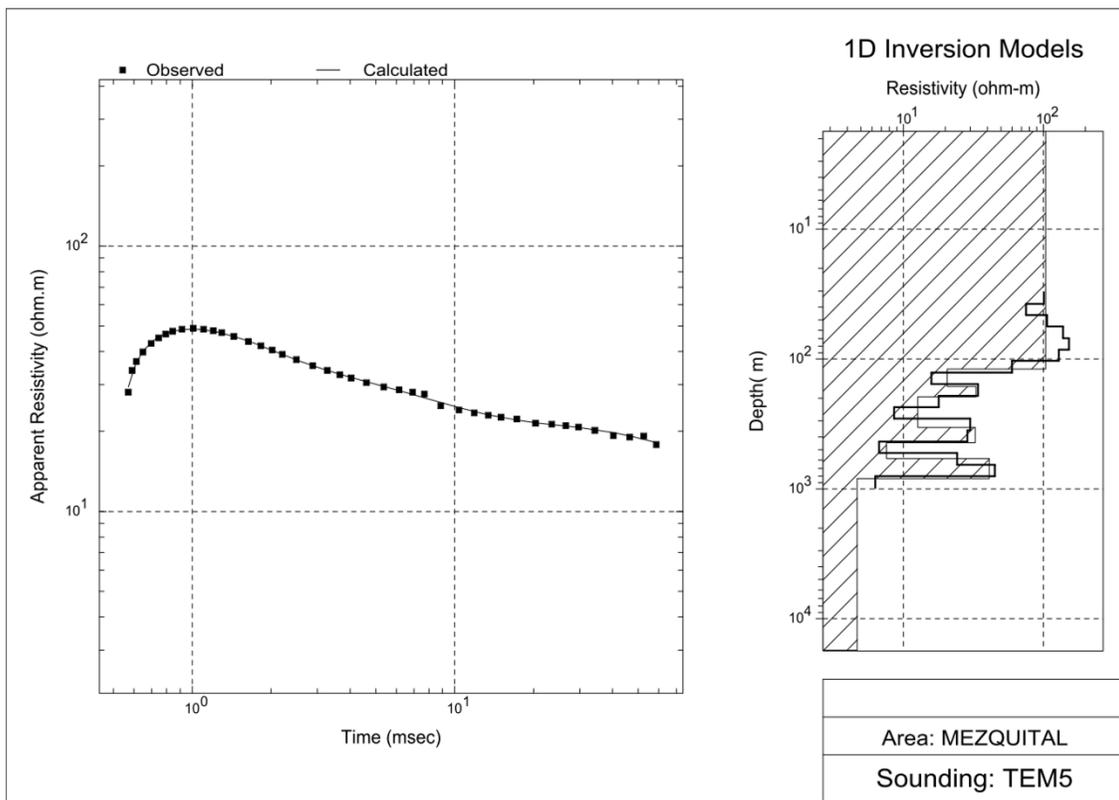


Figura 6.2 – Gráficas de Resistividad TEMS 5 – 8

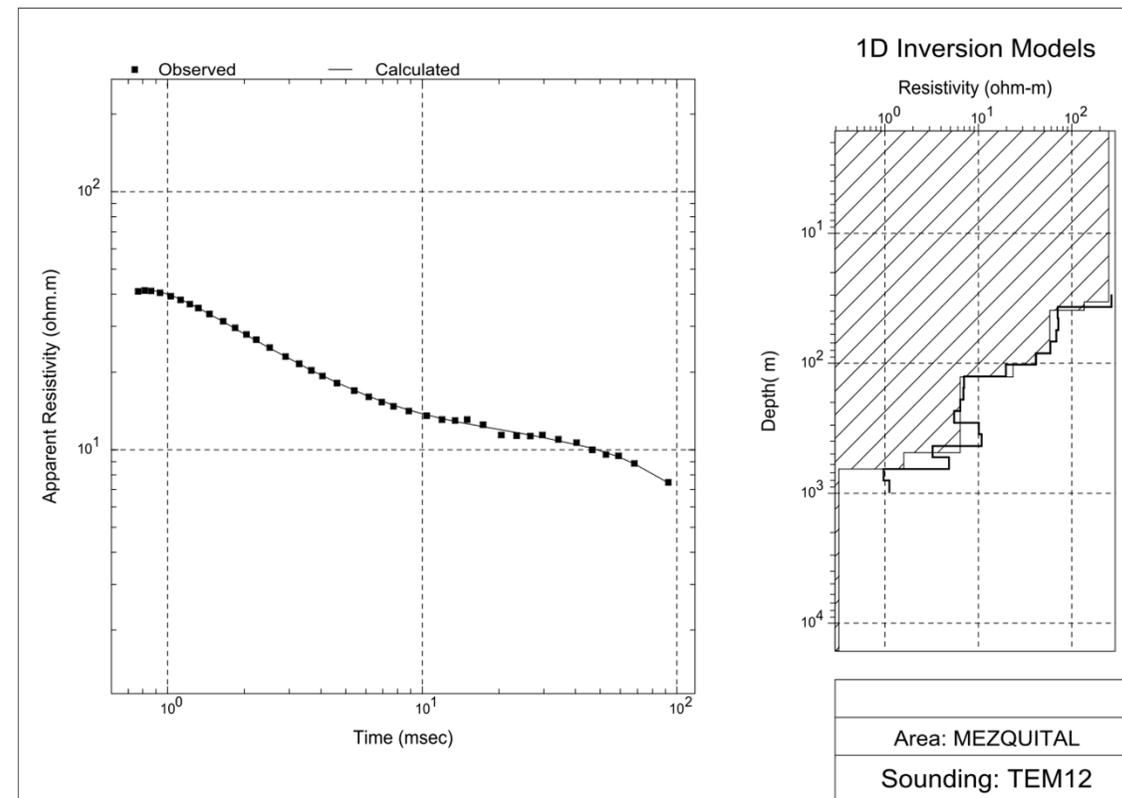
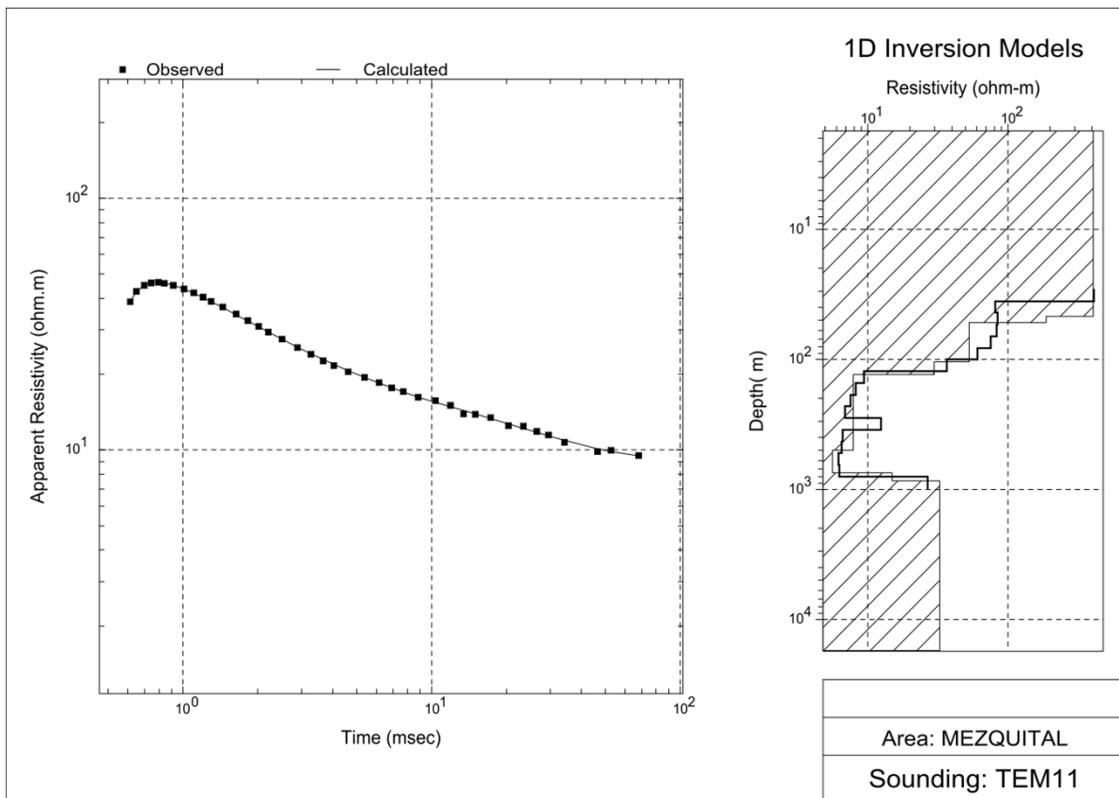
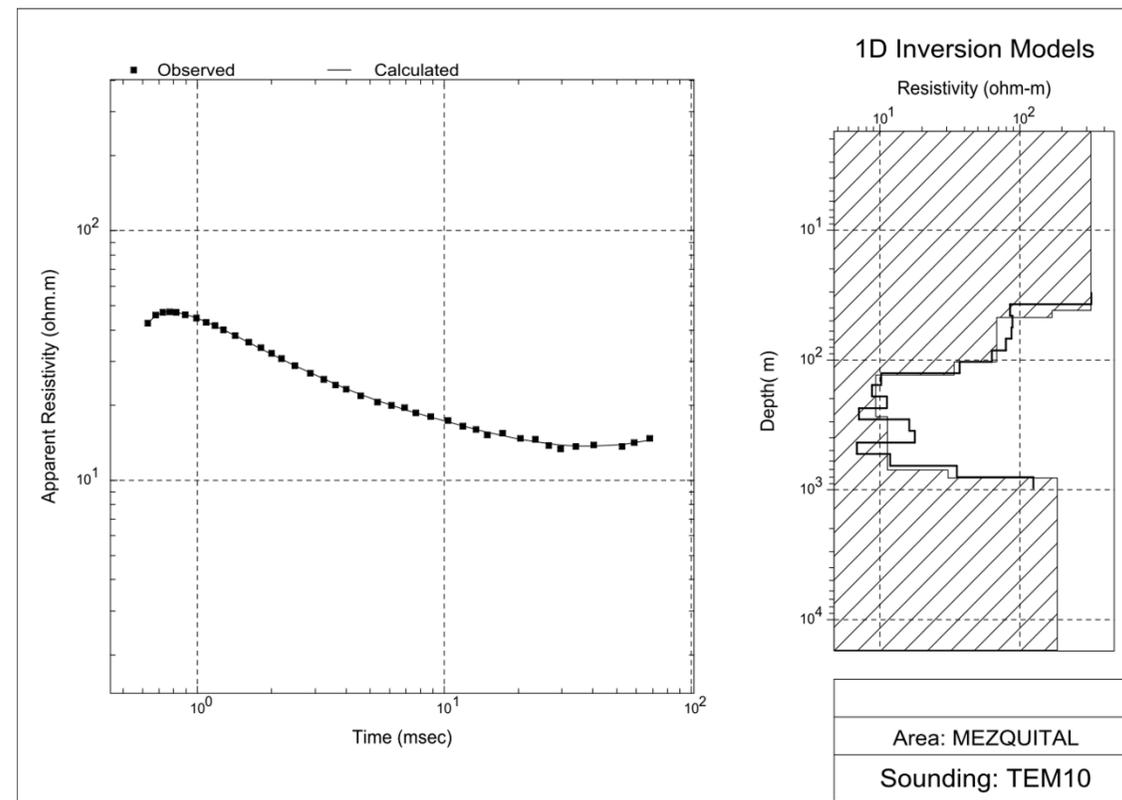
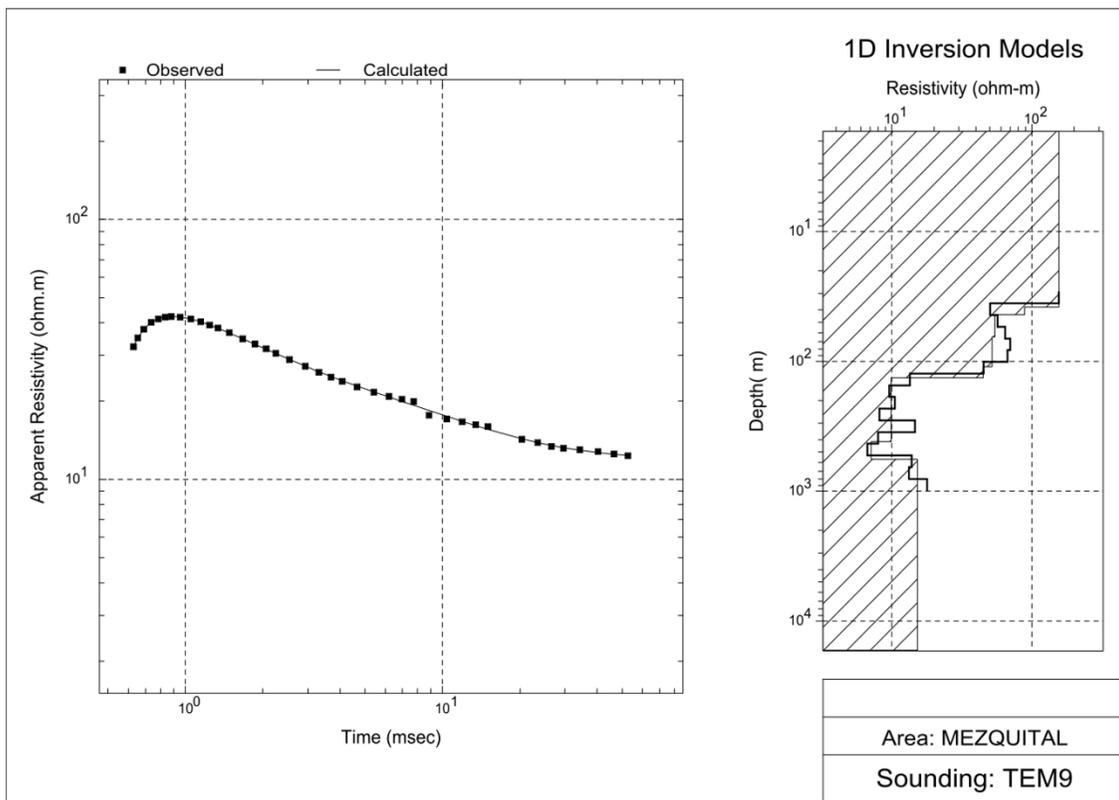


Figura 6.3 – Gráficas de Resistividad TEMS 9 – 12

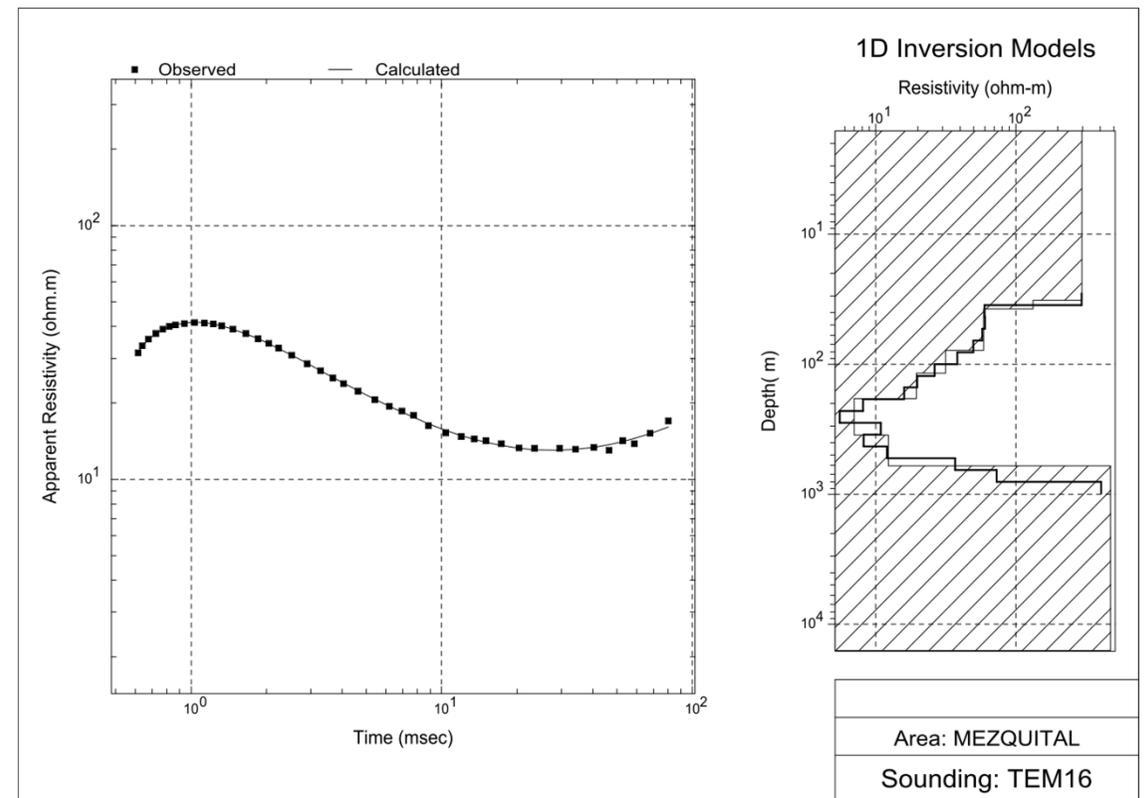
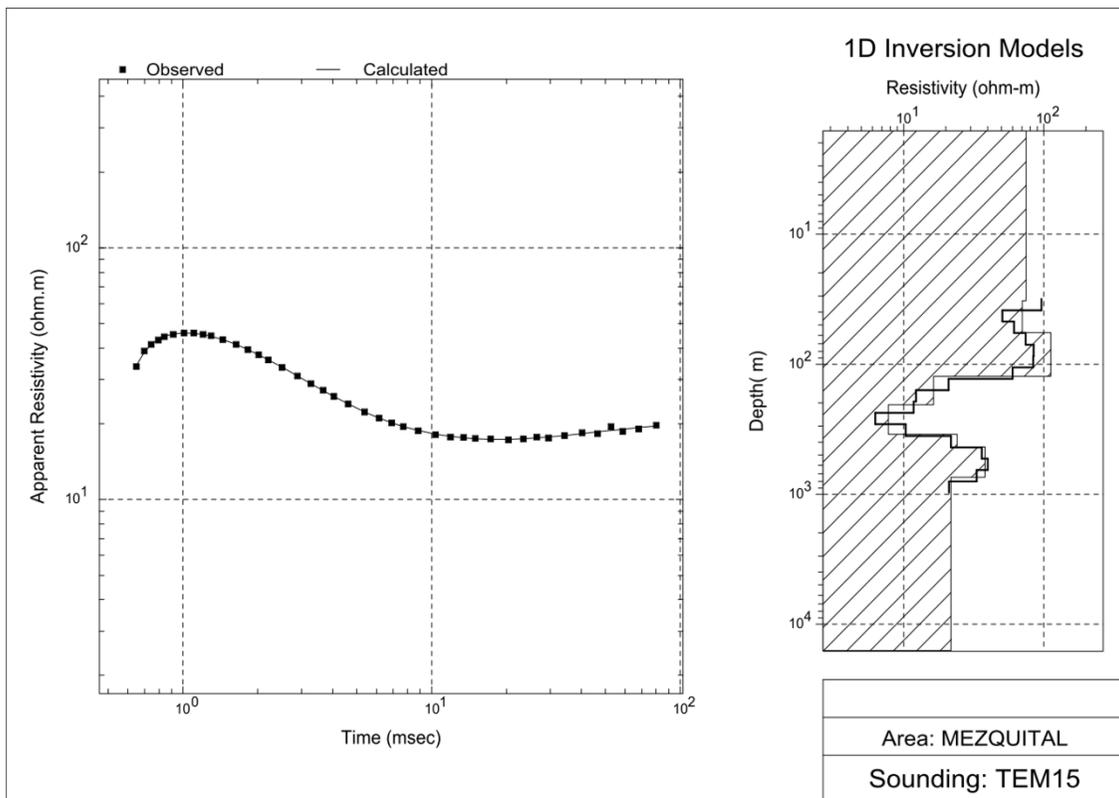
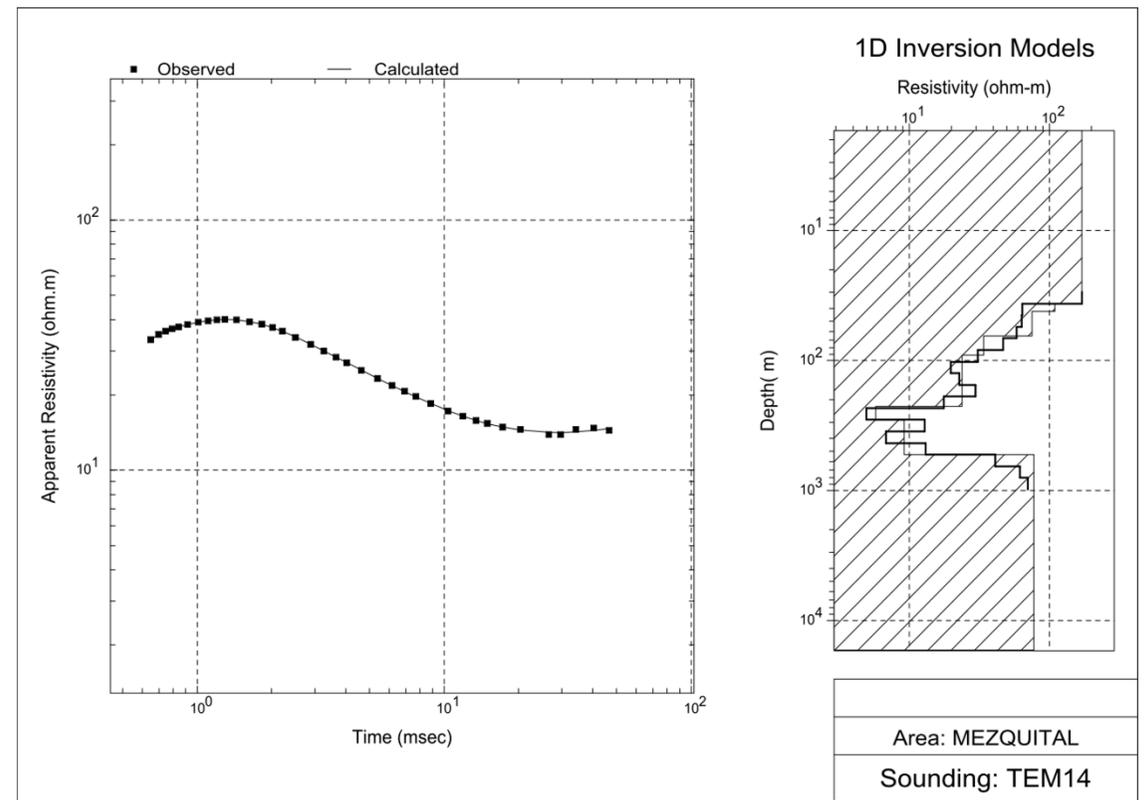
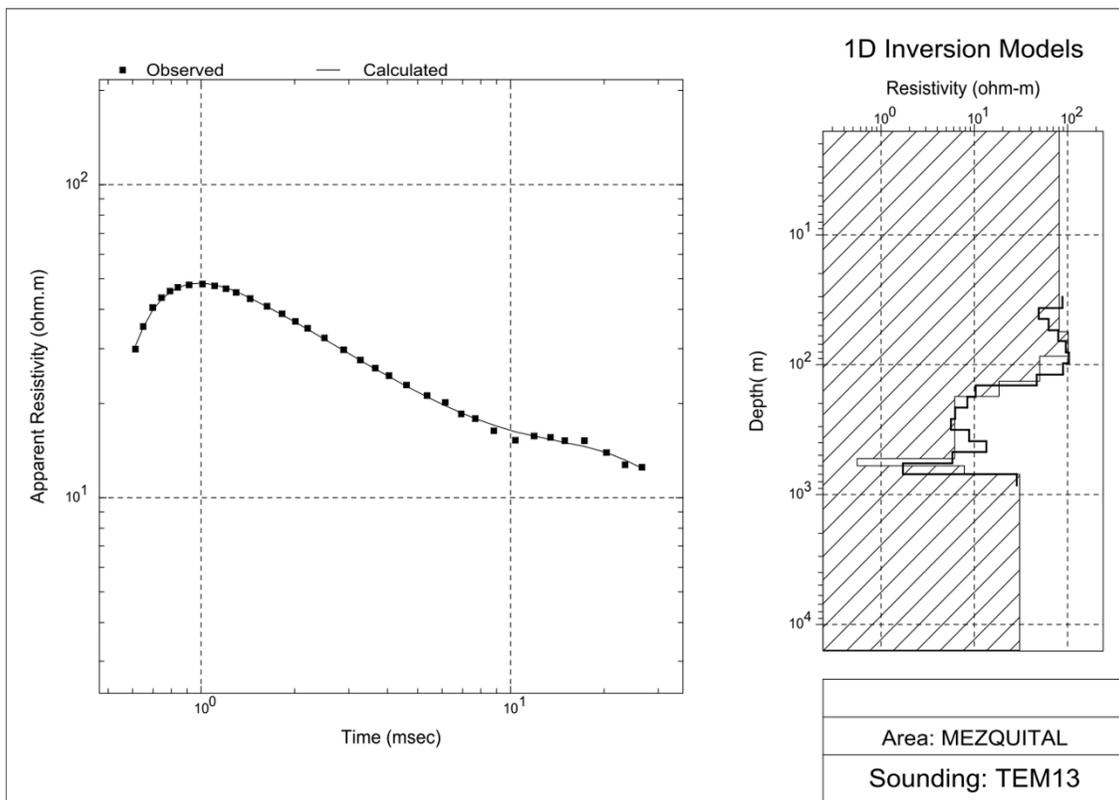


Figura 6.4 – Gráficas de Resistividad TEMS 13 – 16



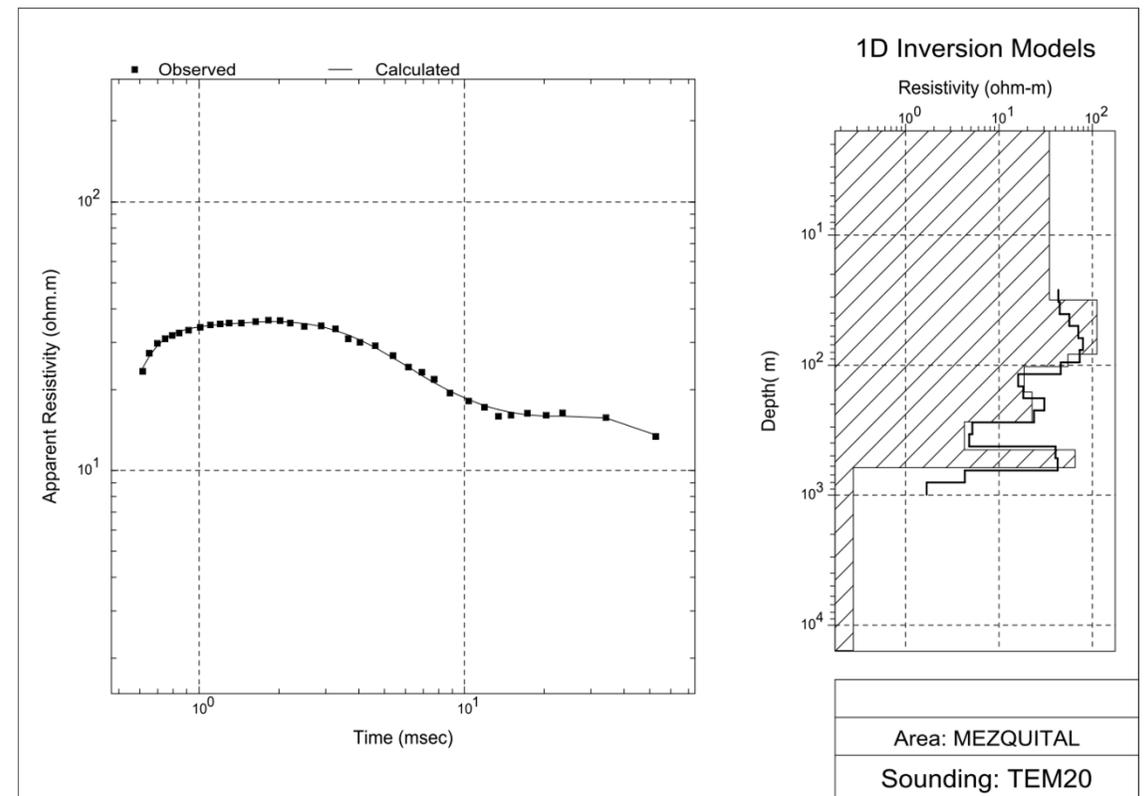
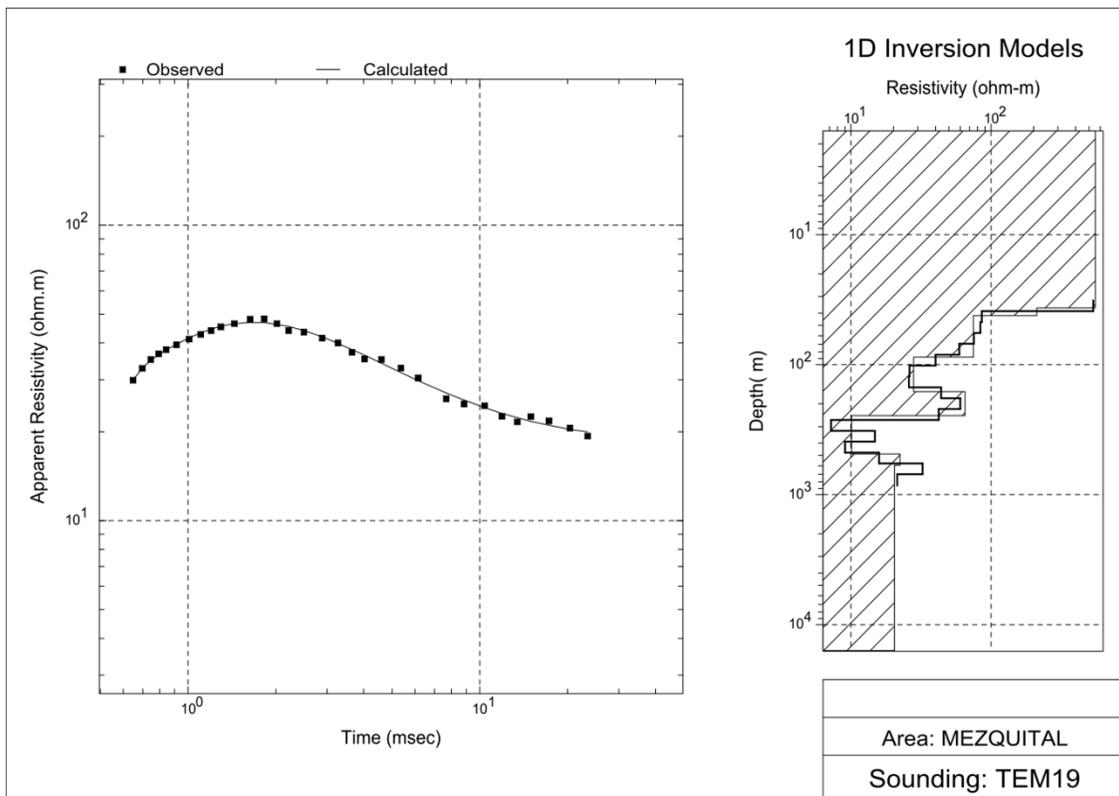
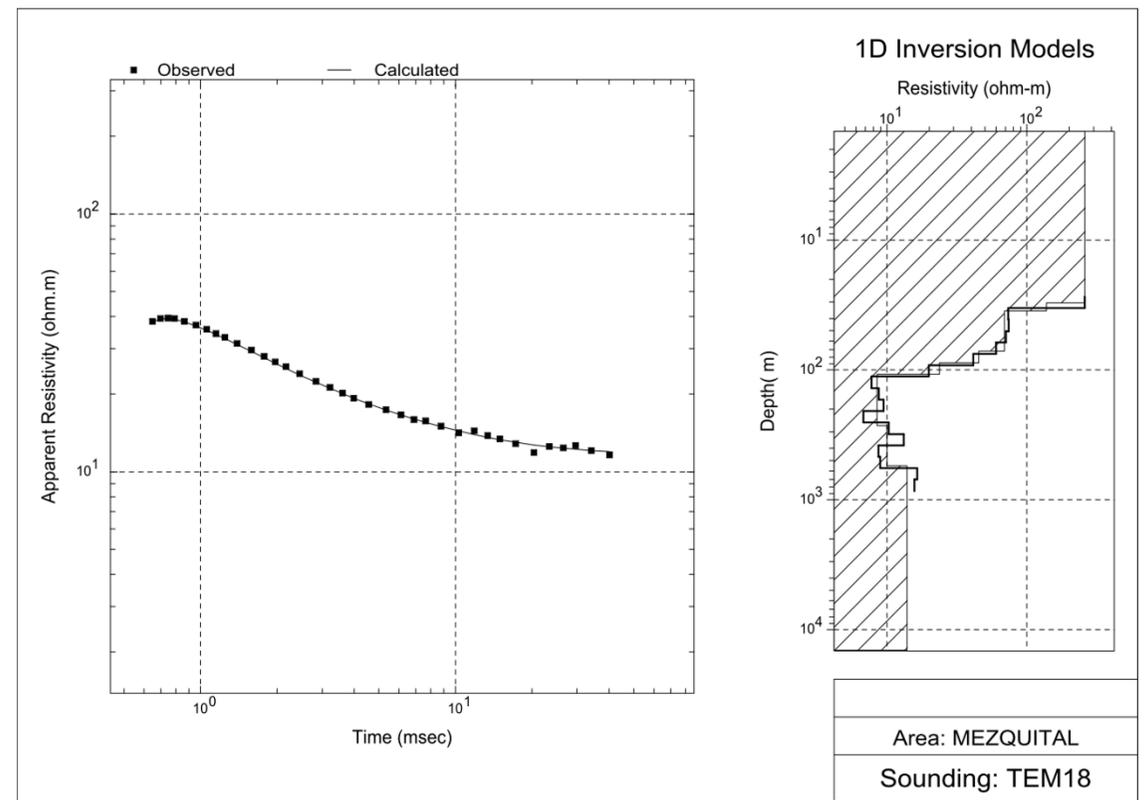
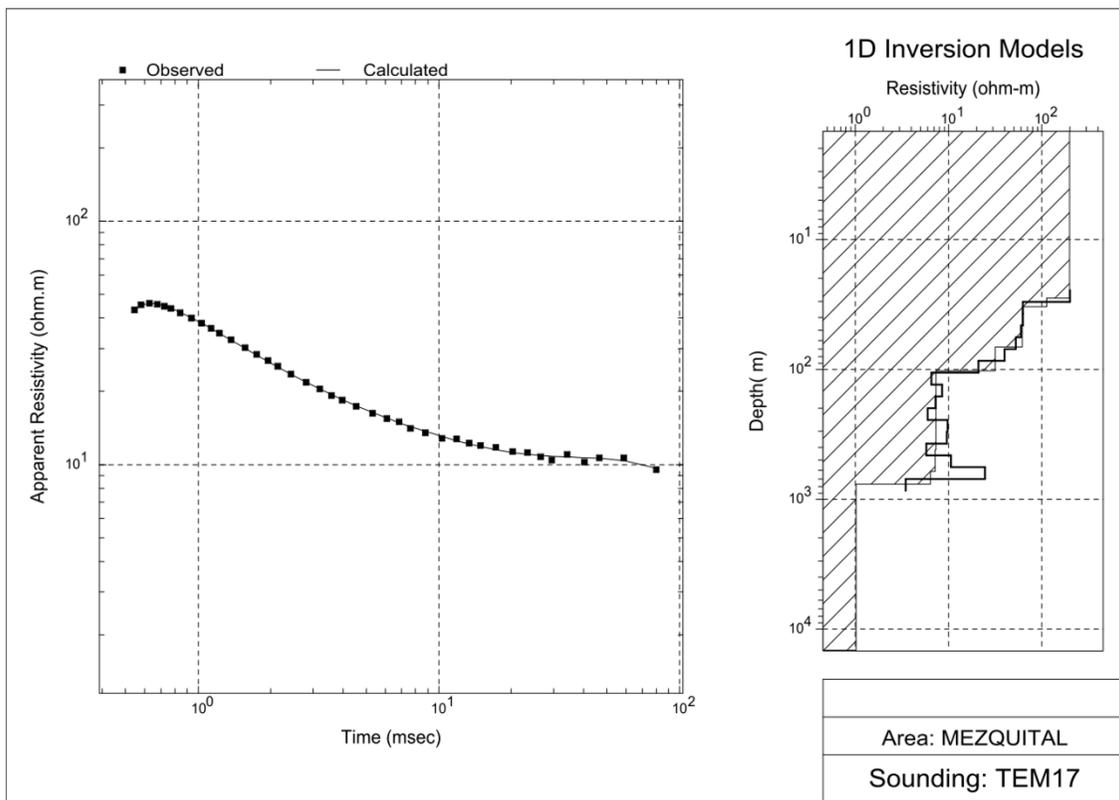


Figura 6.5 – Gráficas de Resistividad TEMS 17 – 20

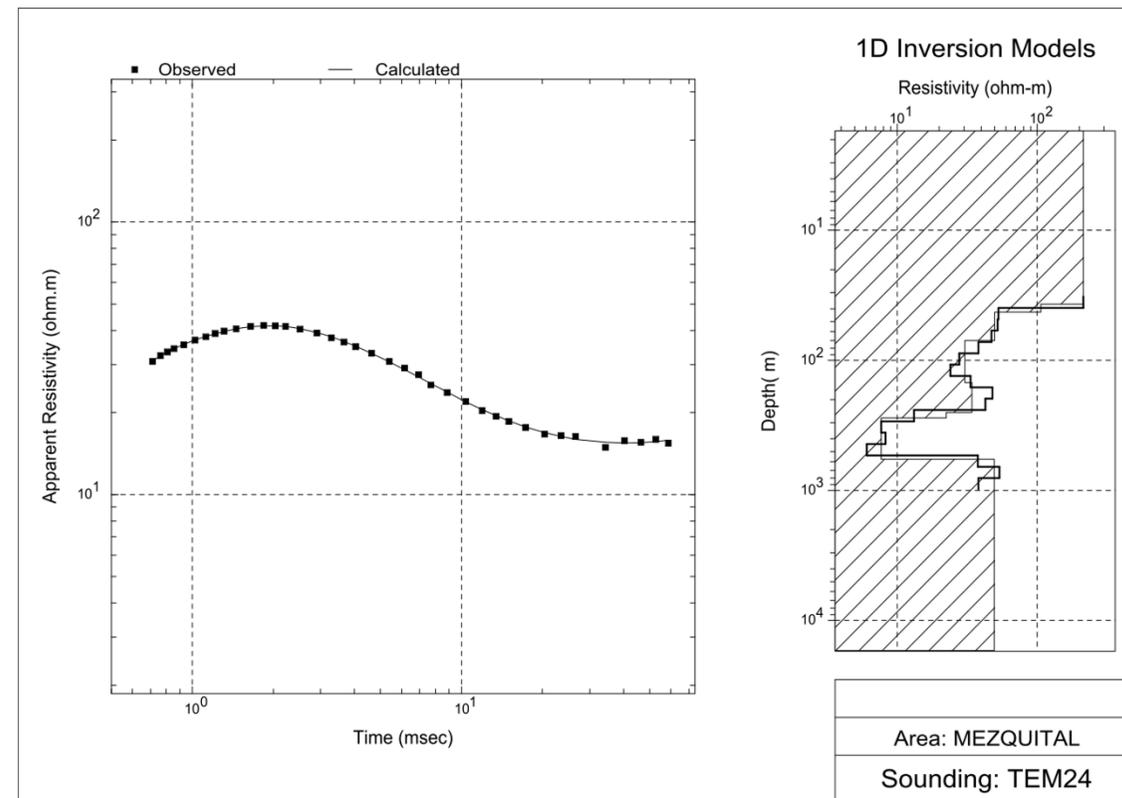
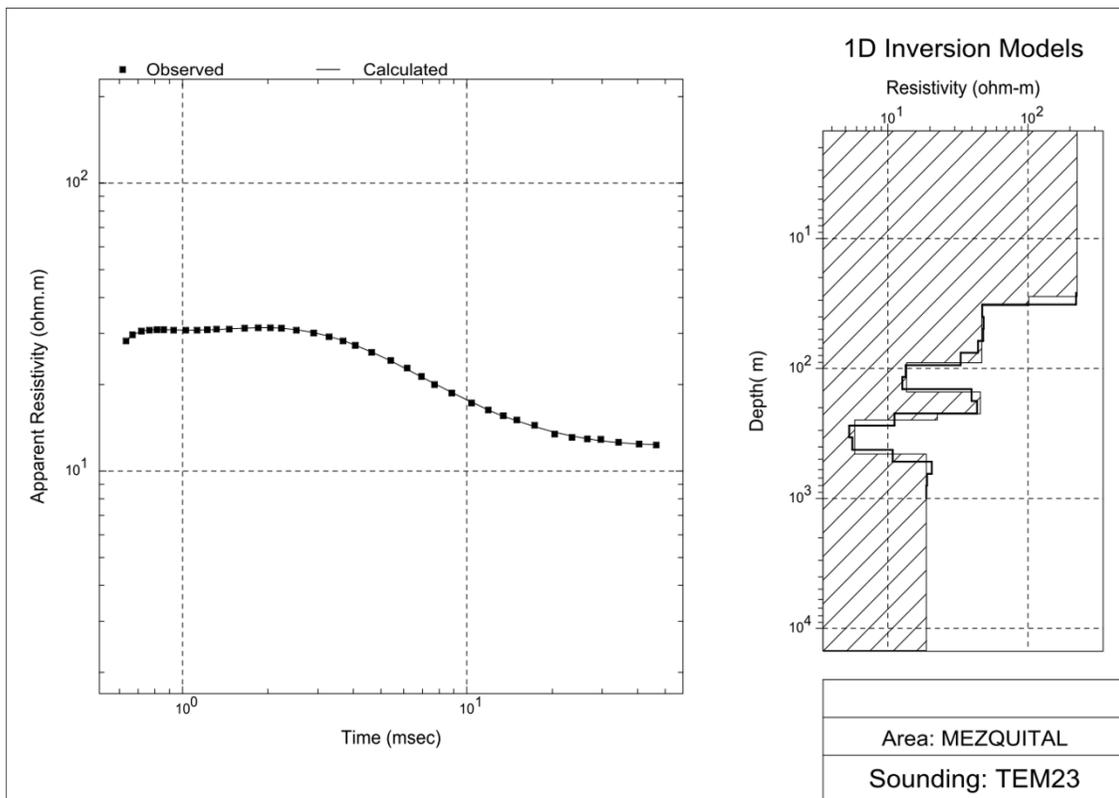
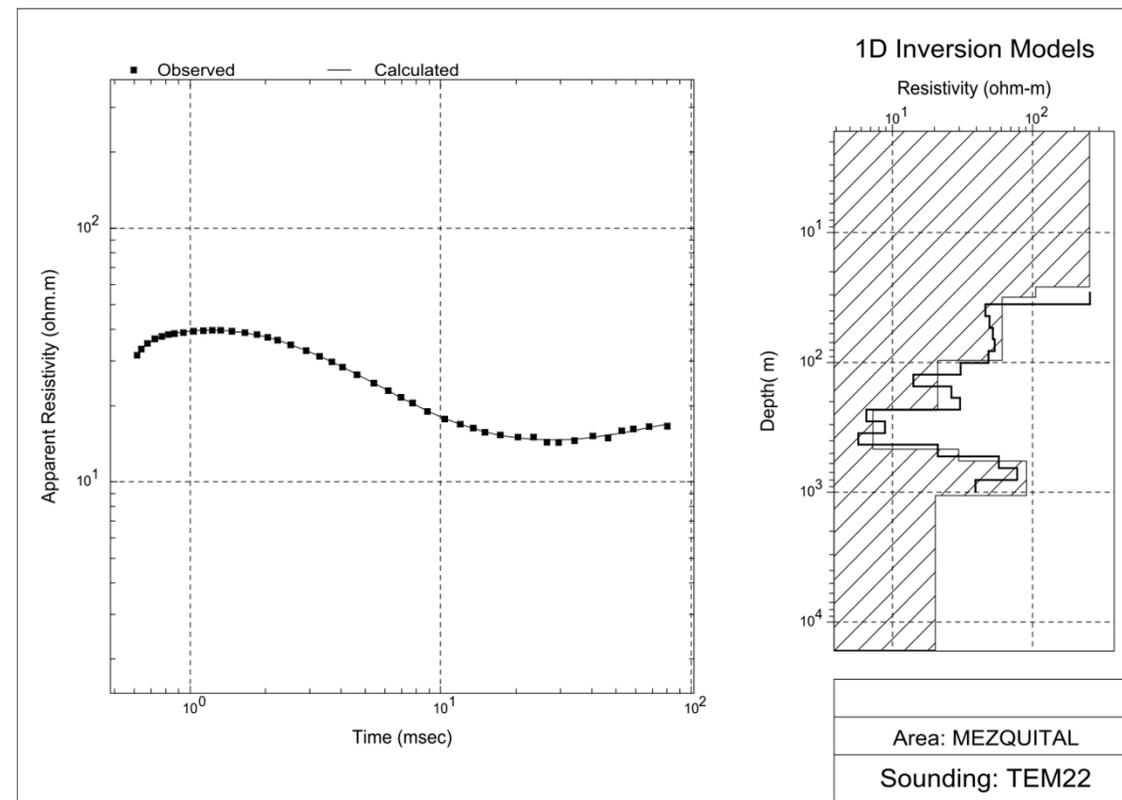
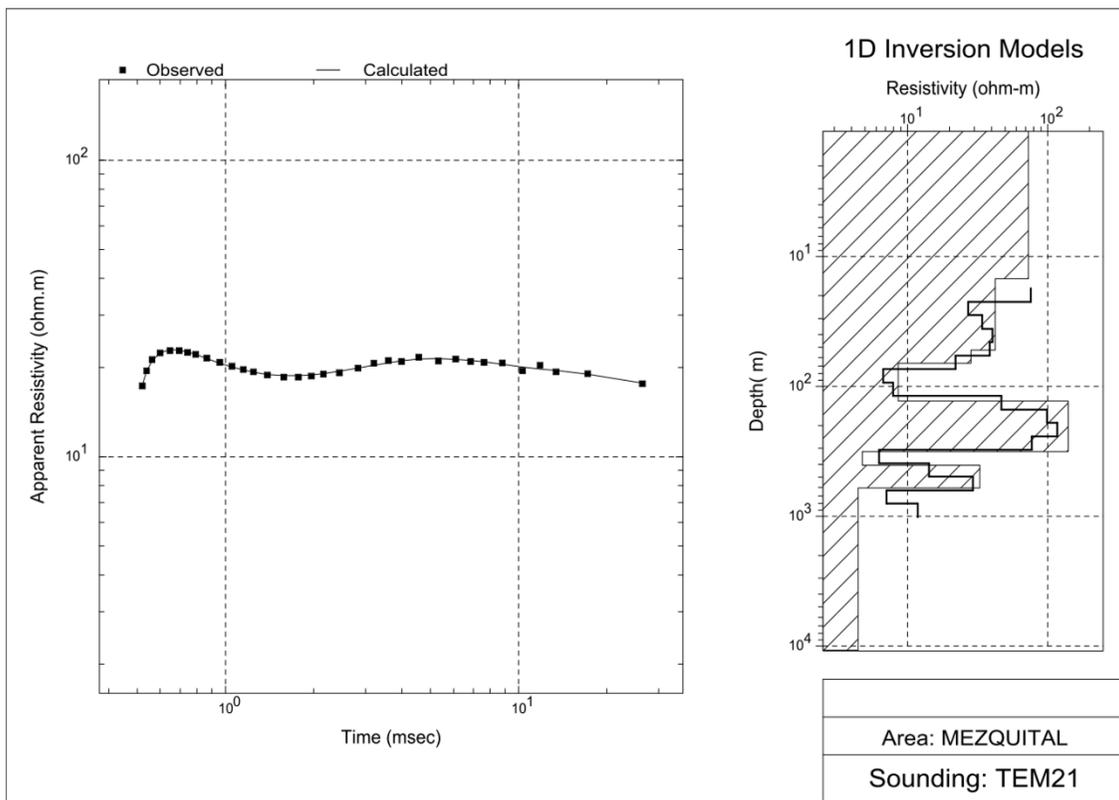


Figura 6.6 – Gráficas de Resistividad TEMS 21 – 24

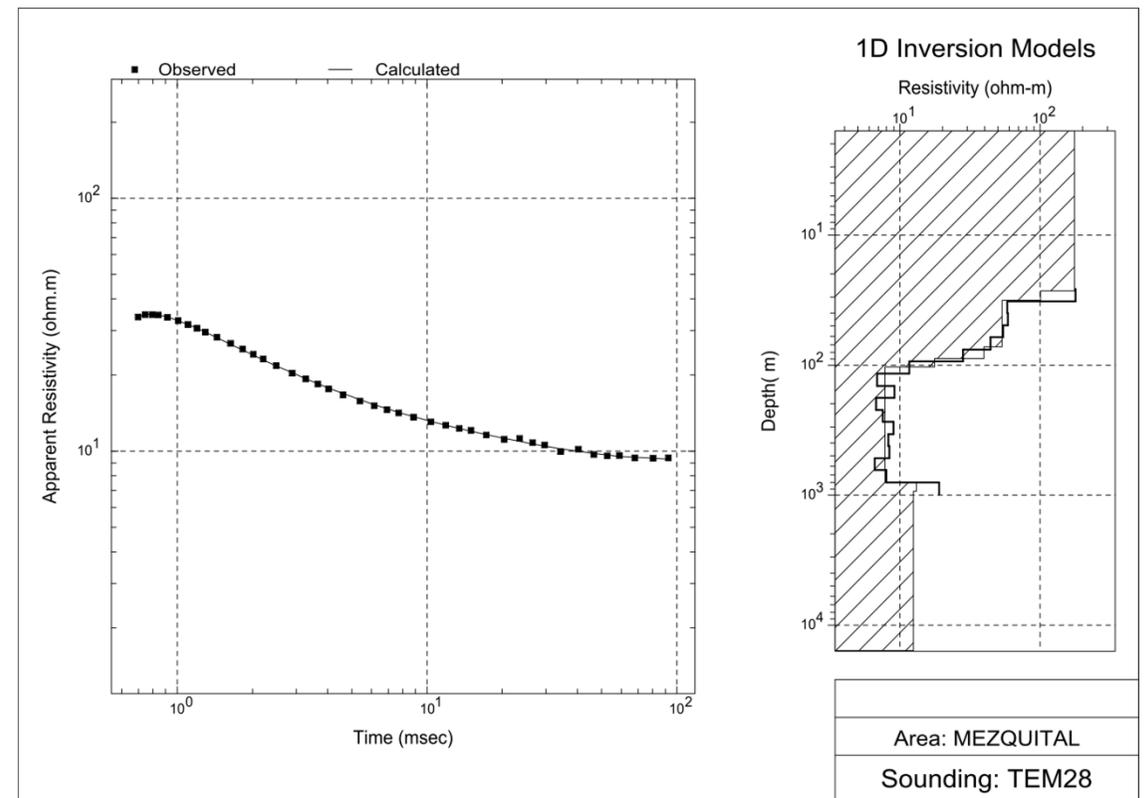
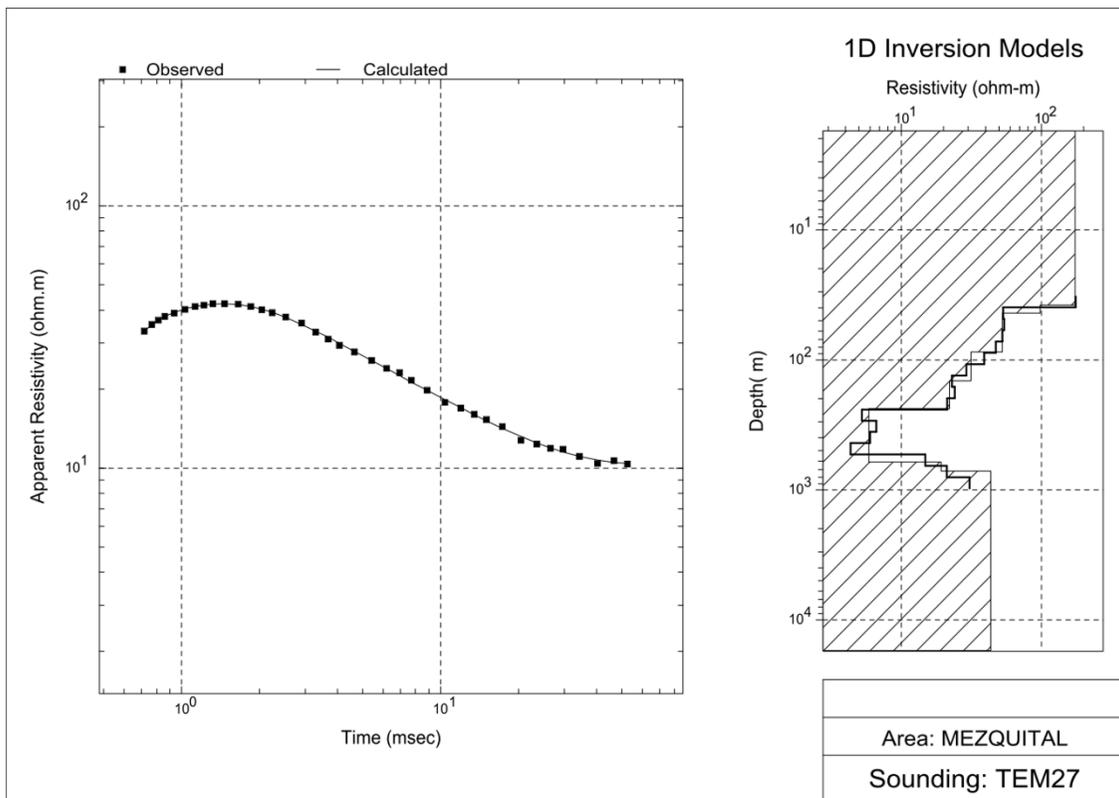
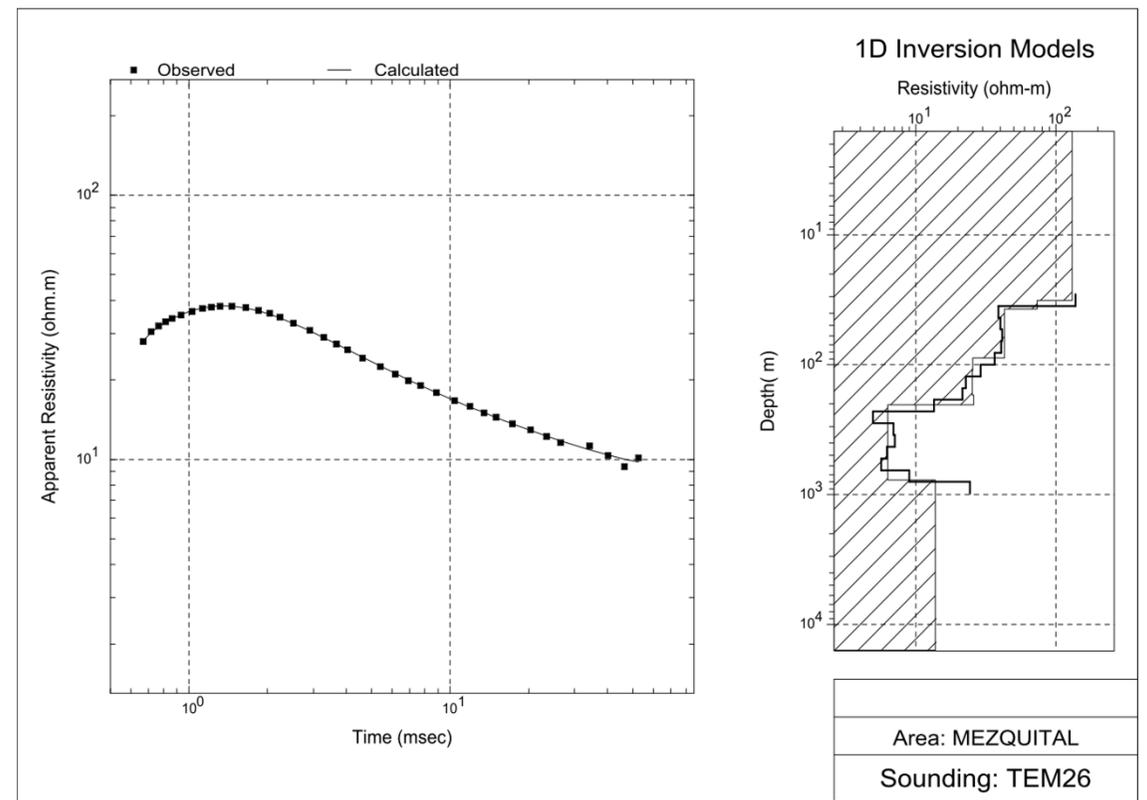
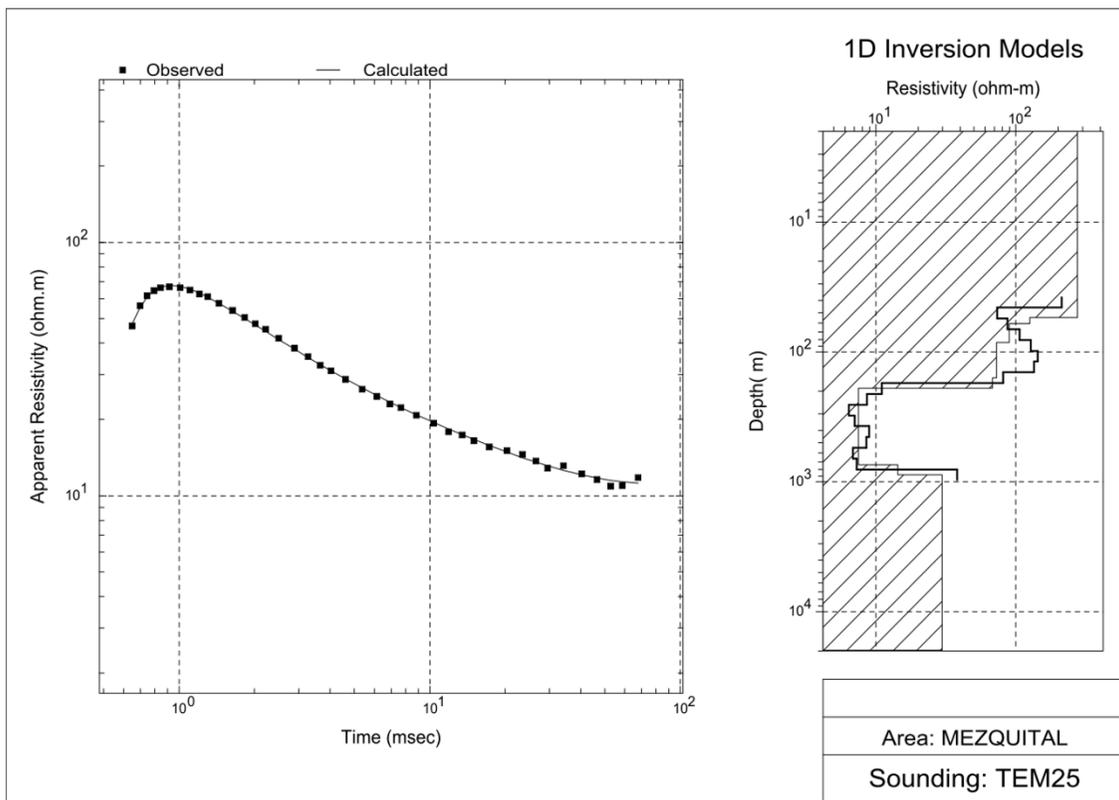


Figura 6.7 – Gráficas de Resistividad TEMS 25 – 28

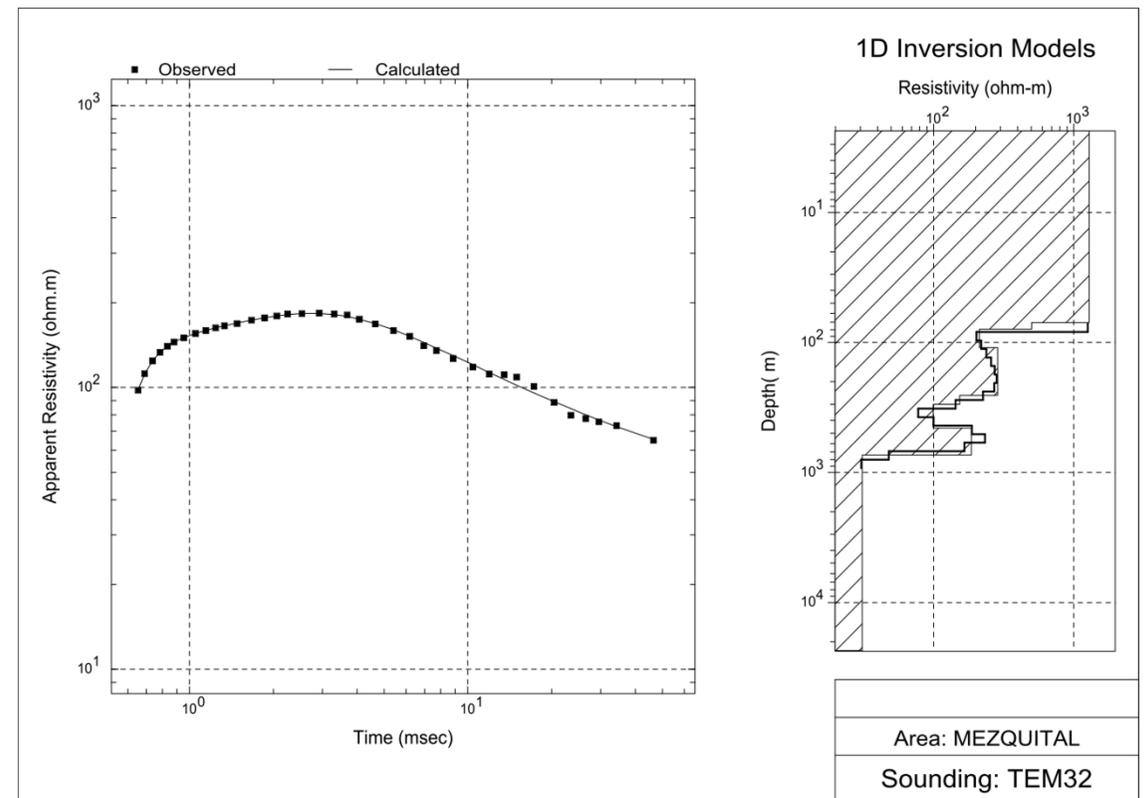
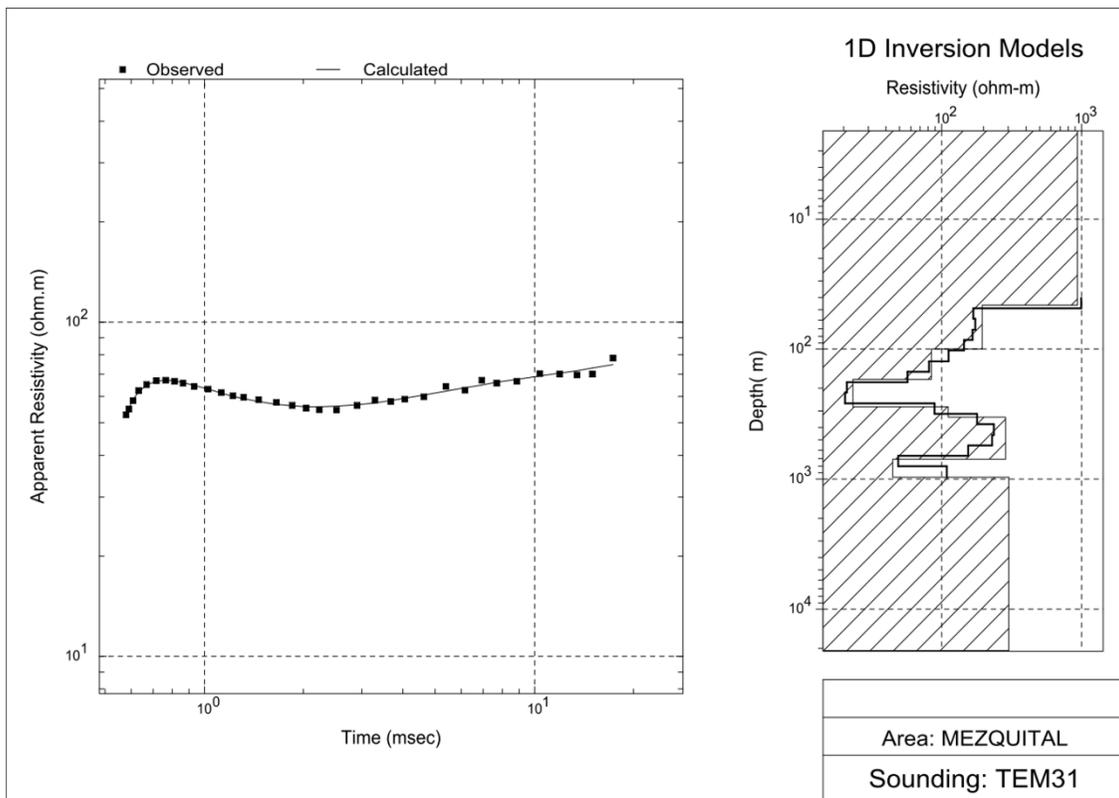
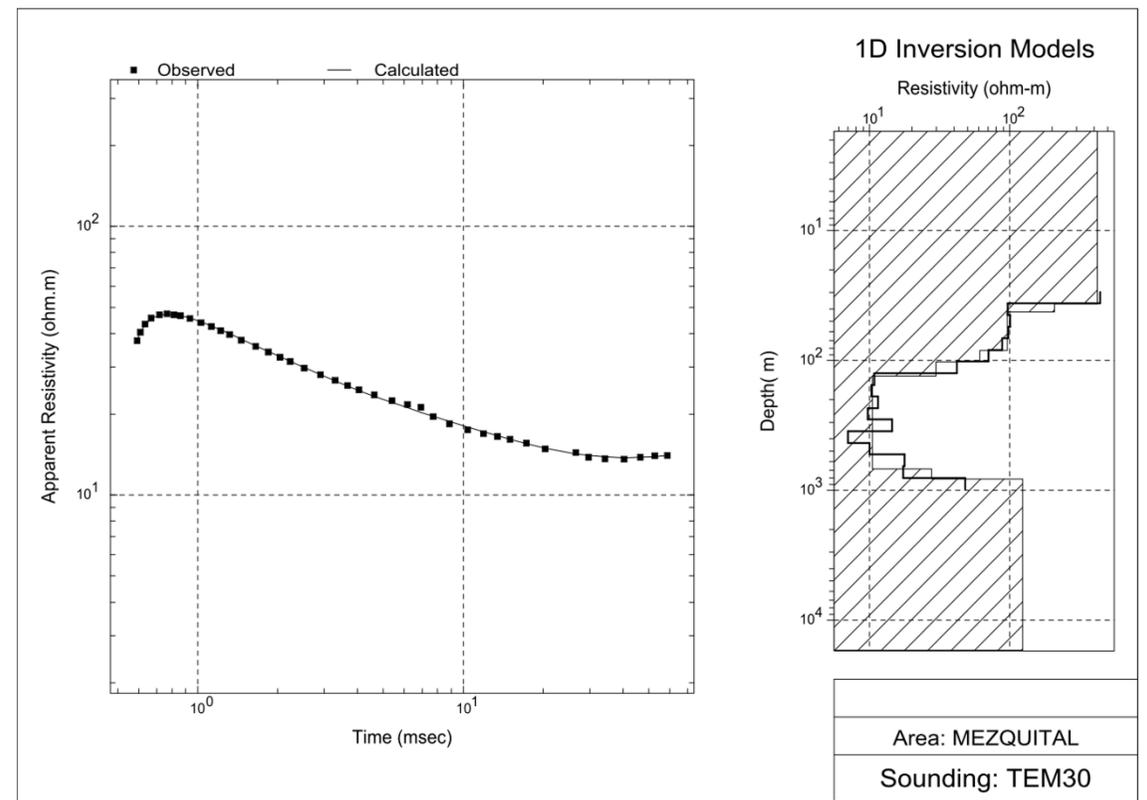
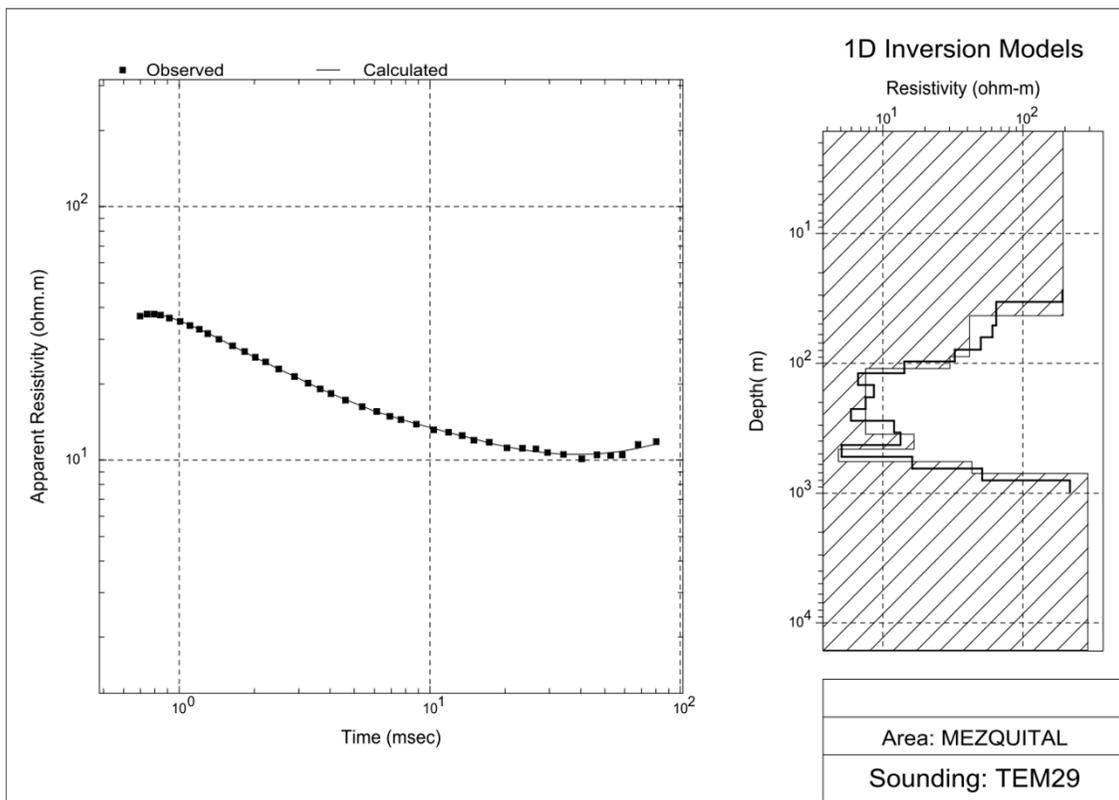


Figura 6.8 – Gráficas de Resistividad TEMS 29 – 32

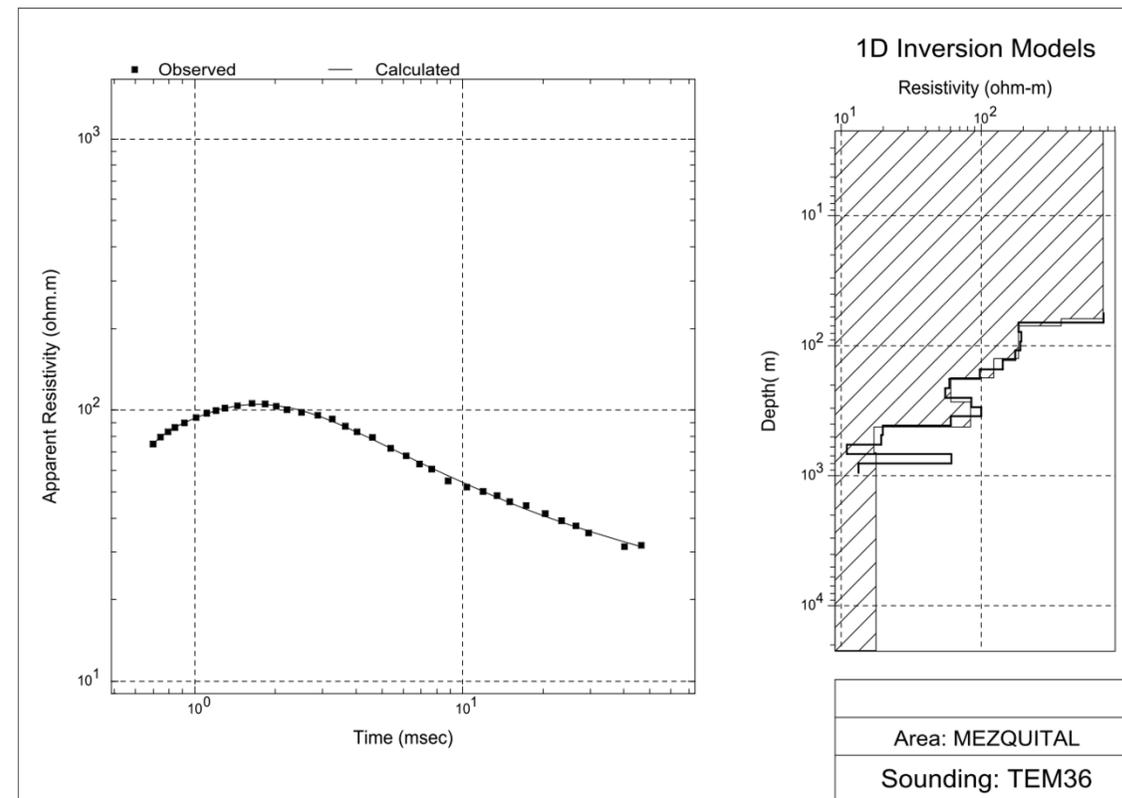
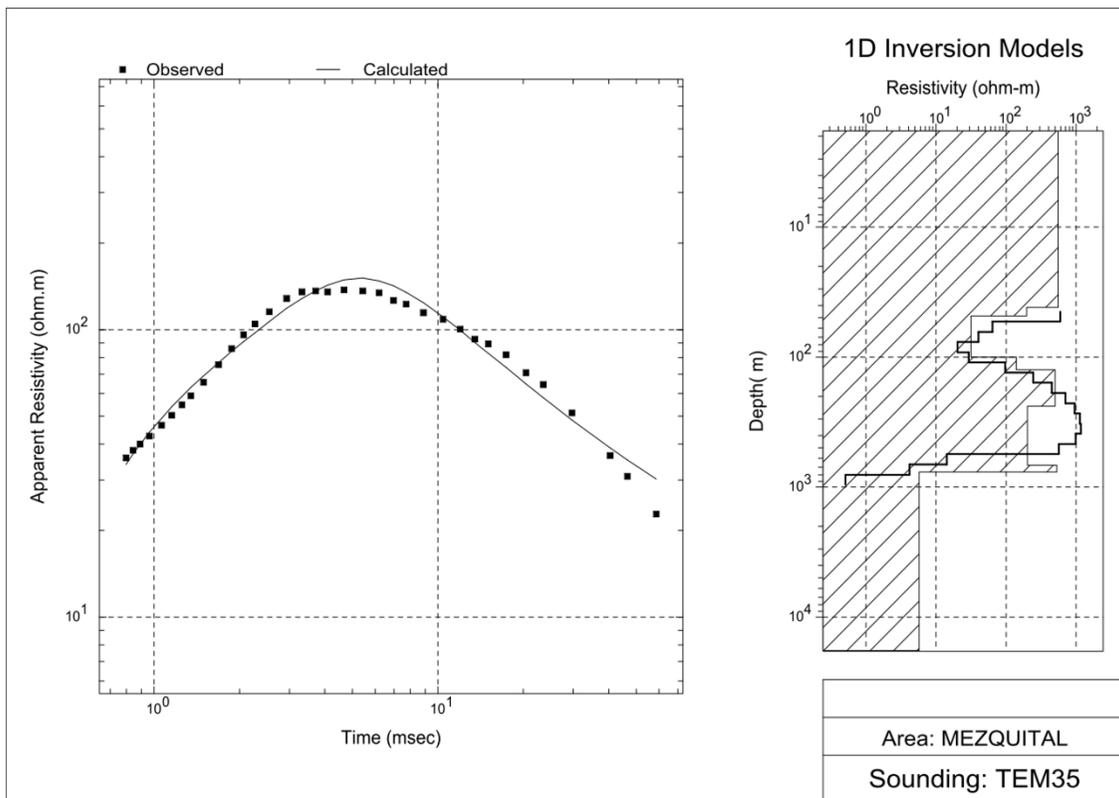
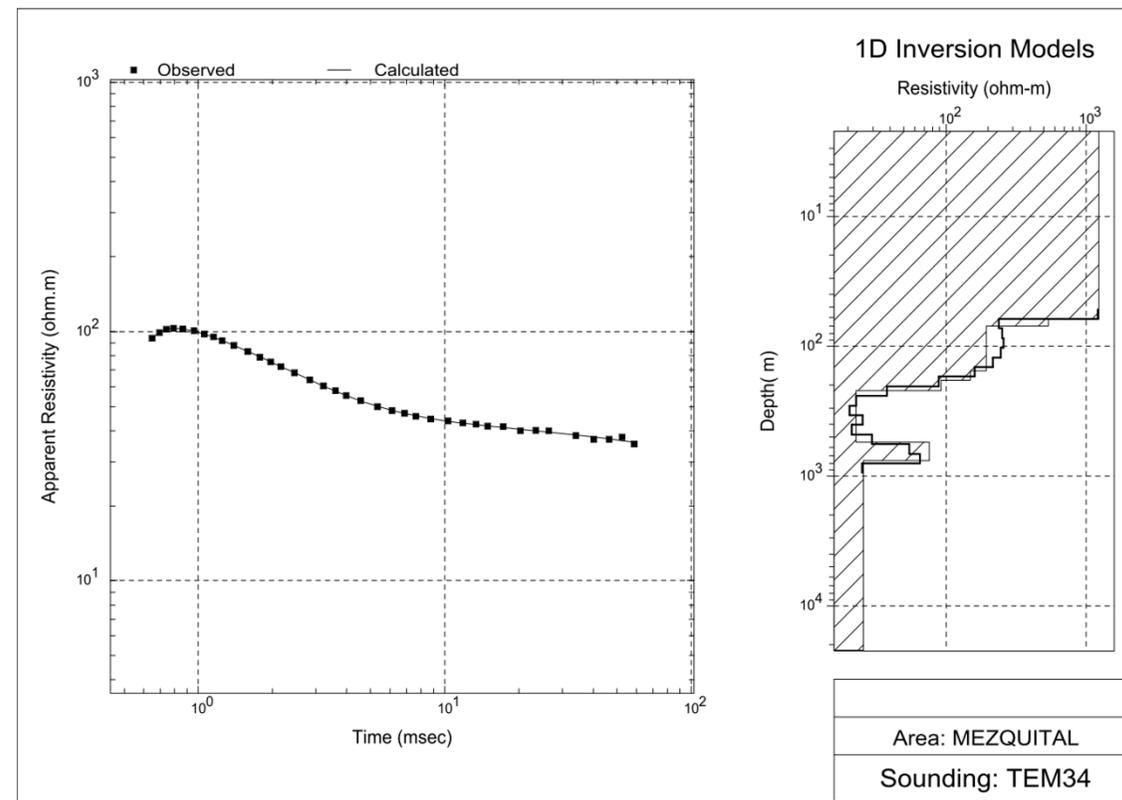
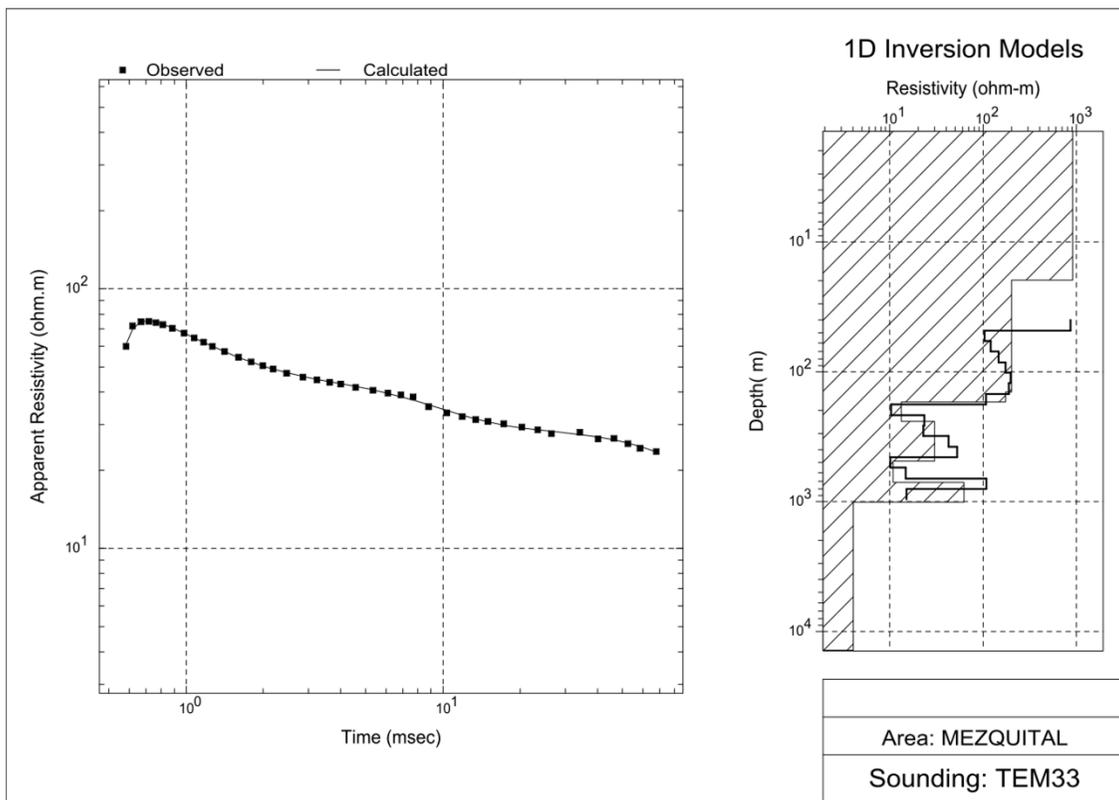


Figura 6.9 – Gráficas de Resistividad TEMS 33 – 36

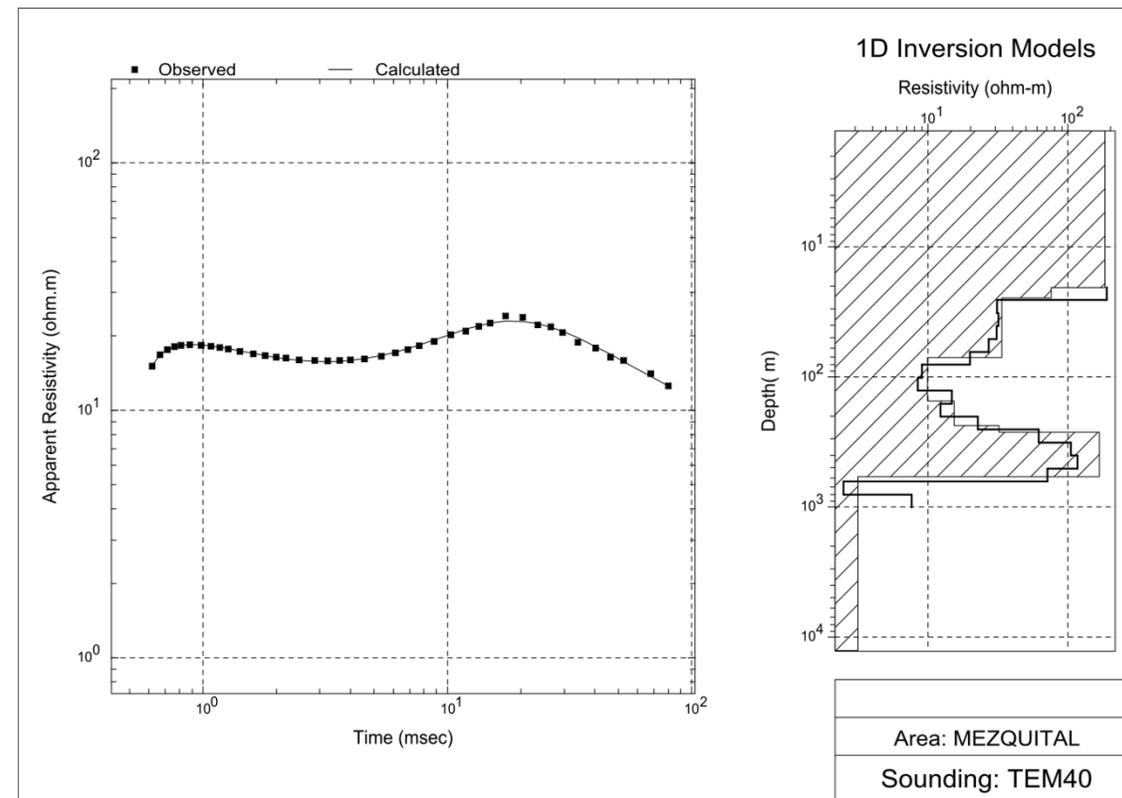
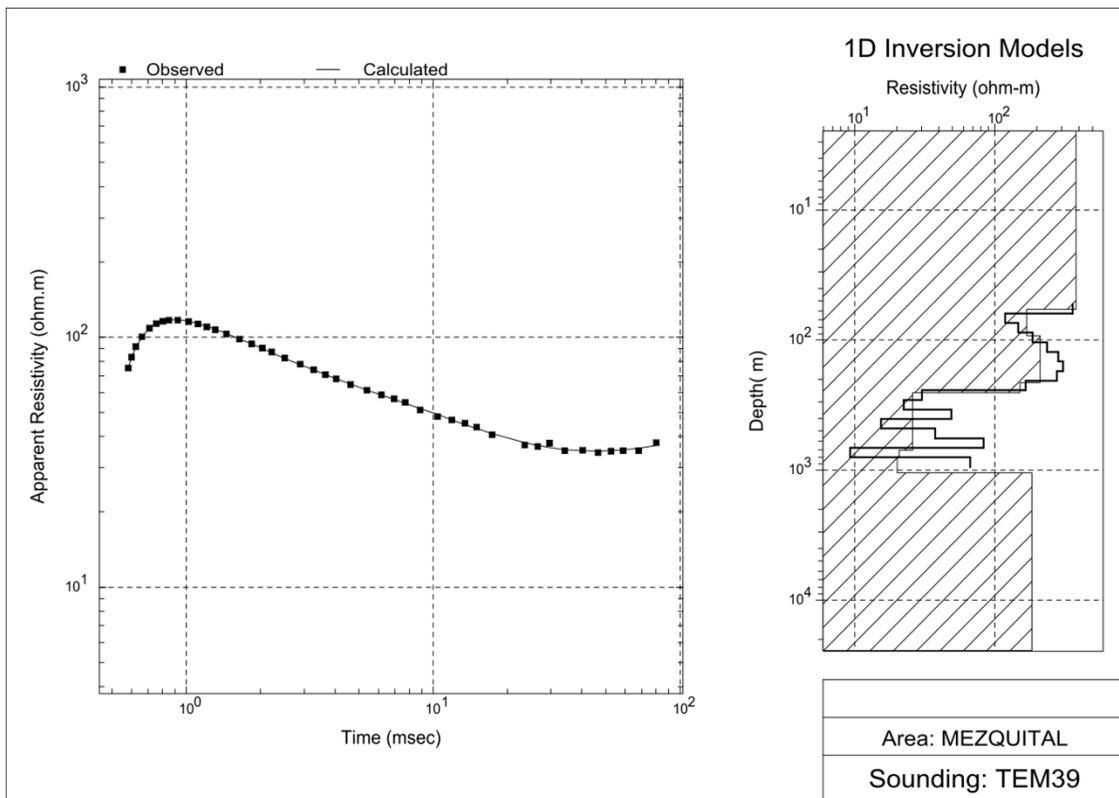
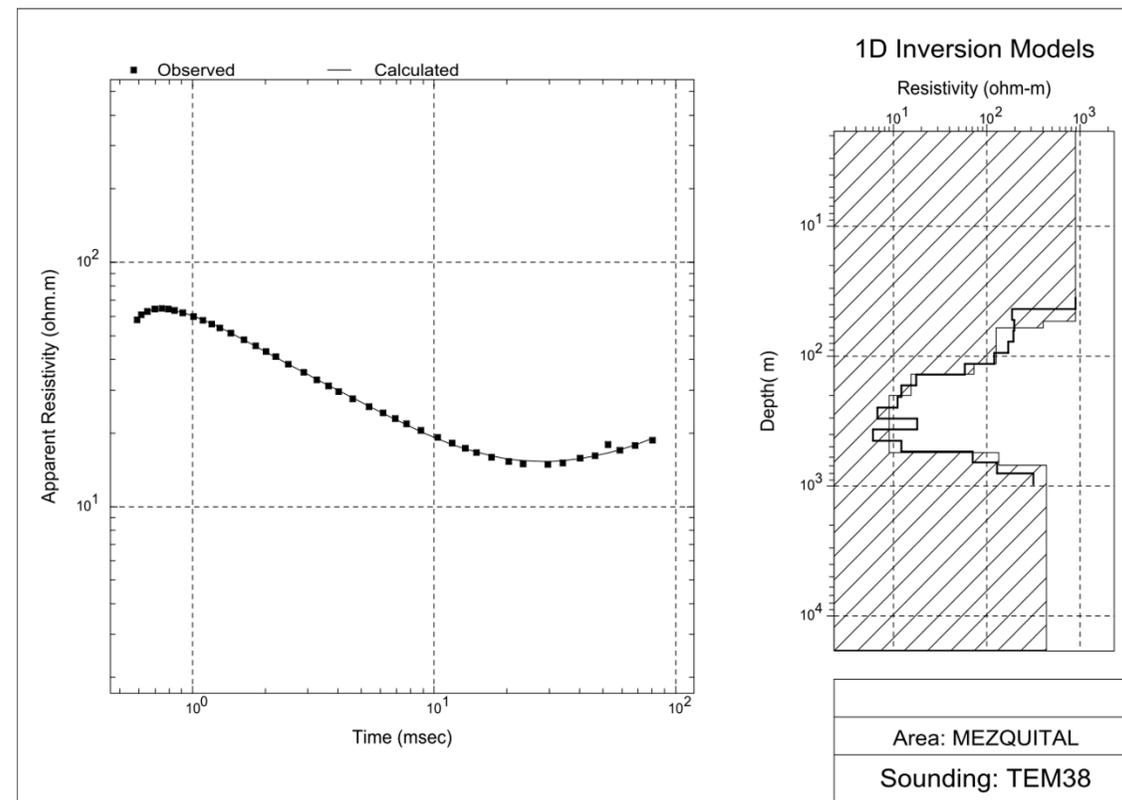
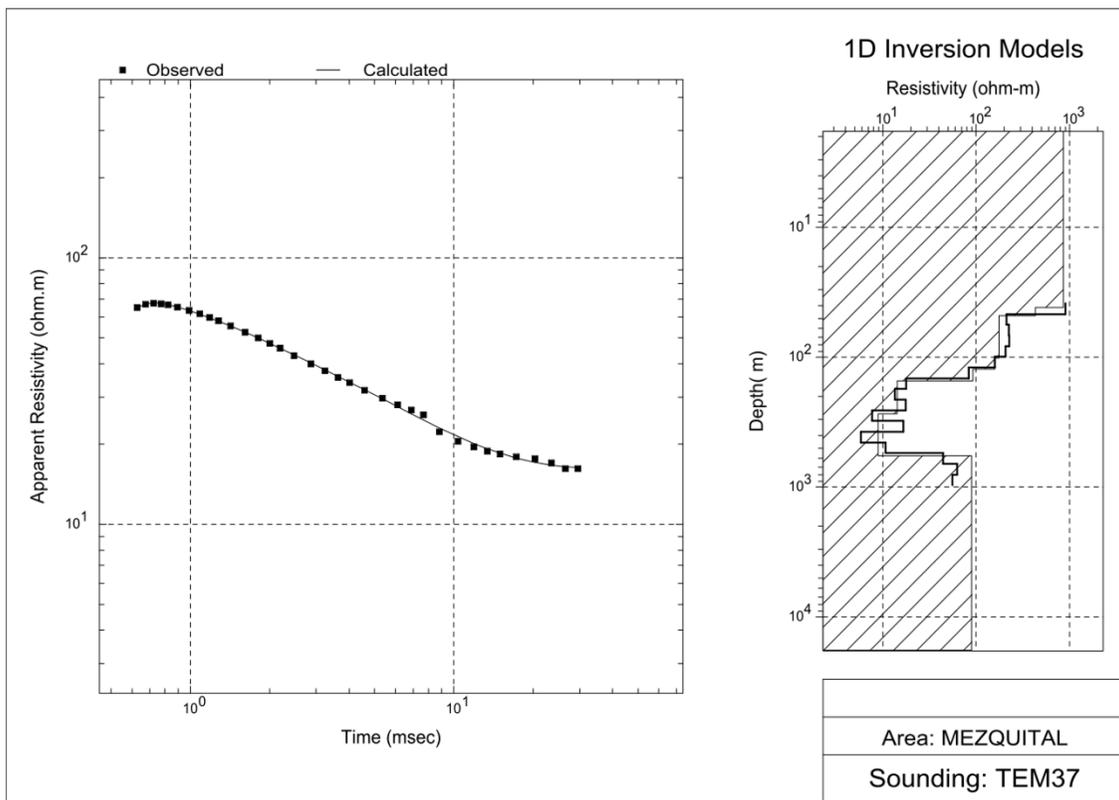


Figura 6.10 – Gráficas de Resistividad TEMS 37 – 40

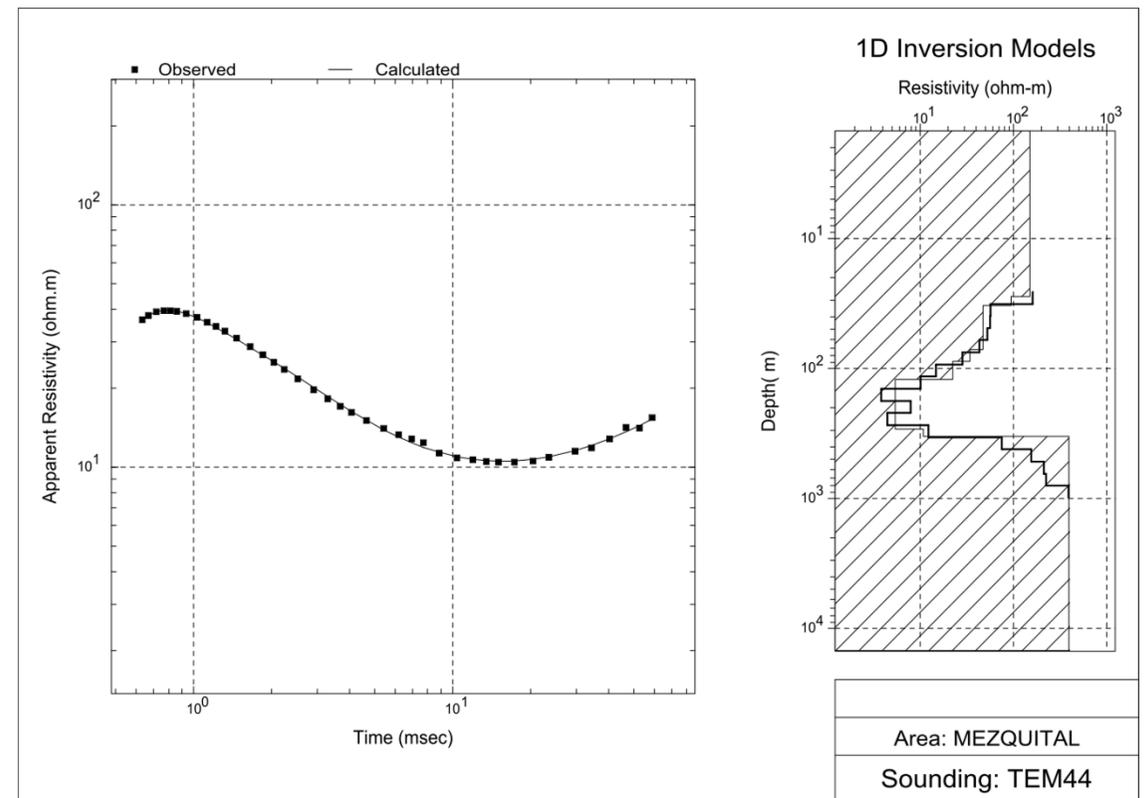
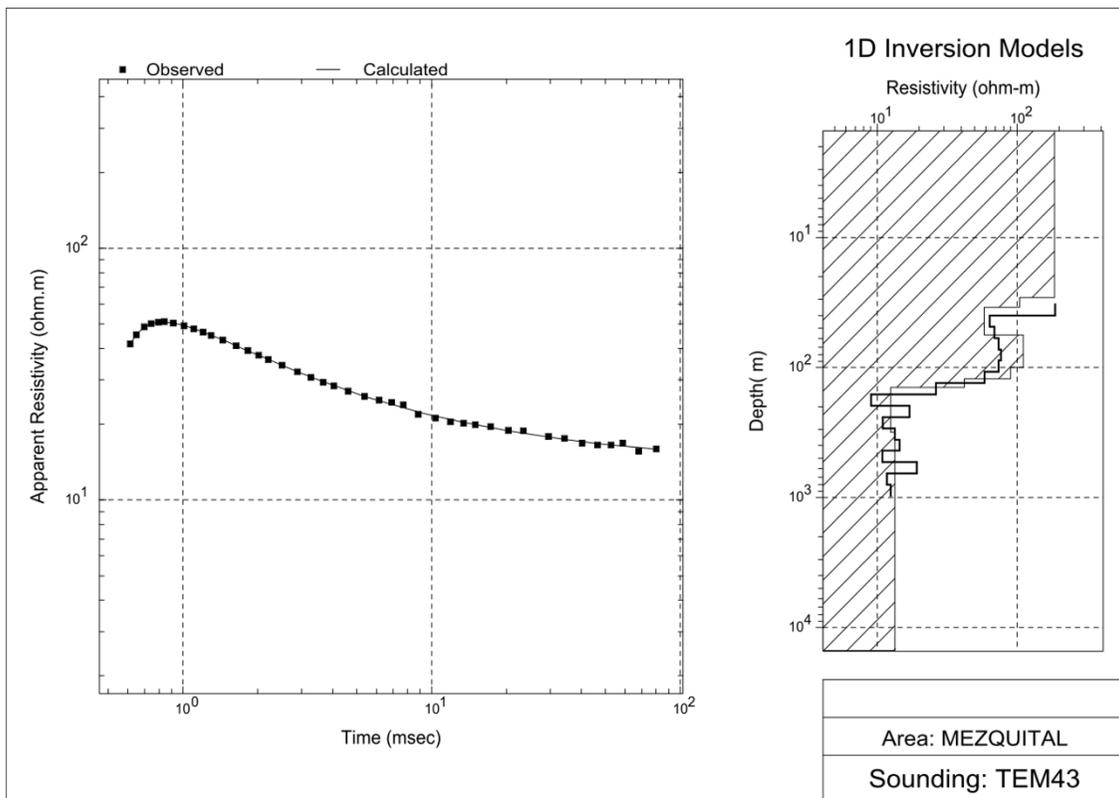
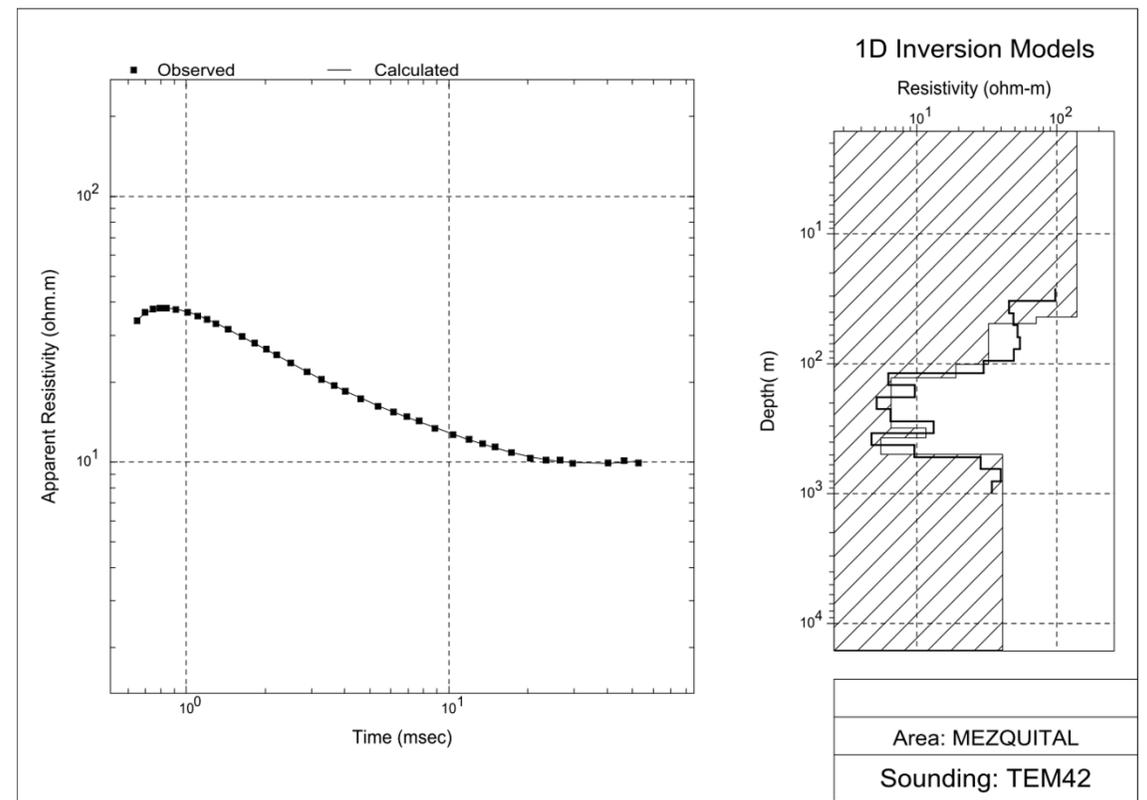
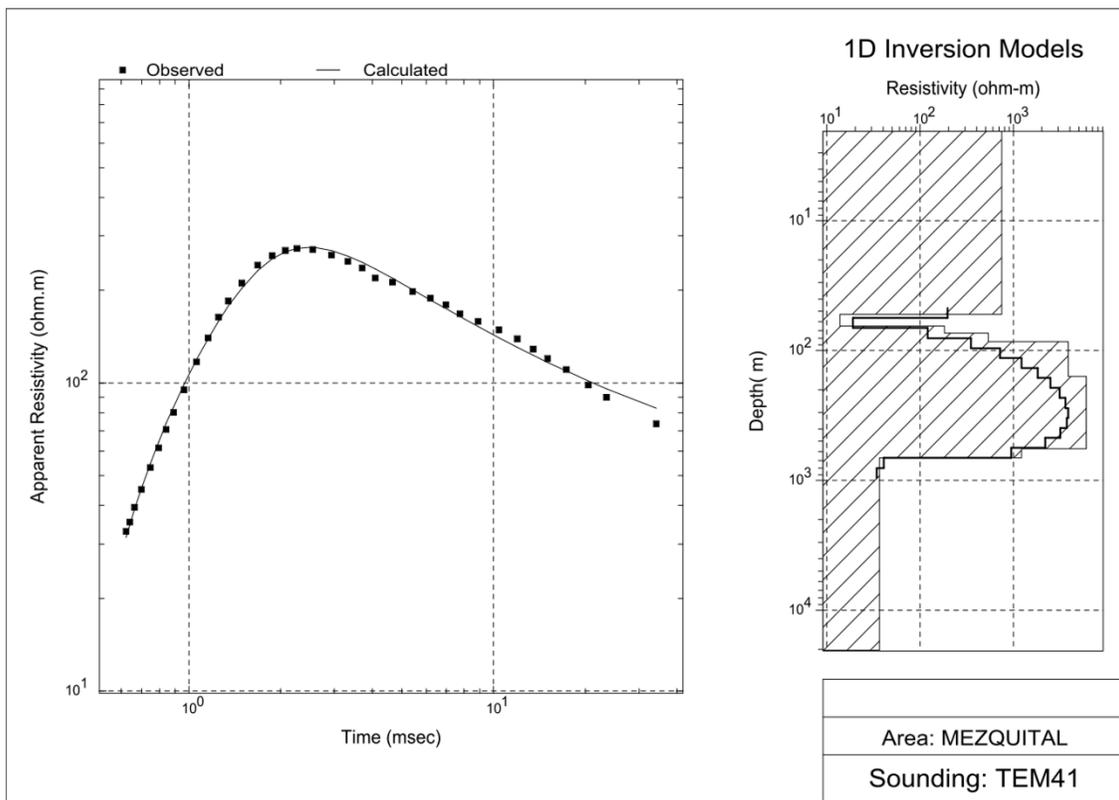


Figura 6.11 – Gráficas de Resistividad TEMS 41 – 44

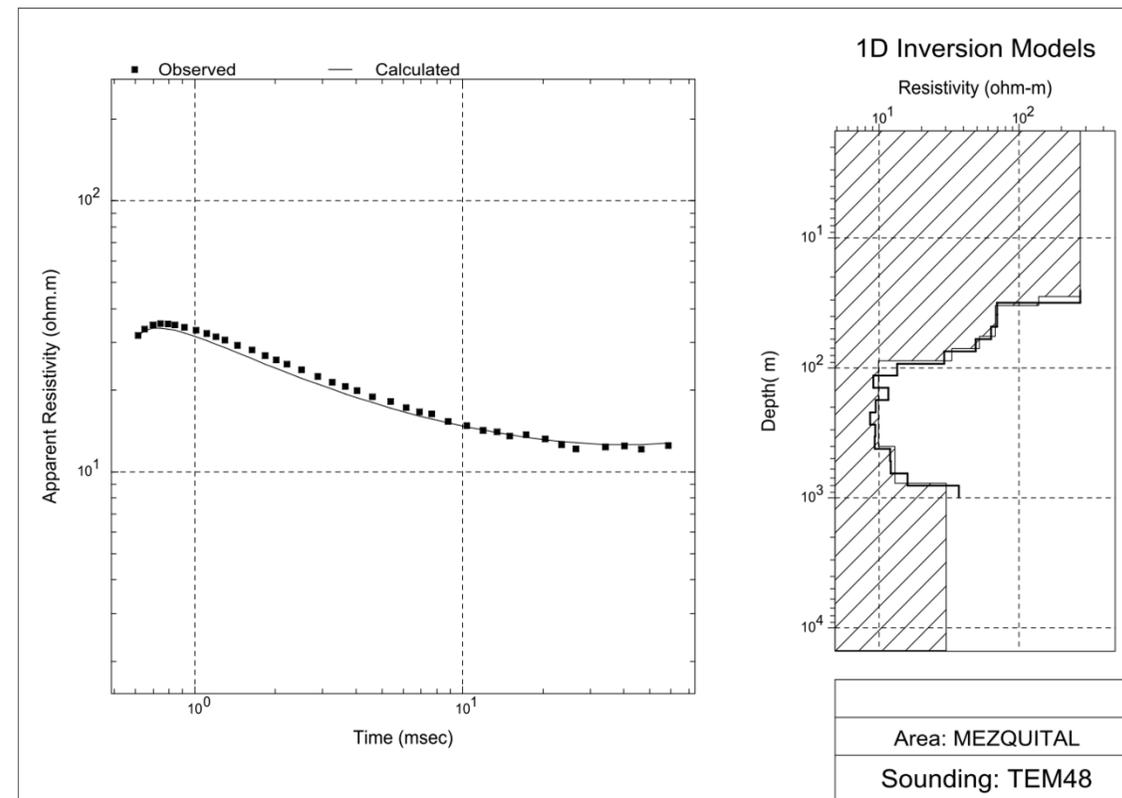
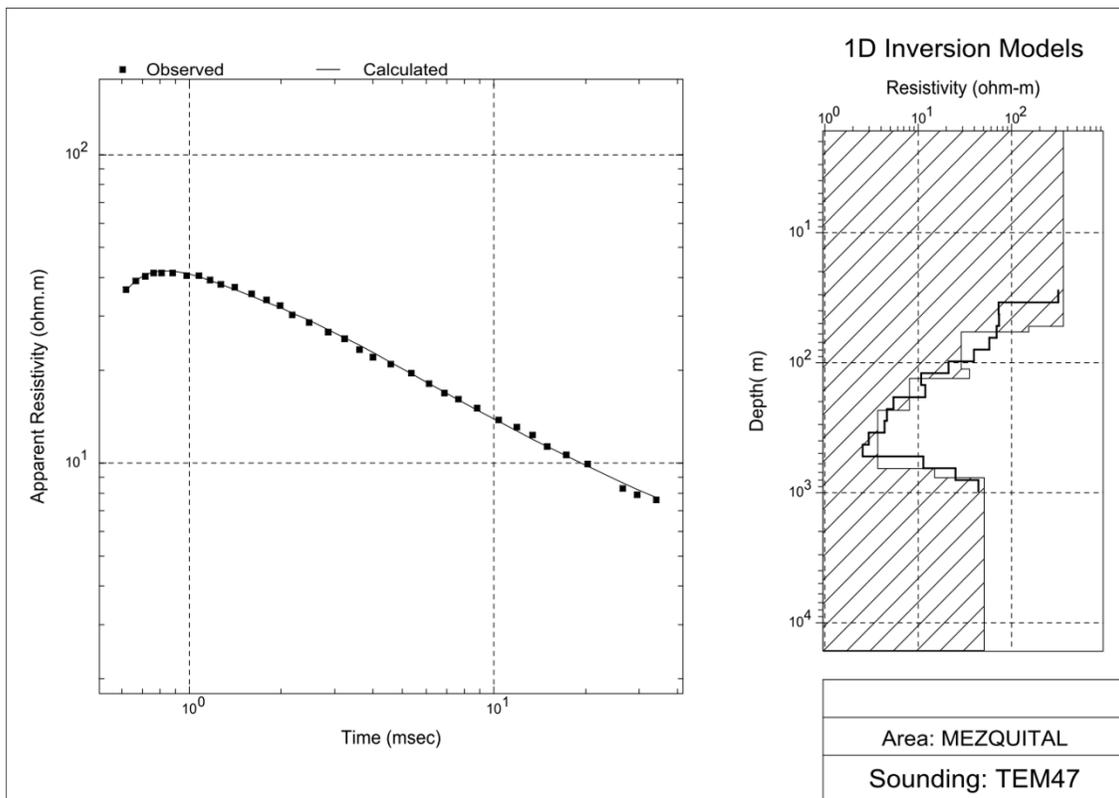
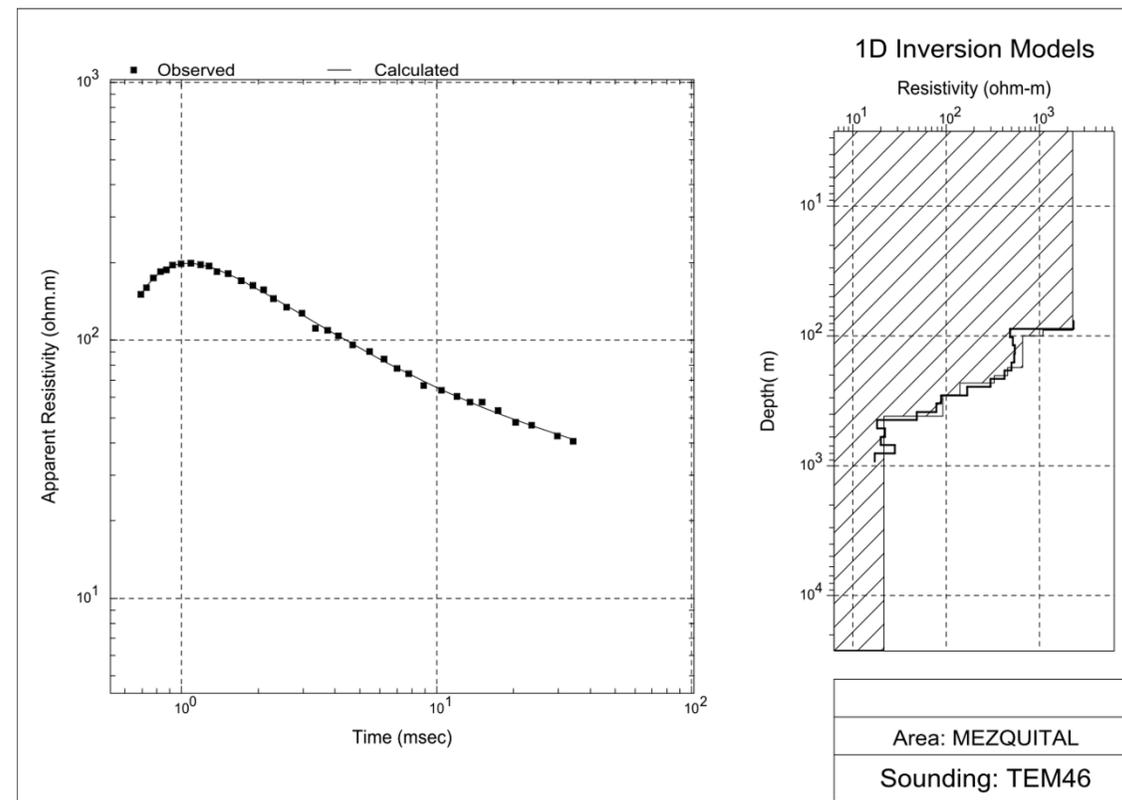
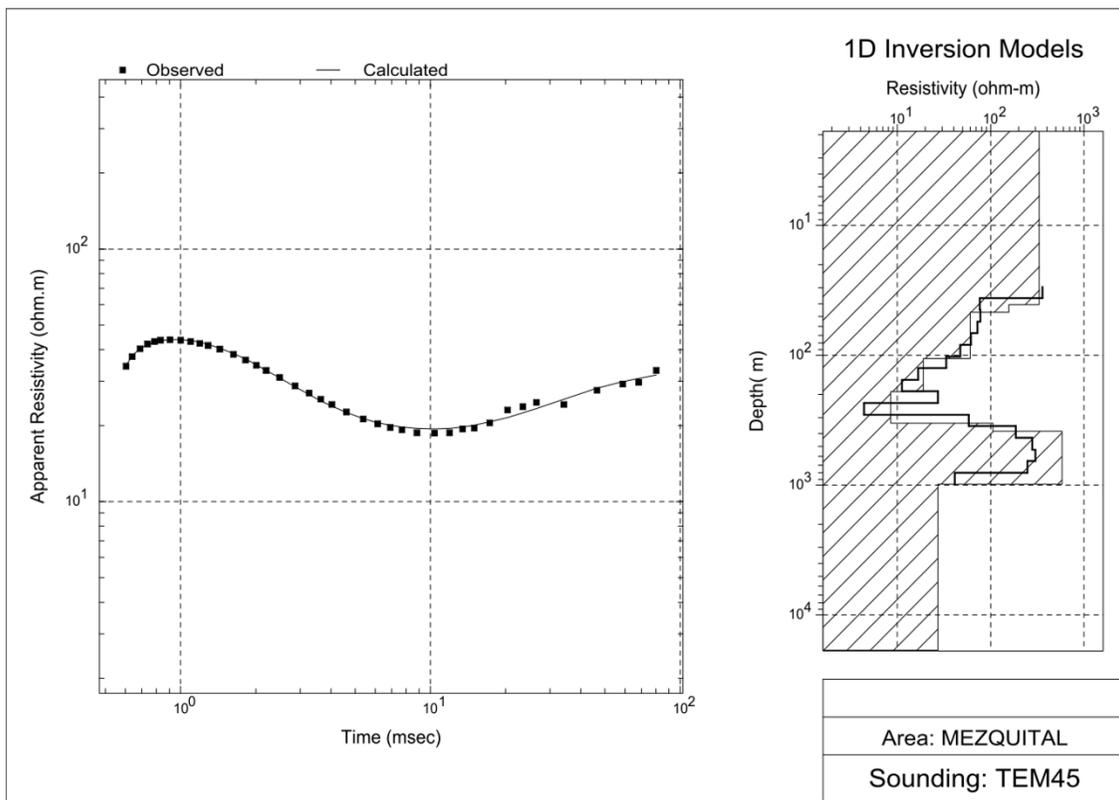


Figura 6.12 – Gráficas de Resistividad TEMS 45 – 48

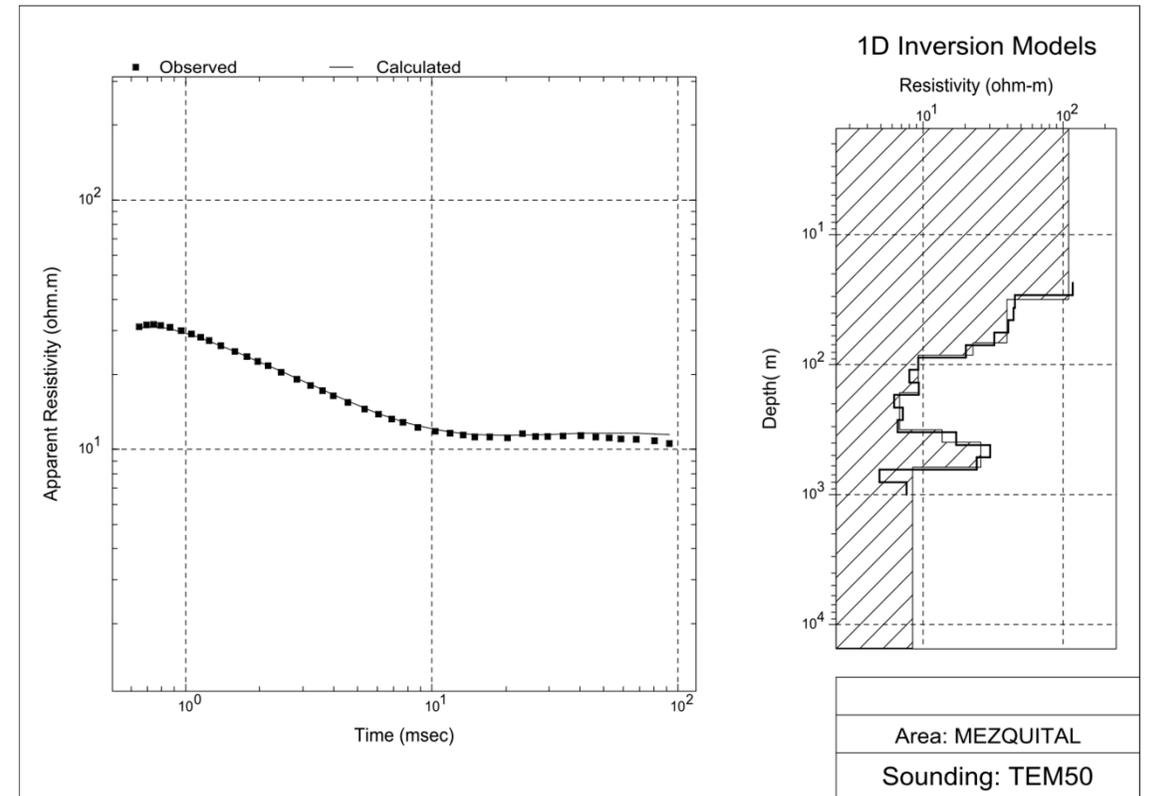
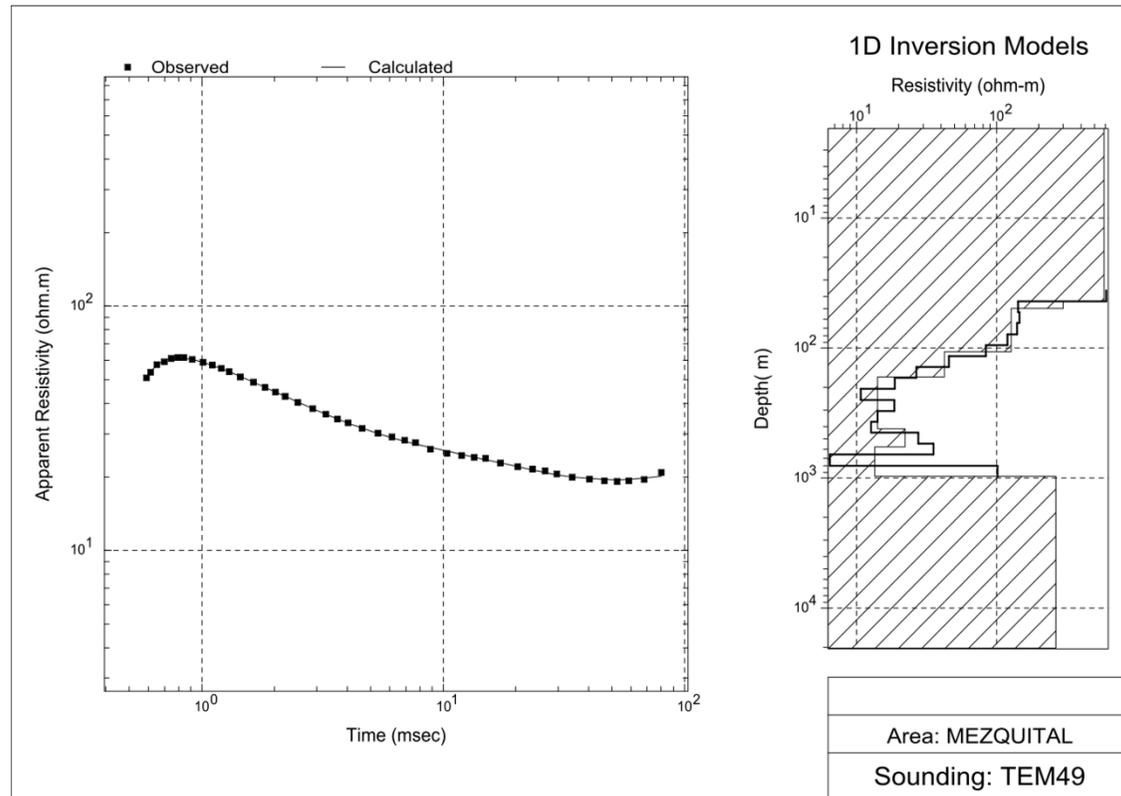


Figura 6.13 – Gráficas de Resistividad TEMS 49 – 50

ANEXO 7

MEMORIA FOTOGRÁFICA





TEM 1



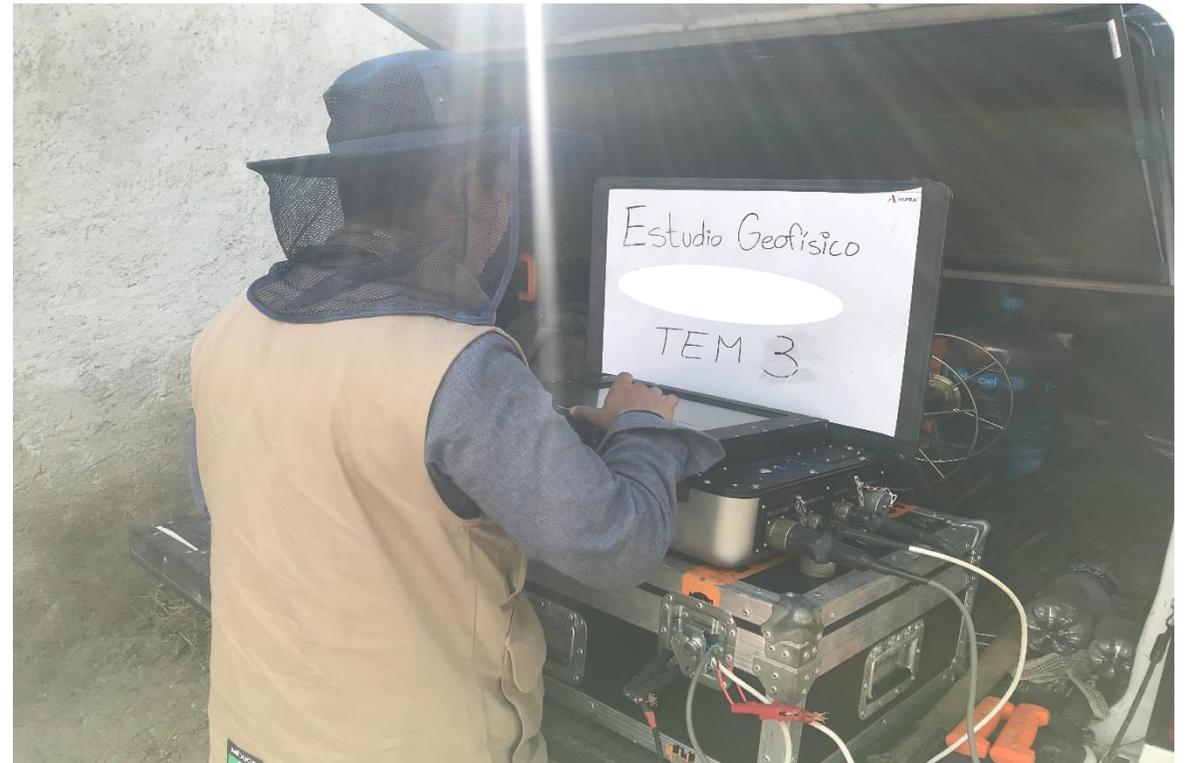


TEM 2





TEM 3







TEM 5













TEM 10







TEM 12

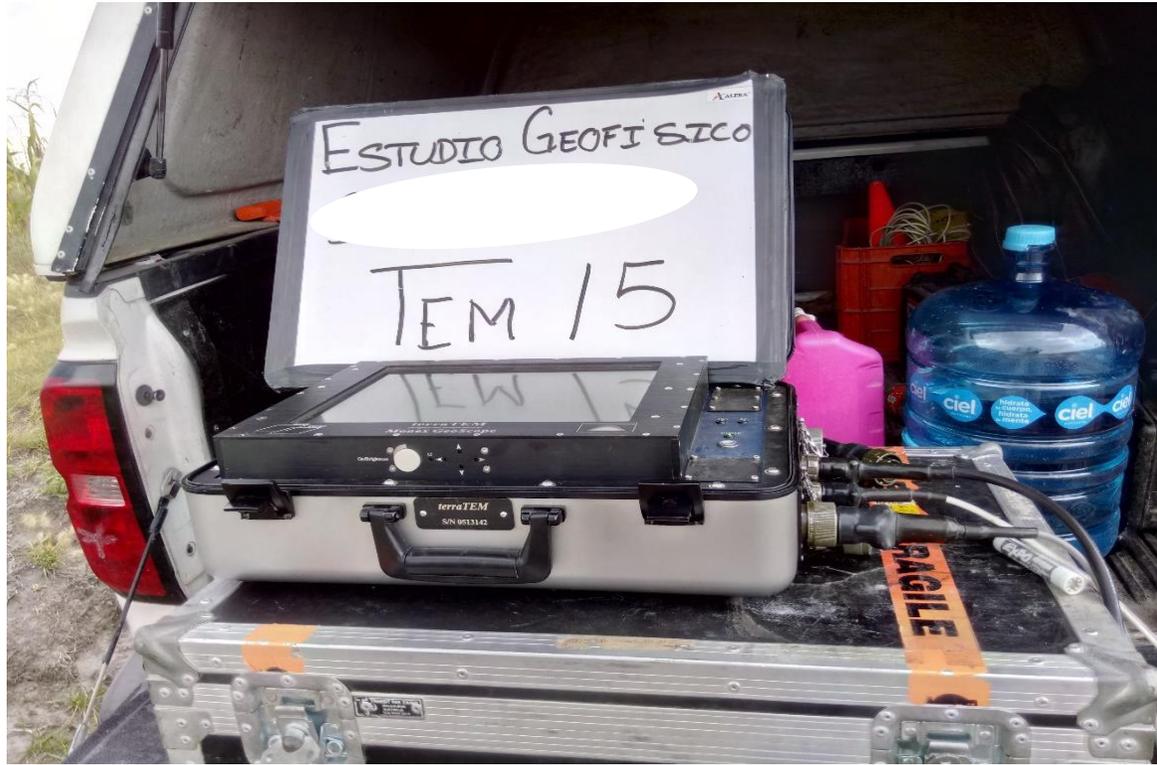








TEM 15







TEM 17





TEM 18





TEM 19



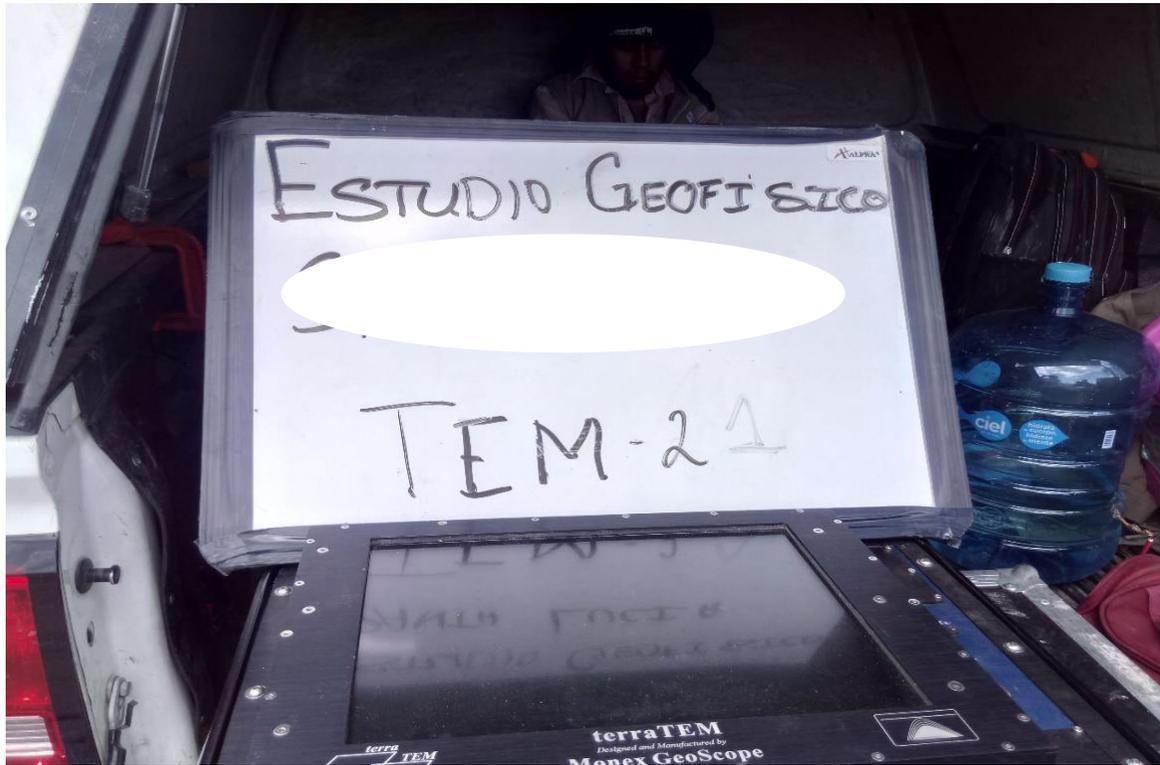


TEM 20





TEM 21





TEM 22





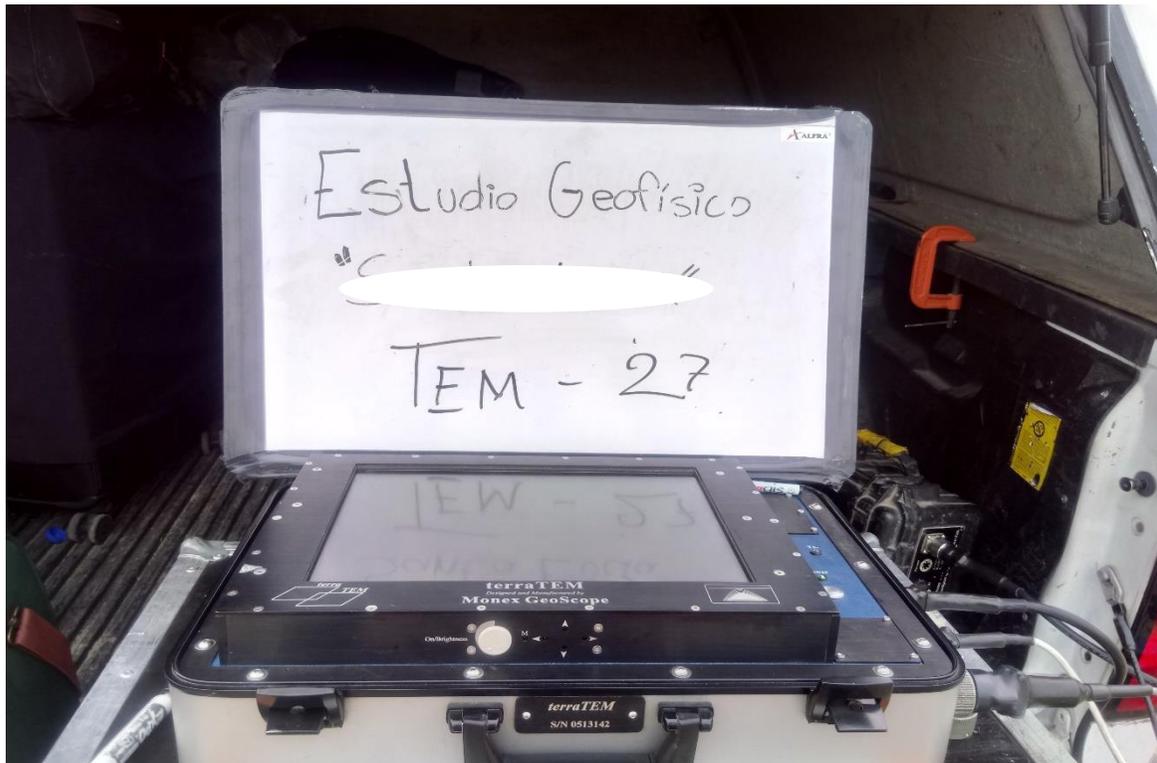








TEM 27







TEM 29



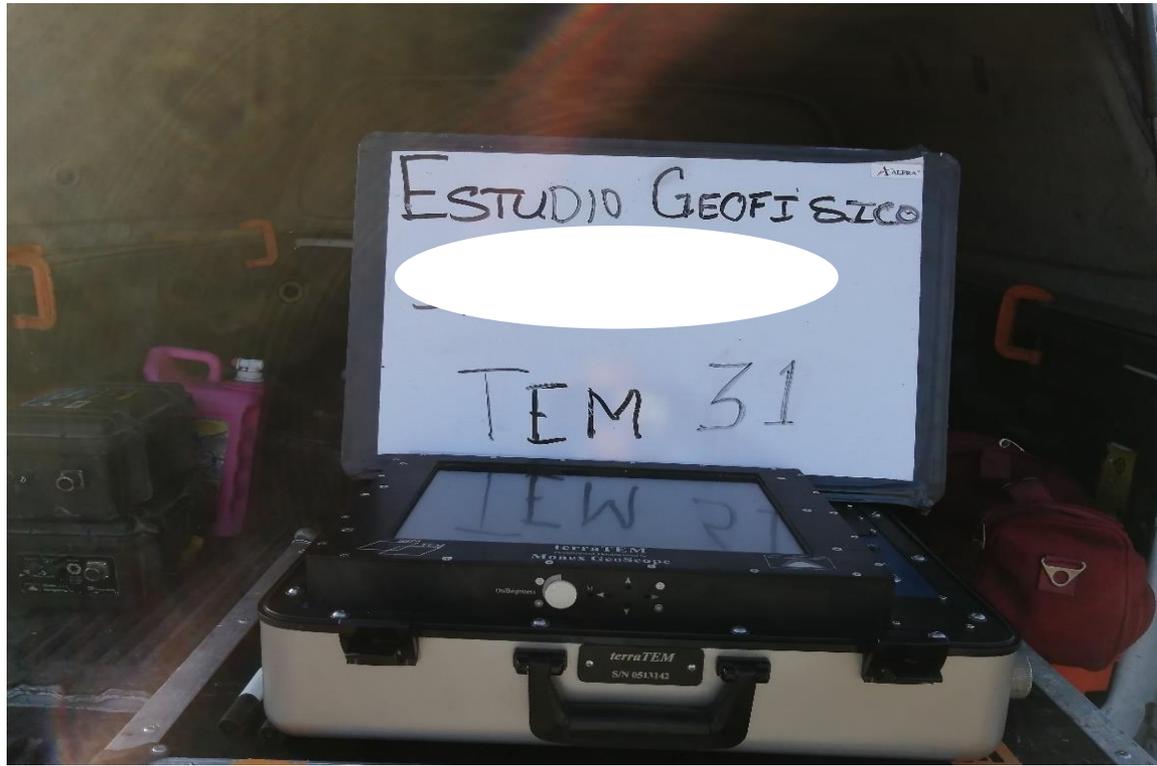


TEM 30





TEM 31









TEM 34





TEM 35





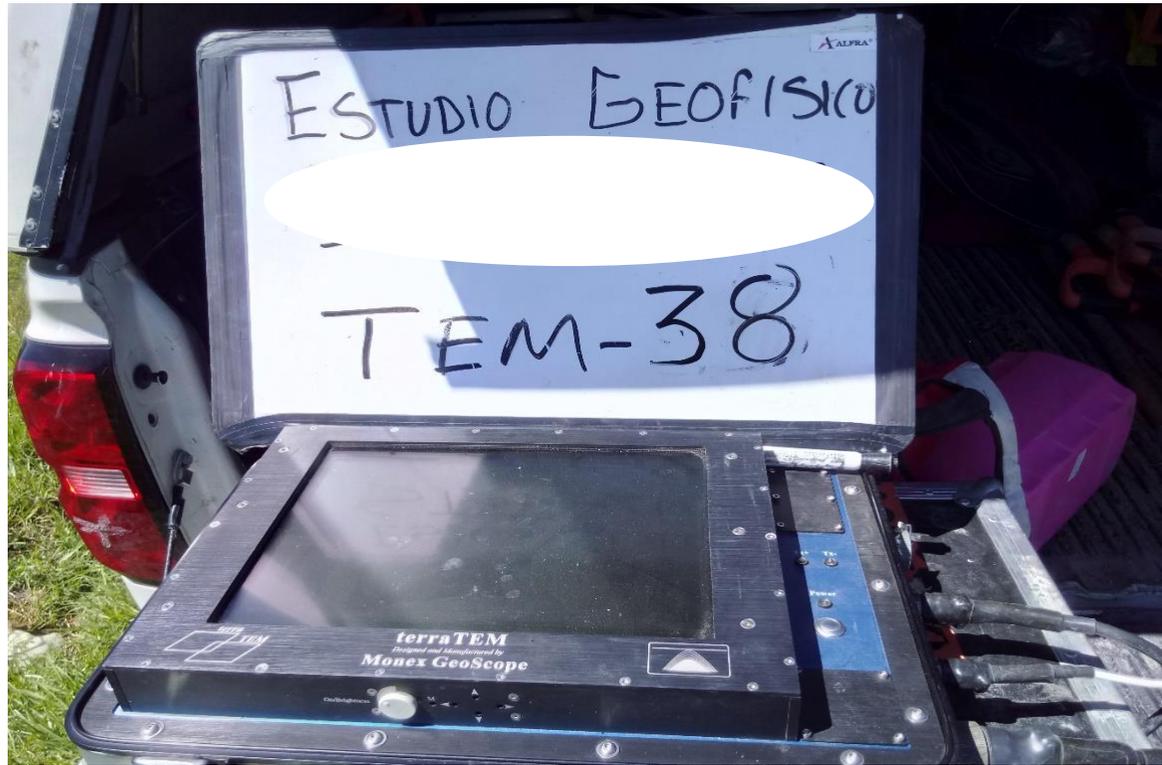
TEM 36

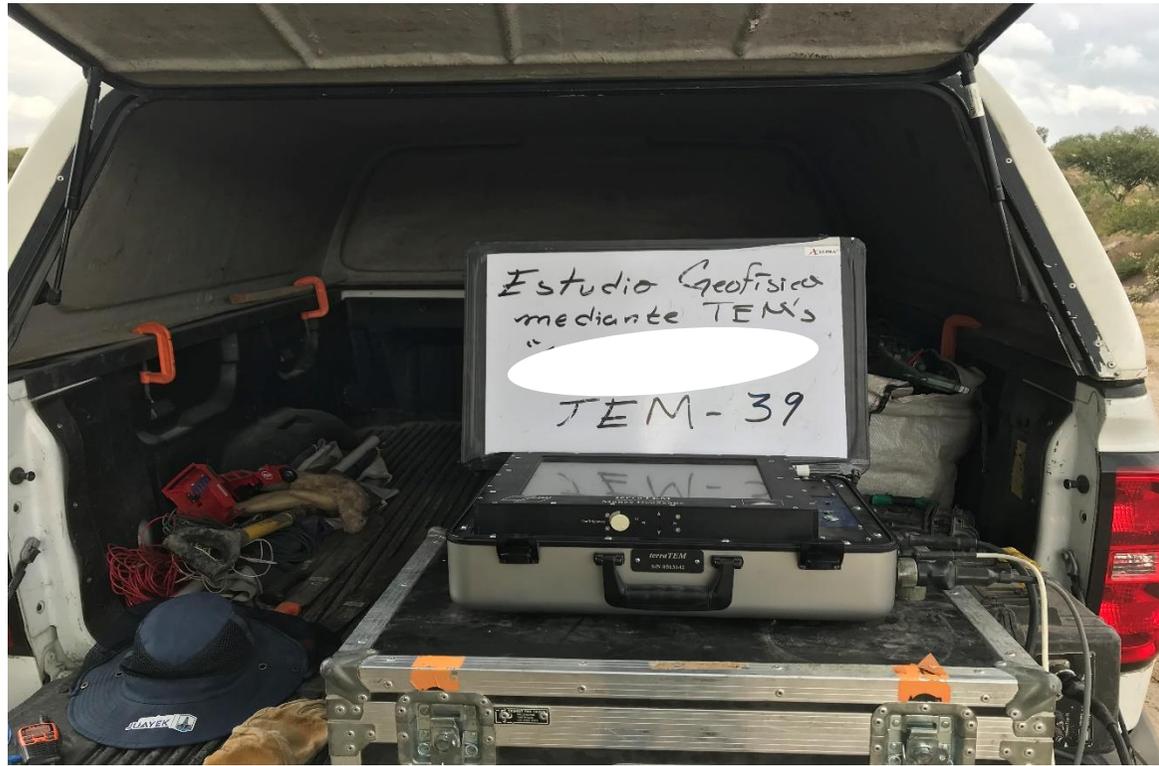




TEM 37

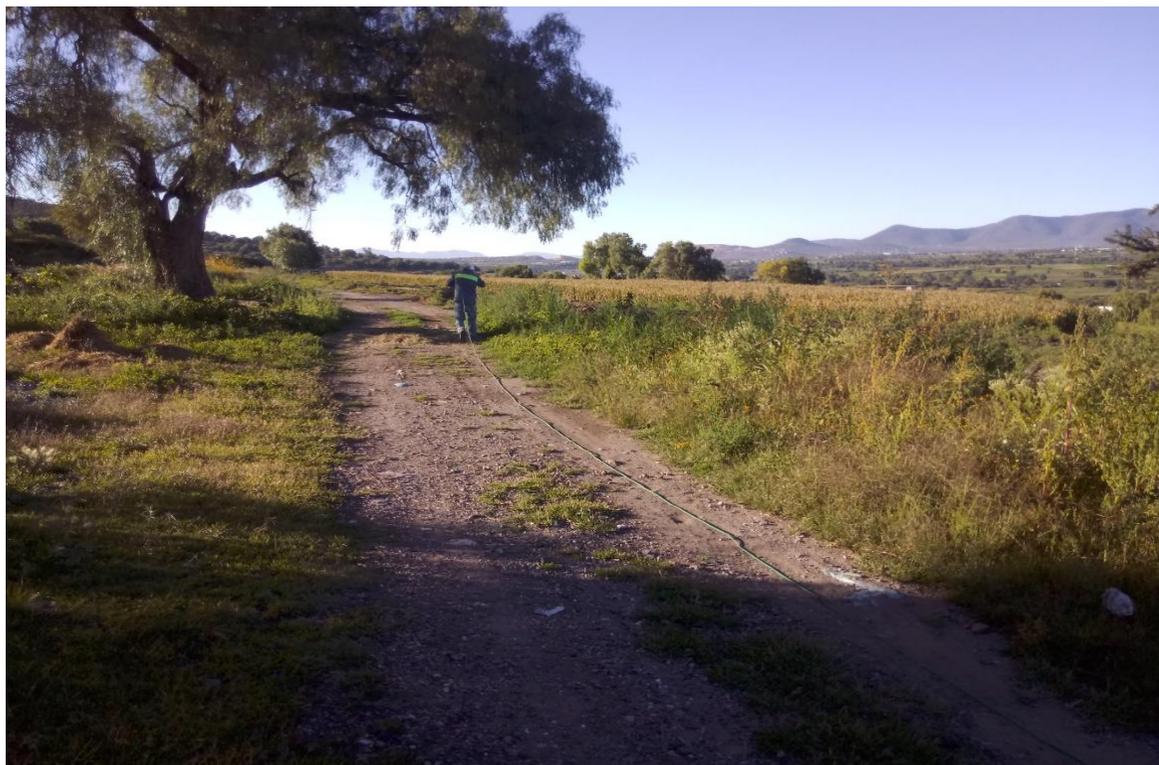
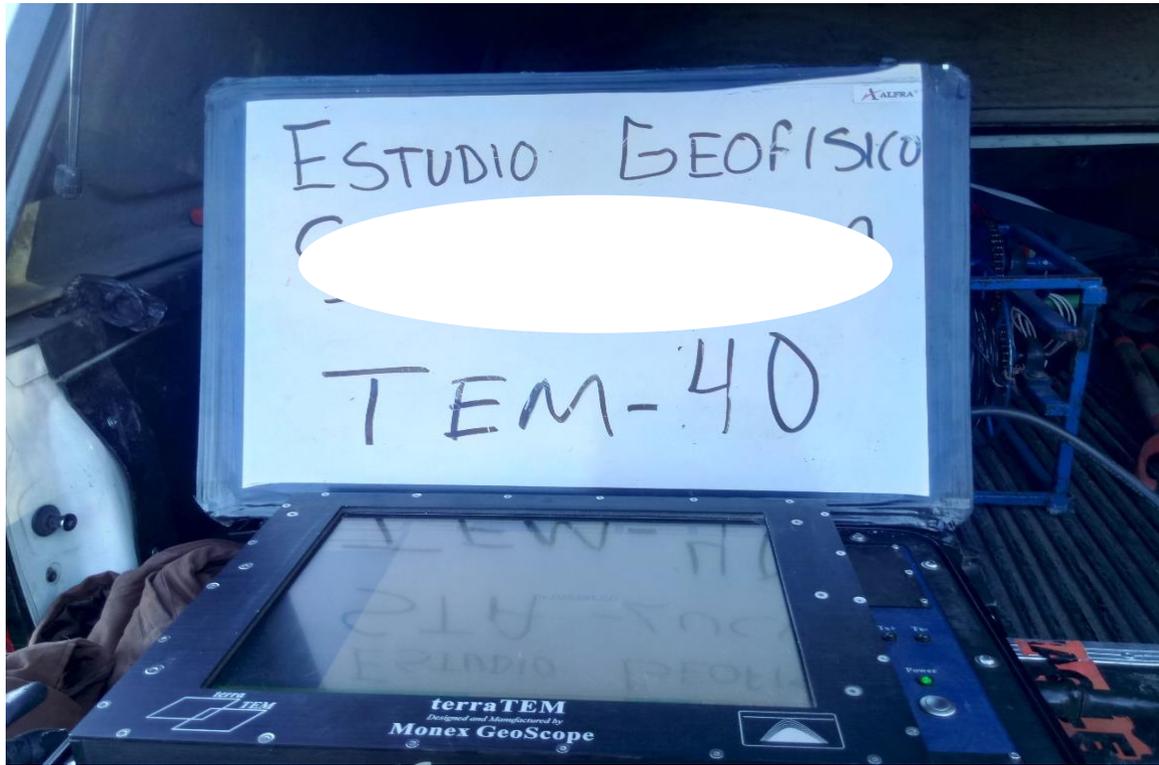








TEM 40





TEM 41







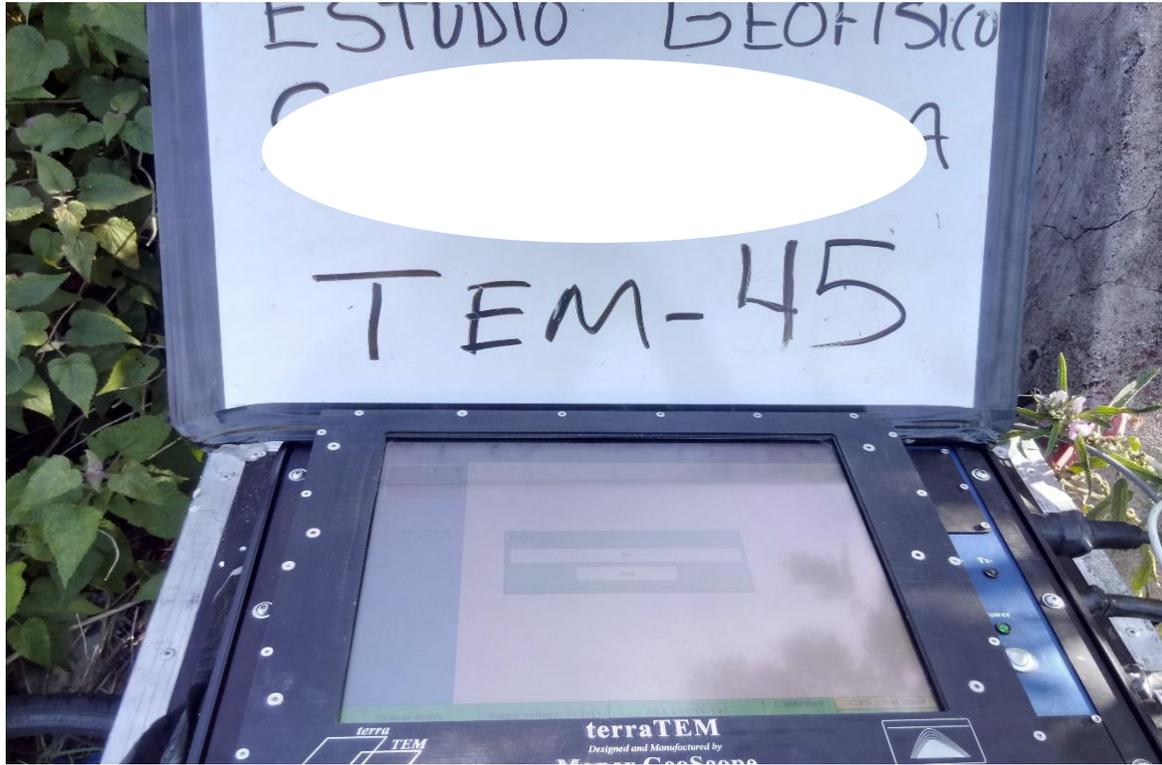


TEM 44



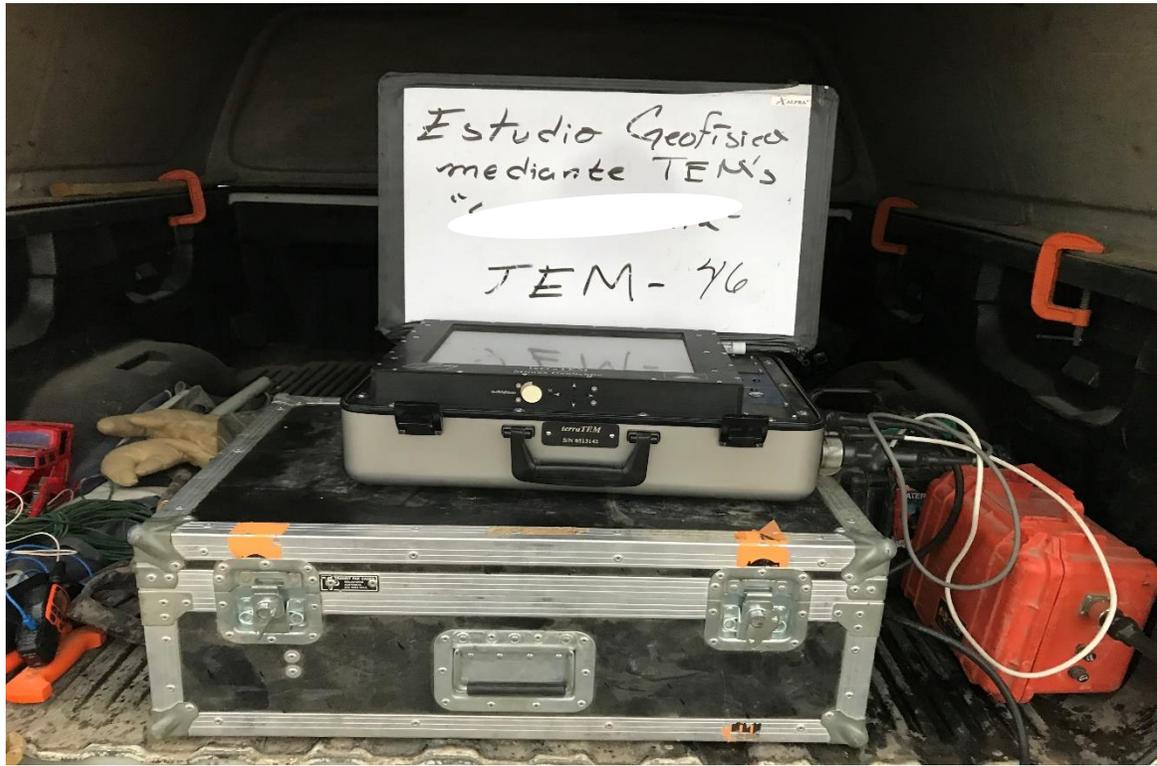


TEM 45





TEM 46



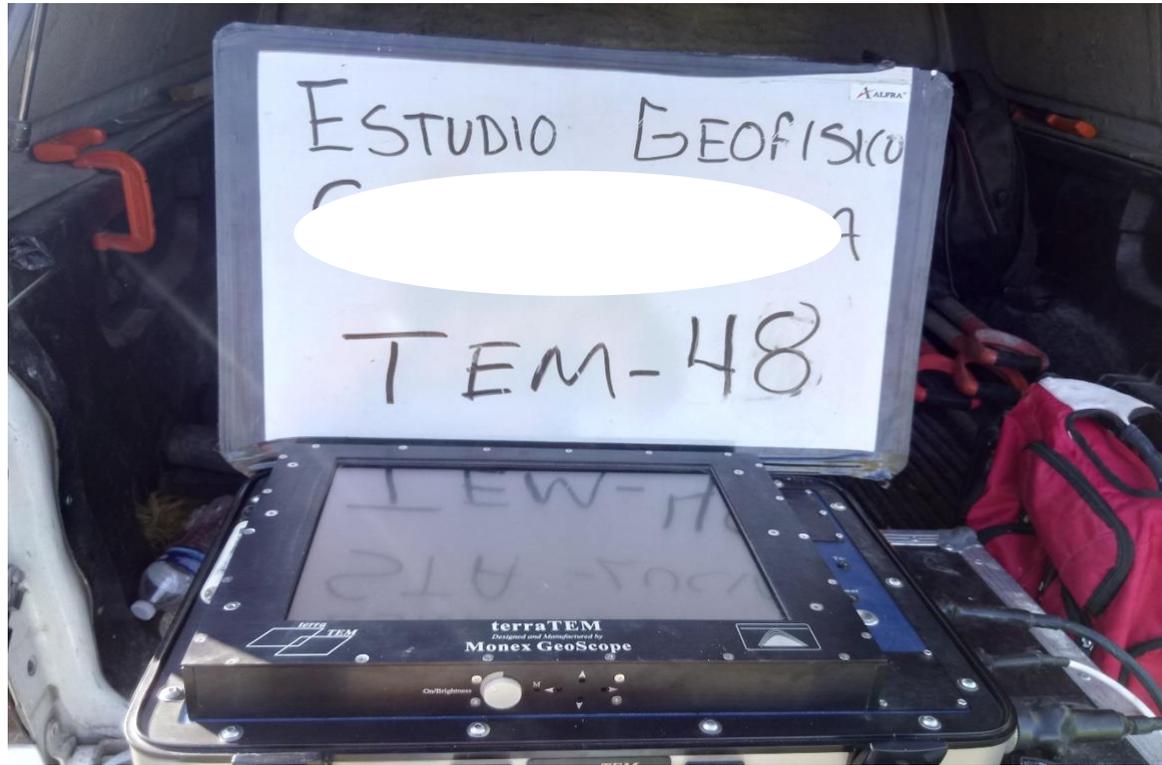


TEM 47



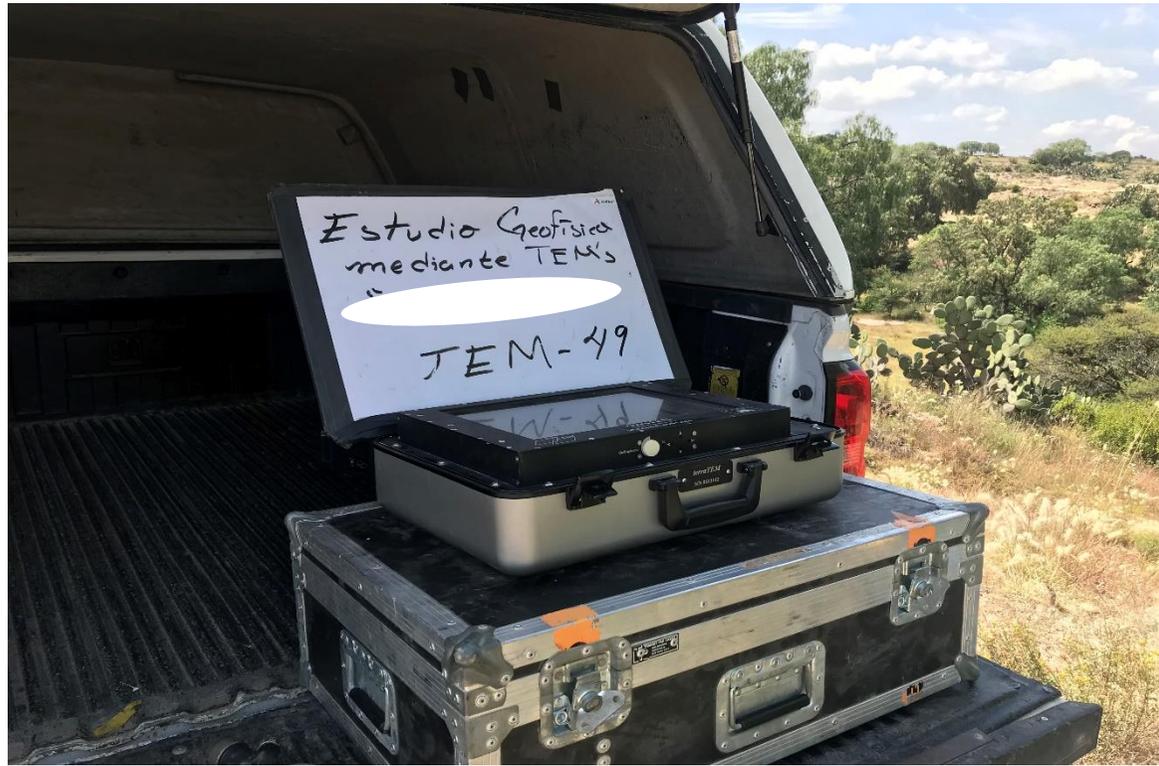


TEM 48





TEM 49





TEM 50

