



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

Estudio de Tomografía de Resistividad
Eléctrica previo a una excavación
arqueológica

T E S I S

PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO GEOFISICO

PRESENTA:

VIRIDIANA SÁNCHEZ VÁSQUEZ

DIRECTOR:

M. EN C. GERARDO CIFUENTES NAVA





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN
CIENCIAS DE LA TIERRA
OFICIO/FING/DICT/ 217 /2013

SRITA. VIRIDIANA SÁNCHEZ VÁSQUEZ

Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento que la opción de titulación: **POR TESIS**, así como el tema y contenido propuestos por el **M.C. Gerardo Cifuentes Nava**, en calidad de **Director de Tesis**, han sido aprobados por el comité de titulación de la carrera de **Ingeniería Geofísica** y se muestran a continuación

ESTUDIO DE TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA PREVIO A UNA EXCAVACIÓN ARQUEOLÓGICA

- I INTRODUCCIÓN
- II ZONA ARQUEOLÓGICA DEL PAHÑÚ
- III TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA
- IV METODOLOGÍA
- V RESULTADOS
- VI CONCLUSIONES

Por otra parte, le comunico que le ha sido asignado el siguiente jurado que tendrá como función básica, avalar su trabajo escrito y autorizar la réplica oral requerida para la obtención del título profesional, de acuerdo al Reglamento de Opciones de Titulación vigente.

PRESIDENTE: DR. ANDRÉS TEJERO ANDRADE
VOCAL: M.C. GERARDO CIFUENTES NAVA
SECRETARIO: DR. RENÉ CHÁVEZ SEGURA
1ER. SUPLENTE: M.C. JUAN E. HERNÁNDEZ QUINTERO
2DO. SUPLENTE: ING. ALEJANDRO GARCÍA SERRANO

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de Administración Escolar, en el sentido que se imprima en lugar visible de cada ejemplar del trabajo escrito, el título de este.

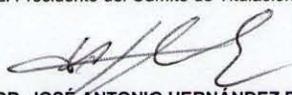
Asimismo, le recuerdo que para optar por el título profesional, es necesario haber acreditado el 100% de los créditos establecidos en el plan de estudios, haber realizado el Servicio Social de acuerdo con la Legislación Universitaria y haber aprobado el examen de comprensión de lectura de un idioma extranjero, en términos de lo dispuesto por el Consejo Técnico.

Atentamente

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

CD. Universitaria, D. F. a 19 de Febrero de 2013.

El Presidente del Comité de Titulación de Ingeniería Geofísica


DR. JOSÉ ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIÚ

ccp Coordinador de la Carrera
ccp Interesado

Agradecimientos

A Dios

Por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos.

A mis padres Dolores y Gustavo

Por haberme apoyado en todo momento por sus consejos, sus valores, por la motivación y por su amor que me han permitido ser la persona que soy.

A mis maestros

Por su apoyo y motivación para la culminación de mis estudios profesionales y para la elaboración de esta tesis.

A mis familiares

A mi hermanita Valeria por apoyarme en todo momento, por sus consejos y por ser mi mejor amiga; a toda mi familia por su apoyo siempre.

A mi pareja

Por su apoyo incondicional por su amor y sobre todo por su paciencia y por ayudarme siempre en momentos difíciles.

A mis amigos

A mi grupo de amigos que entramos juntos en la carrera y siempre nos apoyamos, además de compartir buenos momentos; a mis compañeros wushunianos por su apoyo.

INDICE

RESUMEN	ii
ABSTRACT	iii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. ZONA ARQUEOLÓGICA DEL PAHÑÚ.....	3
2.1 Localización	3
2.2 Geología del Sitio	4
2.3 Construcciones Prehispánicas	9
2.4 Cultura Xajay.	11
3. TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA	
3.1 Ecuaciones de Maxwell.....	
3.2 Ley de Ohm.....	
3.3 Fuente puntual en un semiespacio homogéneo.	
3.4 Resistividad aparente y Factor Geométrico	
3.5 Función de Sensibilidad	
3.5.1 Profundidad de Investigación.	
3.6 Técnica de TRE 2D	14
3.7. Principios de la Inversión	25
3.7.1. Problema directo.	25
3.7.2. Problema inverso.....	26
4. METODOLOGIA.....	29
4.1. Adquisición de datos.	29
4.2 Trabajo de campo.	33
4.3 Secuencias de Medición.....	35
5. RESULTADOS	42
5.1 Procesamiento de Datos.....	42
5.2 Análisis de Resultados	43
6. CONCLUSIONES	53
Referencias.....	55

RESUMEN

En el presente trabajo se caracteriza una estructura que se encuentra cubierta por suelo y escasa vegetación aplicando la técnica de Tomografía de Resistividad Eléctrica 3D (TRE 3D). Se considera que este cuerpo pudiera ser una pequeña pirámide; localizado en el sitio arqueológico del Pahñú en el municipio de Tecozautla en el Estado de Hidalgo. Estos vestigios arqueológicos pertenecen a la cultura Otomí. El estudio se llevó a cabo realizando una malla, con ocho líneas en total, sobre un montículo localizado en la parte sur del sitio. Se utilizaron arreglos no convencionales como Mínimo Acoplamiento y Ecuatorial Paralelo así como también el arreglo Wenner-Schlumberger.

Anteriormente ya se habían realizado estudios geofísicos del sitio, aplicando esta misma técnica y obteniendo resultados satisfactorios, por lo que este trabajo complementará la información que se tiene sobre el lugar.

Gracias a estos trabajos se busca que los rescates arqueológicos se realicen sin dañar estructuras de importancia histórica, pues estos obtienen imágenes del subsuelo dando una ubicación muy aproximada de los cuerpos que se encuentran enterrados. Con la ayuda de estas imágenes, los arqueólogos podrían determinar las zonas a explorar y si es factible realizar una excavación y en dónde. La zona arqueológica se inauguro el 20 de noviembre del 2012.

ABSTRACT

In this paper we present the characterization of a structure covered by soil and sparse vegetation applying the technique of 3D Electrical Resistivity Tomography (ERT 3D). The studied structure could be a small pyramid, located in the archaeological site in the municipality of Pahnú Tecozautla in the state of Hidalgo, México. These archaeological remains belong to the Otomi culture. The study was carried out by performing a grid, with eight lines in total, on a mound located in the southern part of the site. Unconventional arrangements were used such as low coupling and Parallel Equatorial and Wenner-Schlumberger as well.

Earlier studies had already been carried out in this site, using the same technique with satisfactory results, becoming an improvement to the information related to this culture.

Thanks to this work is intended that the bailouts made without damaging archaeological structures of historical significance, as these subsurface imaged giving a very approximate location of the bodies are buried. With the help of these images, archaeologists could determine the areas to explore and it is feasible to conduct an excavation and where.

1. INTRODUCCIÓN.

Los métodos geofísicos son una herramienta muy útil en diversas ramas de la ingeniería, en proyectos ambientales, en geotecnia e incluso en el área de arqueología. Los métodos de exploración arqueológica incluyen métodos como la excavación, que pueden ser costosos y perjudiciales para los vestigios arqueológicos, por lo que es necesario utilizar métodos no invasivos y más eficientes que permitan encontrar estas estructuras enterradas sin necesidad de dañarlas, estableciendo la profundidad en la que se encuentran, su tamaño y su extensión. Sin embargo, el subsuelo no es homogéneo y cada estructura tiene ciertas características que la definen y que permiten identificarla, por lo que es necesario elegir el método más adecuado dependiendo de lo que se busca y se pretende encontrar, así como de sus propiedades físicas.

Algunos métodos geofísicos utilizados actualmente en arqueología son: tomografía de resistividad eléctrica, Radar de Penetración Terrestre (GPR, por sus siglas en inglés), métodos magnéticos e inclusive refracción sísmica. La utilización de cada uno de ellos dependerá de la accesibilidad al sitio de estudio así como de la geología del lugar, y de los cuerpos que se quieran caracterizar. De tal manera que se pueda elegir el que mejor responda a las necesidades del objetivo de estudio.

Los métodos resistivos, específicamente, la Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) es una herramienta que nos permite obtener imágenes del subsuelo con mediciones hechas desde la superficie, permitiendo observar cuerpos de interés histórico sin necesidad de dañarlos o alterarlos.

El sitio de interés, de este trabajo, es la "Zona Arqueológica del Pahñú" localizada en el municipio de Tecozautla en el Estado de Hidalgo cuenta con varios monumentos arqueológicos de los cuales algunos se encuentran, todavía, cubiertos por suelo y vegetación. Este centro ceremonial cuenta con una Plaza principal en la que destacan la pirámide principal y el 'Tecpan', también suelen observarse dos montículos localizados, uno en la parte poniente del sitio y otro en la parte sur. Esta zona ha sido explorada recientemente, realizándose estudios de TRE 3D en la pirámide principal y en el edificio situado en la parte oriente de la explanada conocido como 'Tecpan', utilizando arreglos no

convencionales como el arreglo ecuatorial y el arreglo en 'L'; obteniendo muy buenos resultados. Por lo tanto, como se menciono anteriormente, hay algunas estructuras que aún se encuentran enterradas, como lo es la pequeña colina localizada en la parte Sur del sitio arqueológico, la cual es el objetivo de interés.

Este trabajo busca producir imágenes que revelen estructuras de interés que sean indicadores para un rescate arqueológico adecuado, mediante la técnica TRE 3D. Por el acceso al sitio de estudio, este trabajo, se pudo llevar a cabo implementado una rejilla sobre el montículo, la cual constó de 4 líneas con dirección Norte-Sur y cuatro líneas con dirección Este-Oeste. Los arreglos utilizados fueron Wenner-Schlumberger, Ecuatorial Paralelo y Mínimo Acoplamiento. Utilizando un espacio intereléctrodico pequeño de 3 m y un interlineado optimo de 9 m (que no es mayor de 4 veces la separación mínima de los electrodos, para obtener una resolución aceptable como lo menciona Aizebeokhai, 2010) , pues aunque esto signifique una exploración no muy profunda nos permite observar con más detalle los cuerpos localizados en la parte superior del subsuelo; generalmente en los sitios arqueológicos, las estructuras de interés se encuentran en la parte somera del área de estudio.

Gracias a los trabajos llevados a cabo entre geofísicos y arqueólogos es posible rescatar sitios ceremoniales prehispánicos para poder estudiar los antiguos asentamientos humanos y con ello comprender el origen y desarrollo de las culturas de nuestro país.

2. ZONA ARQUEOLÓGICA DEL PAHÑÚ.

2.1 Localización

El sitio arqueológico del Pahñú se encuentra en el municipio de Tecozautla, Estado de Hidalgo, junto a la comunidad de La Mesilla, perteneciente al Valle del Mezquital; entre los paralelos 20°30'22'' y 20°30'15'' de latitud Norte y los meridianos 99°41'08'' y 99°41'02'' de longitud Oeste.

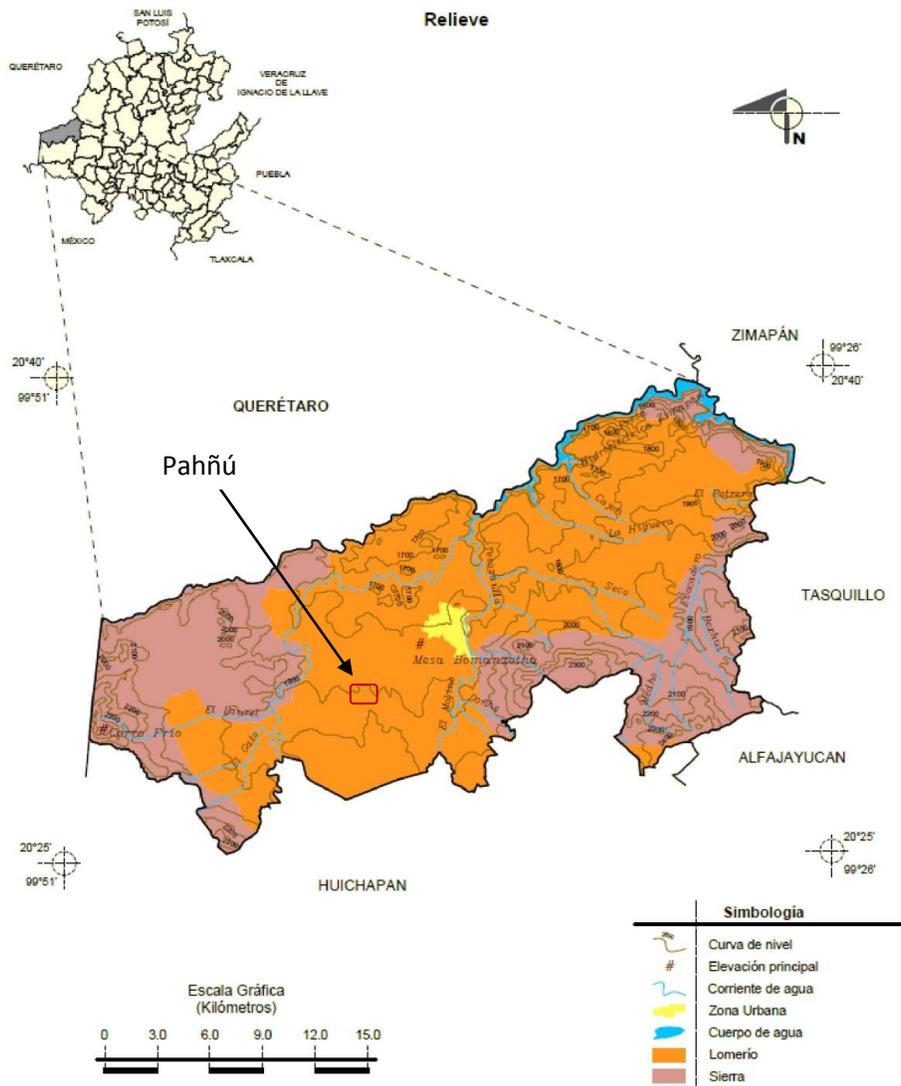


Fig.2.1.1 Ubicación geográfica del sitio arqueológico del Pahñú(INEGI, 2009.)

Los asentamientos ceremoniales se ubican sobre una meseta a 1893 msnm, mientras que las unidades habitacionales se ubican en la pendiente baja y la planicie (López Aguilar, 2007).

El centro ceremonial consta de tres conjuntos, el conjunto Principal que comprende el templo Principal, el Tecpan y la Explanada; el conjunto Sur en el cual se localiza un basamento piramidal y una pequeña plataforma. Por último el conjunto Oeste donde se encuentra un basamento piramidal y una plataforma cuadrangular baja.

2.2 Geología del Sitio

El sitio del Pahñú se encuentra, donde afloran las provincias fisiográficas de la Sierra Madre Oriental, el Eje Neovolcánico y la Llanura Costera del Golfo del Norte. Existen diferentes procesos geológicos asociados al vulcanismo y al relleno de cuencas oceánicas.

La zona de interés se encuentra específicamente sobre el Eje Neovolcánico, situado al sur del estado. Esta provincia fisiográfica está constituida por rocas volcánicas terciarias y cuaternarias (brechas, tobas y derrames riolíticos, intermedios y basálticos), de composición y textura variada. La morfología presenta diversos tipos de estructuras volcánicas como son: conos cineríticos, volcanes compuestos, volcanes de escudo y calderas, además de flujos piroclásticos y derrames lávicos basálticos con forma de mesetas y planicies sobre las que se han originado algunos lagos. Las zonas húmedas donde afloran derrames de rocas basálticas han sido alteradas por el intemperismo físico-químico desarrollando suelos de color rojizo, que indica una fuerte oxidación de los minerales férricos.

El relieve original está relacionado con una intensa actividad volcánica. La evolución de los fenómenos volcánicos propicio condiciones para la formación de cuencas endorreicas que posteriormente fueron rellenadas con aportes de materiales volcanoclásticos.

El Estado de Hidalgo cuenta con 10 regiones geográficas las cuales son: La huasteca, La Sierra Alta, La Sierra Gorda, La Sierra Baja, La Sierra de Tenango, Valle de Tulancingo, Comarca Minera, Altiplano, Cuenca de México y el Valle del Mezquital.

El sitio arqueológico del Pahñú se encuentra en la zona del Valle del Mezquital. Lugar compuesto geológicamente por una formación que contiene Toba riolítica y conglomerado polimíctico, considerado como un depósito extra caldera, constituido por depósitos volcanoclásticos de composición riolítica, poco consolidados; se caracteriza por contener lentes y horizontes de conglomerado polimíctico con clastos mal consolidados y semi-consolidados en una matriz tobasa; su espesor varía desde pocos metros hasta los 150 m con una edad, reportada por dataciones isotópicas del orden de 4.68 a 3.5 Ma lo que la sitúa en el Plioceno. Esta formación está asociada a la generación de la caldera de Huichapan, la cual se formó debido a los eventos explosivos del eje transversal mexicano.

En la actualidad se encuentra poca información debido a que los depósitos de esta zona pocas veces pueden ser aprovechados en otro tipo de explotación que no sea material para la construcción. La composición de estas zonas de caldera es riolítica, sin embargo también se puede observar, únicamente en algunas pequeñas zonas una composición intermedia, andesita.

La actividad volcánica que edificó la caldera de Huichapan se debe a cuatro episodios. El primer evento se atribuye a la formación de la caldera, produciendo la subsidencia progresiva de la caldera. Este evento emplazó a la Toba Donguinyó. Esta toba está formada por el apilamiento de derrames cineríticos, de color rojizo, permitiendo clasificarlos como ignimbritas con textura vítreo porfídica. En algunos casos estos derrames contienen fragmentos y bloques de roca andesítica, que le dan aspecto de brecha. La composición es de plagioclasa (andesita), piroxenos (hiperstena y augita), escasos minerales opacos (magnetita) y fragmentos de roca de composición basáltica, vítrea, granítica y pómez en una matriz vítrea de color pardo. El segundo evento expulsó la secuencia “Toba San Francisco” constituida por una sucesión de al menos siete derrames cineríticos, que forman cuerpos tabulares de espesor variable (3 a 5 m). En general son de color pardo rojizo, rara vez presentan fragmentos de pómez del mismo color. Su mineralogía consiste en fragmentos de plagioclasa (andesita) y clinopiroxeno (augita) que constituyen un 5% del volumen, fragmentos líticos en un 3% en una matriz vítrea que forma el volumen restante. La dispersión de esas secuencias respecto al borde de la caldera fue mayor hacia la porción norte y noroeste. El tercer episodio se inicia con la denudación de la estructura y la

formación de un lago en la parte interna de la caldera, creando un ambiente de depósito sedimentario derivado de la destrucción de la caldera. El cuarto episodio se caracterizó por la edificación de pequeños domos.

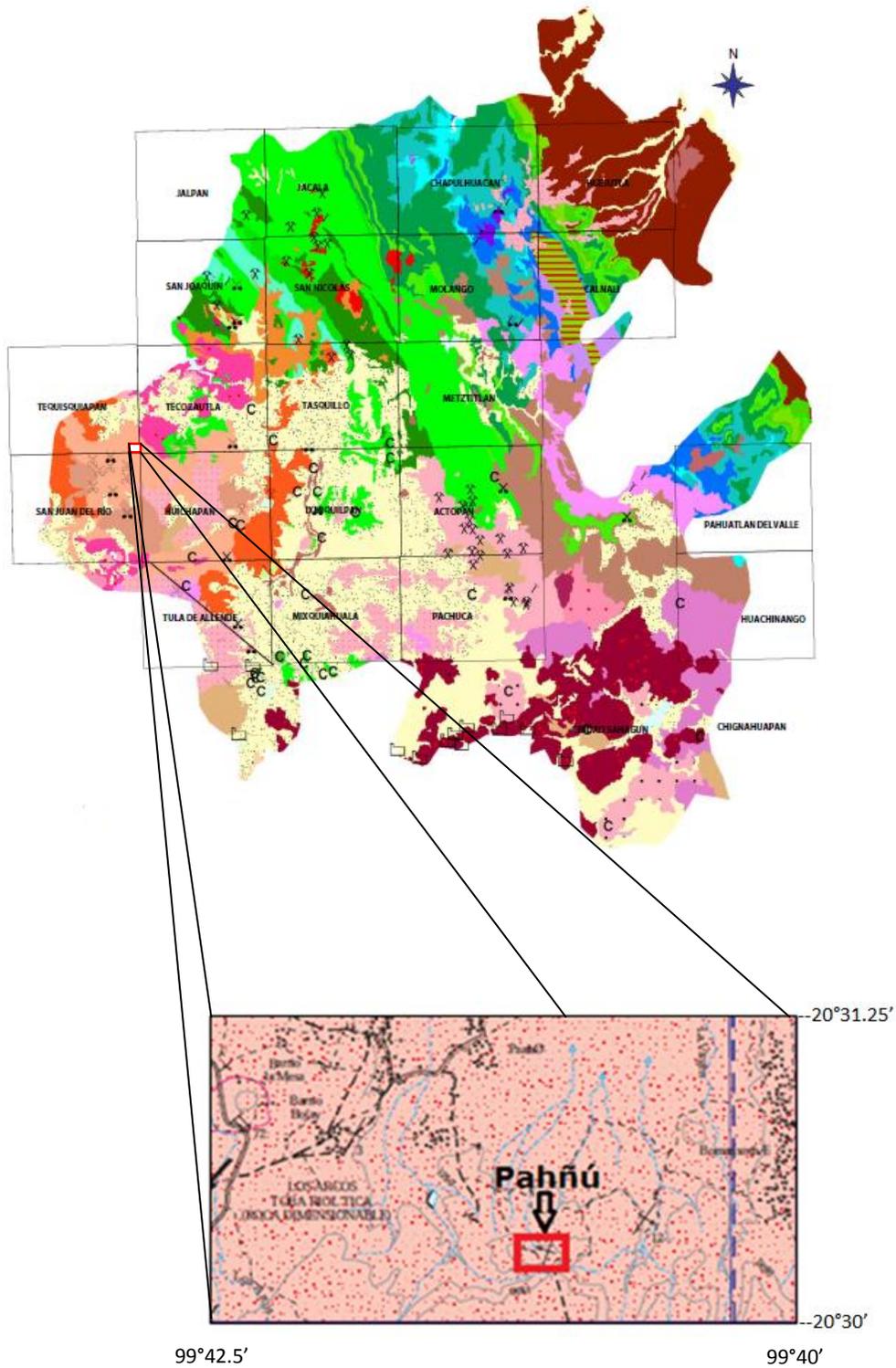


Fig.2.2.1 Geología del estado de Hidalgo y del sitio arqueológico del Pahñú (Modificado de Servicio Geológico Mexicano, 2007)

Dentro de la geología estructural de la zona, encontramos dos fallas principales al norte del sitio de estudio las cuales son: Falla La Mesa y la Falla Las Rosas. La primera de ellas recorre alrededor de 9 Km desde el noreste de Pathé al sur del acantilado del Pathé donde los depósitos clásticos no consolidados del valle San Antonio-Tecozautla la cubren. Tiene un rumbo, aproximadamente, N-S y un echado de 80° al Oeste. La falla las Rosas tiene un rumbo N15°W, con un echado de 80° al Este. Se extiende un poco más de 7 Km al norte de la colina San Antonio. Esta falla está marcada por un escarpe prominente entre la lava andesítica y la unidad de toba riolíticas.

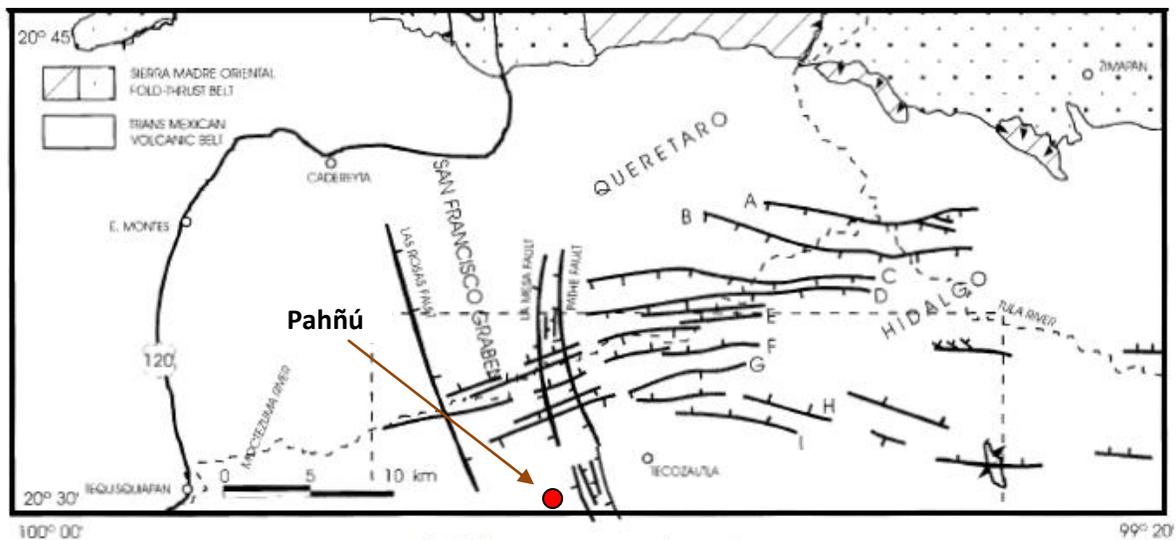


Fig2.2.2 Fallas en el municipio de Tecozautla. (Carrillo Martínez, 1998)

Al norte y al oriente del Pahñú se encuentran varias fallas que podrían afectar, con el tiempo, a las construcciones presentes en el lugar, pues hay que considerar que son construcciones muy antiguas y que han tenido un gran deterioro físico. En trabajos previos se observó que el material de relleno situado en la parte norte de la pirámide principal se estaba deslizando, afectando a toda la estructura, lo que, tal vez, podría asociarse a los desplazamientos paulatinos de estas fallas.

2.3 Construcciones Prehispánicas

La arquitectura prehispánica puede ser estudiada por las condiciones específicas de los materiales que las constituyen, enfocándose en la geología, la mecánica estructural y la tecnología de sus construcciones.

Las provincias geológicas del país, por sus características litológicas y sus formas proveen de materia prima a las culturas prehispánicas para la edificación de sus construcciones, así como también condicionan la geometría de las estructuras arqueológicas.

Además de la geología, también algunas condiciones ambientales son de importancia en las construcciones prehispánicas, como la abundancia o escasez de agua, el relieve del terreno, las posibilidades de contar con una buena infraestructura, las características de los suelos, los niveles de precipitación, pues estos son recursos esenciales para una buena edificación.

La primera etapa de edificación es sobre qué sitio se debe ocupar para la construcción, así como los edificios que tendrá, para esto se debe de tomar en cuenta la accesibilidad o proximidad a los recursos necesarios para el sostenimiento de la población. Posteriormente se debe de convertir el suelo natural en suelo útil, como es la liberación de claros en el bosque, depósitos y rellenos, contenciones, compactación, nivelación, sistemas y vías de acceso, drenajes entre otras.

Una vez dadas las condiciones de infraestructura es necesario establecer la ubicación del objeto arquitectónico; tomando en cuenta el paisaje, los fenómenos naturales, equinoccios, solsticios y la bóveda celeste.

La base de las construcciones es la acumulación de material (arena, grava o roca) ya sea de manera natural o artificialmente depositada que conforma un plano escarpado sobre cuya superficie el material no se desliza. Si los materiales se encuentran consolidados o compactados, el montículo resultante es de gran solidez e indeformable. Para evitar deterioros se aplicó un principio de confinamiento del material a través de corazas de piedra, colocadas de tal manera que pudieran contener el material que conforma el basamento; estas corazas permitían, al montículo, elevar ángulos en taludes más pronunciados, la demanda de las corazas dependía de la solidez del núcleo del montículo.

Posteriormente sigue el régimen de contenciones, con lo que se garantizaba la resistencia de los edificios.

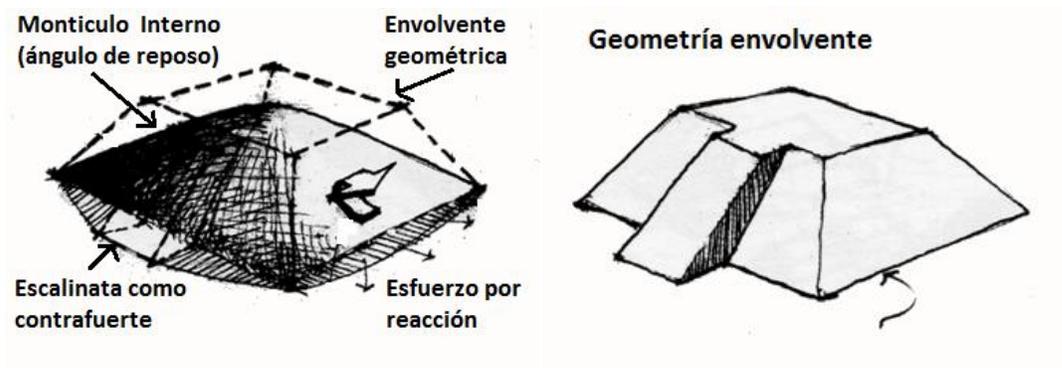


Fig.2.3.1 Imagen que muestra el basamento para las construcciones prehispánicas(Villalobos, 2010).

Las primeras mamposterías eran una combinación de piedra y barro; mayor proporción de barro para los núcleos y mayor cantidad de piedra para las corazas. La composición heterogénea de los núcleos era un factor de riesgo en la estabilidad debido a su alta permeabilidad ante la presencia de humedad excesiva. En ocasiones fue necesario hacer secuencias de corazas paralelas en el interior del núcleo, o construir muros internos para garantizar mayor estabilidad. A partir de estos núcleos se desarrolló en forma radial, el resto de los componentes de la estructura. Incluso poner un edificio sobre otro previo garantizaba la permanencia de una estructura más sólida.

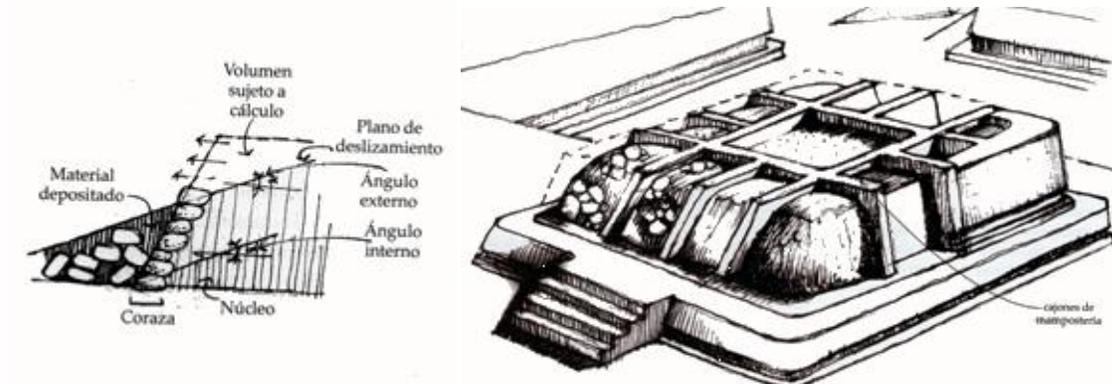


Fig.2.3.2 Construcciones Prehispánicas(Villalobos, 2010).

2.4 Cultura Xajay.

Un rasgo distintivo de los sitios Xajay es la selección de mesas (en su mayoría orientadas al norte) para la ubicación de sus centros ceremoniales. El lugar donde aflora la roca madre fue nivelado para crear espacios llanos y facilitar la labor constructiva. Debido al paisaje escarpado y los desniveles entre los límites de las mesas y las cañadas, se consideró a estos sitios como defensivos, actualmente se sabe que terrazas, plataformas y muros perimetrales estuvieron destinados a nivelar el terreno o a contener deslaves de frentes rocosos.



Fig.2.4.1 Vista hacia el Tecpan desde la pirámide principal, donde se logra ver el relieve escarpado.

Los asentamientos Xajay utilizaban dos sistemas de construcción ocupando como materia prima **toba**, uno consistía en la sobreposición de bloques de este material y otro en colocar lajas de toba en posición vertical para retener el material de relleno hacia el interior de la estructura. Las estructuras mayores a 6 m de altura, constan de un núcleo compuesto por muros que forman cajones, los cuales son rellenos con bloques de toba y arcilla.

Los asentamientos Xajay de la zona del Valle del Mezquital, Pahñú y Zethé tienen una ocupación inicial fechada entre el año 512 a 600 dC. **Por paleomagnetismo**. Aunque, las evidencias arquitectónicas también suelen ubicarse entre los años 327 a 443 dC. Gracias a estudios realizados mediante C14.

Pahñú era un centro Cívico-Ceremonial con una pequeña plaza, un palacio en la zona oriente y un templo principal en la zona norte sobre el borde de la mesa del sitio.

El edificio principal del Pahñú cuenta con una arquitectura que no se presenta en ningún otro sitio de Mesoamérica. Debido a su ubicación, el sol sale perpendicular a la fachada los días 13 y 14 de abril. Este templo se encuentra delimitado por muros de adobe mostrando un talud al exterior.

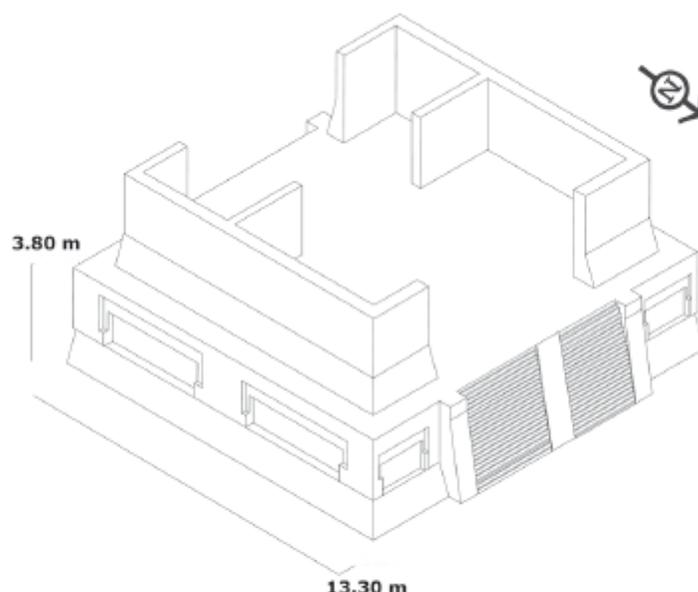


Fig.2.4.2 Imagen del edificio principal (López y Fournier, 2009)

En este asentamiento se observa que hubo dos etapas en la construcción principal; probablemente hubo una etapa en la que las ofrendas del sitio fueron saqueadas por la misma población del lugar y posteriormente se volvieron a ubicar, en el mismo sitio, ofrendas de renovación. Esto trajo consigo la construcción de nuevas pirámides sobre las construcciones previas con la misma orientación y posiblemente se hayan construido nuevas estructuras.

3. TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

La finalidad de los métodos resistivos es detectar y localizar cuerpos y estructuras basándose en su contraste resistivo, a partir de mediciones realizadas en superficie. Este método emplea una fuente artificial para poder inyectar corriente. La corriente eléctrica empleada por este método es corriente continua o de baja frecuencia, de tal manera que los efectos magnéticos como son las corrientes de desplazamiento y los efectos de inducción son insignificantes.

3.1 Ecuaciones de Maxwell

Este método emplea la siguiente ecuación:

Ley de Faraday:

$$\nabla \times E = 0 \dots \dots (2)$$

Donde E es el campo eléctrico en unidades de $V(\text{volt})/m$ (*metro*) De las ecuaciones anteriores y de acuerdo al teorema del Helmholtz el campo eléctrico está dado como el gradiente de un potencial escalar:

$$E = -\nabla\phi \dots \dots (3)$$

3.2 Ley de Ohm.

La ley de Ohm es fundamental para la base teórica de los estudios de resistividad, pues estos métodos estudian el comportamiento de una corriente eléctrica mientras esta atraviesa el subsuelo. La forma vectorial de la ley de Ohm está dada por:

$$\vec{J} = \sigma\vec{E} \dots \dots (4)$$

Donde σ es la conductividad del medio dada en unidades de Siemens sobre metro y J es la densidad de corriente. Sustituyendo la ecuación (3) en la ecuación (4) tenemos:

$$J = -\sigma \nabla \varphi \dots \dots (5)$$

Lo que nos dice que la densidad de corriente estará dada en función del potencial y de la conductividad del medio.

La ecuación de continuidad menciona que si la densidad de corriente entra en una superficie cerrada, se tendrá como resultado una variación en la densidad de carga dentro de esa superficie:

$$\nabla \cdot J = - \frac{\partial q}{\partial t} \dots \dots (6)$$

El signo negativo indica que el flujo positivo es el flujo saliente lo que se refiere a una disminución de la carga. Considerando que la variación de la carga con el tiempo es la intensidad de corriente eléctrica se tiene:

$$\nabla \cdot J = - I \delta(\vec{r}) \dots \dots (7)$$

Sustituyendo la ecuación (4) en la (10) obtenemos:

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \varphi) = -I \delta(\vec{r}) \dots \dots (8)$$

Desarrollando términos y por identidades vectoriales tenemos:

$$\nabla \sigma \cdot \nabla \varphi + \sigma \nabla^2 \varphi = -I \delta(\vec{r}) \dots \dots (9)$$

3.3 Fuente puntual en un semiespacio.

Los métodos de resistividad emplean fuentes puntuales localizadas en superficie, conocidos como electrodos, mediante los cuales se inyecta una corriente al subsuelo que fluye radialmente hacia el subsuelo. Para una tierra homogénea la distribución de la corriente será uniforme sobre una semiesfera localizada debajo de la superficie y cuyo origen será el electrodo.

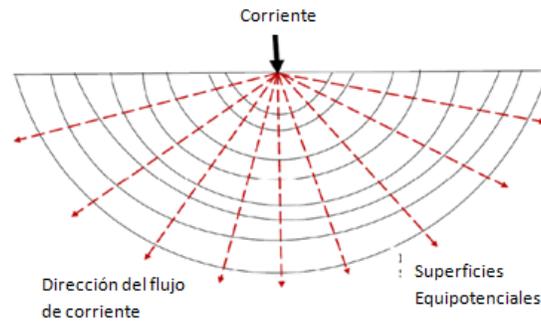


Fig.3.3.1 Distribución del flujo de corriente en un solo electrodo (Modificado de Aizebeokhai, 2010)

Conociendo que el campo eléctrico esta dado por un potencial escalar y tomando en cuenta que el vector densidad de corriente (J) está en función de la conductividad del medio y del campo eléctrico, se puede observar que el potencial medido será:

$$\Delta\varphi = - \int E(\vec{r}) \cdot d\vec{r} \dots \dots (10)$$

De la ecuación (4) despejamos \vec{E} y tenemos:

$$\Delta\varphi = - \int \rho(\vec{r}) \vec{J}(\vec{r}) \cdot d\vec{r} \dots \dots (11)$$

Considerado para una tierra homogénea, el término ρ es constante por lo que la ecuación anterior queda de la siguiente manera:

$$\Delta\varphi = -\rho \int \vec{J}(\vec{r}) \cdot d\vec{r} \dots \dots (12)$$

La corriente fluye de manera radial desde la fuente y su distribución es uniforme sobre la superficie hemisférica, el potencial para una medio homogéneo en cualquier punto a una distancia r esta dado por:

$$\varphi(r) = \frac{I\rho}{2\pi r} \dots \dots (13)$$

En la práctica comúnmente se tienen dos electrodos de corriente, uno que introduce la corriente en el subsuelo (A) y otro donde ésta regresa después de haberlo recorrido (B).

La distribución del potencial debido a la pareja de electrodos es simétrica sobre la vertical en el punto medio entre ambos electrodos. Quedando el potencial de la siguiente manera:

$$\varphi(r) = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) \dots \dots (14)$$

Donde r_A y r_B son las distancias de un punto arbitrario en el medio a los electrodos de corriente.

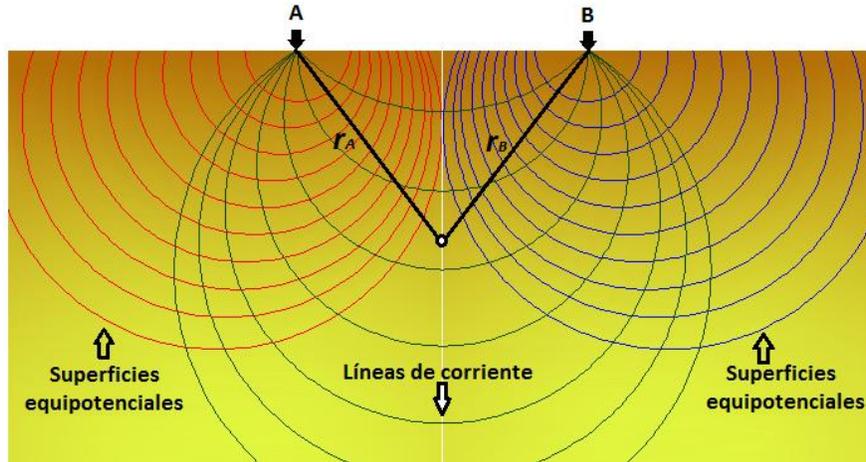


Fig.3.3.2 Distribución de la corriente en el subsuelo para dos electrodos

Generalmente los estudios de resistividad tienen arreglos que se llevan a cabo mediante cuatro electrodos, dos donde se inyecta corriente (A y B) y dos para medir la diferencia de potencial (M y N). Para este caso el potencial está dado por:

$$\varphi(r) = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}} \right) \dots \dots (15)$$

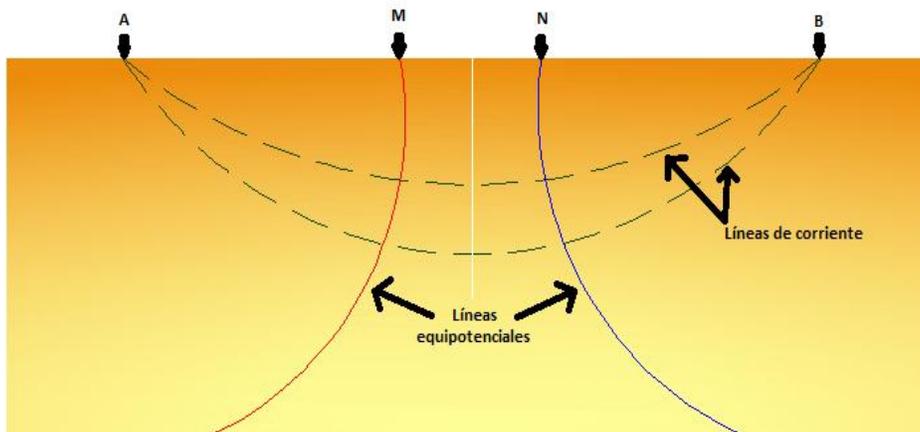


Fig.3.3.3 Configuración convencional con cuatro electrodos.

3.4 Resistividad aparente y Factor Geométrico

De la ecuación (15) se puede observar que la diferencia del potencial medido en un punto arbitrario va a depender de la resistividad del medio, la corriente y la distancia de este punto a cada uno de los electrodos, si despejamos la resistividad obtenemos:

$$\rho_a = K \frac{\Delta\phi}{I} \dots \dots (16)$$

Donde ρ_a es la resistividad aparente, $\Delta\phi$ es la diferencia del potencial medido, I es la corriente y K es el factor geométrico. Si la medición se realiza en un medio homogéneo la resistividad aparente será igual a la verdadera. En la realidad el subsuelo es heterogéneo por lo que la resistividad aparente no será la resistividad verdadera y tampoco puede considerarse como un promedio. El factor geométrico K representa el efecto de la distancia entre los electrodos, el cual va a depender del arreglo utilizado, representado de la siguiente manera:

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}}\right)} \dots \dots (17)$$

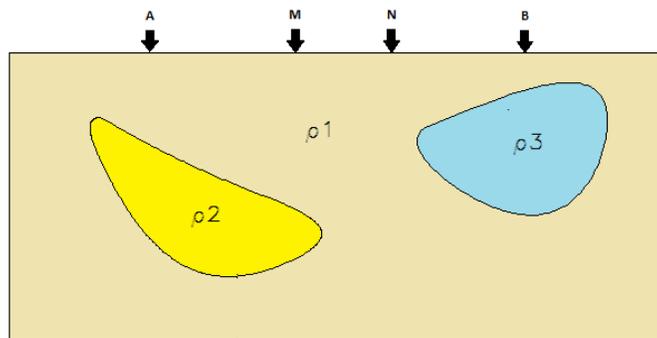


Fig.3.4.1 Ejemplo de una tierra no homogénea

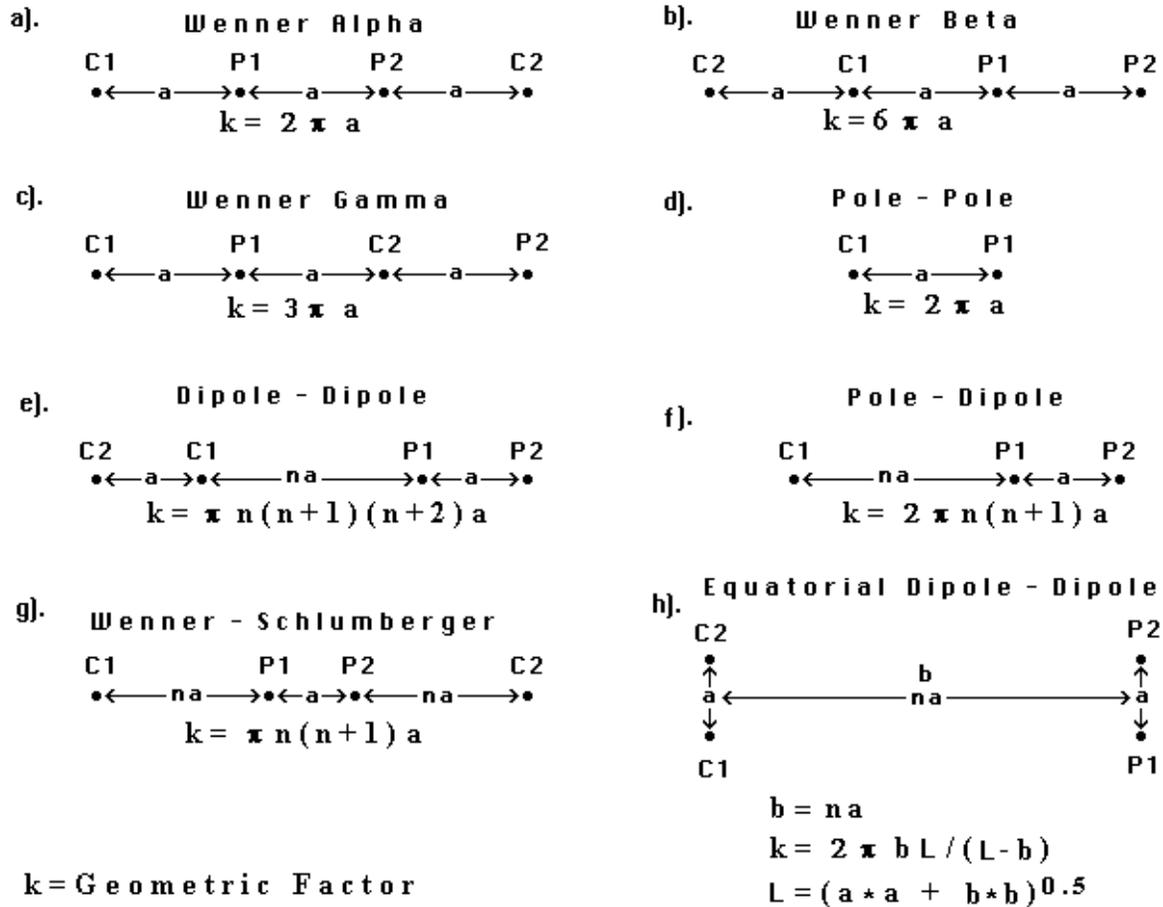


Fig.3.4.2 Factor geométrico para los arreglos más comunes (Loke, 2004).

3.5 Función de Sensibilidad

La función de sensibilidad, básicamente, nos dice el grado en el cual un cambio en la resistividad en una sección del subsuelo influirá en el potencial medido por el arreglo. A valores altos de la función de sensibilidad será mayor la influencia de la región del subsuelo en la medición (Loke, 2010). La función de sensibilidad se basa en las derivadas de Fréchet, las cuales dependen de la conductividad del medio y de la geometría del arreglo.

3.5.1 Profundidad de Investigación.

El concepto de “profundidad de investigación” en estudios de resistividad fue introducido por Conrad y Marcel Schlumberger (1932) y ha sido discutido por varios autores para diferentes arreglos electródicos (Barker, 1989).

La profundidad de investigación depende de la posición de los electrodos de corriente y de los electrodos de potencial y no se relaciona directamente con la profundidad de la penetración de la corriente (la cual está determinada por la distancia entre los electrodos de corriente) (Barker, 1989).

Una aproximación de la profundidad de investigación de un arreglo se obtiene mediante la función de sensibilidad. En los estudios de sondeos eléctricos, se asume que el suelo consta de capas horizontales y los límites de cada capa en las coordenadas ‘x’ y ‘y’ se extienden al infinito. Quedando la función de sensibilidad de la siguiente manera:

$$F_{1D} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{z}{(a^2 + 4z^2)^{1.5}}$$

Esta función es conocida como la profundidad de investigación y se incrementa hasta un valor máximo a la profundidad de $0.35a$ (donde a es el espaciamiento entre el electrodo de potencial y el electrodo de corriente) y comienza a decrecer asintóticamente a cero. Algunos autores usan el punto máximo como la profundidad del arreglo. No obstante, Edwards (1977) y Barker (1991) muestran otra estimación la cual es la “profundidad media de investigación”, indicando que la tierra por encima de este nivel ejerce la misma influencia en la medición del potencial que la zona que se encuentra por debajo. Esta profundidad no depende de la resistividad aparente porque el modelo considerado es una tierra homogénea.

En la siguiente tabla se muestran algunas profundidades medias de investigación para diferentes arreglos con diferentes niveles de profundidad.

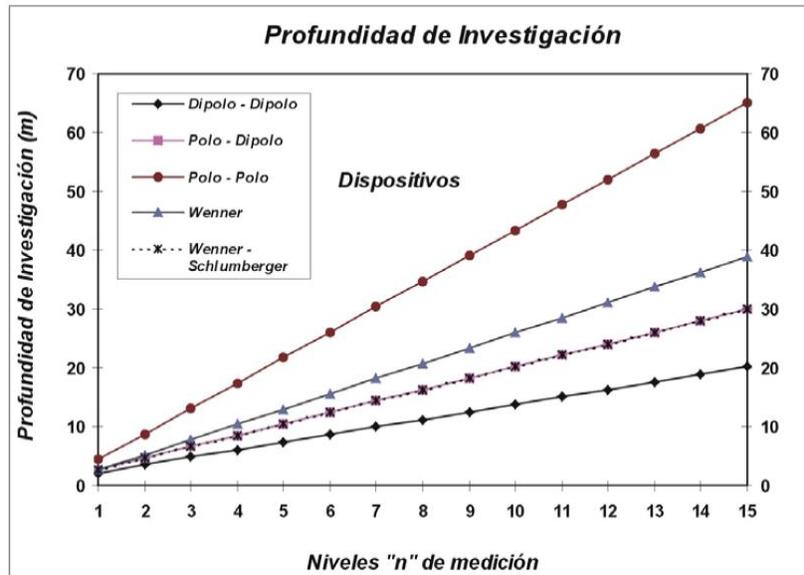


Fig.3.5.1 Profundidades medias de investigacion sobre un medio homogeneo de diferentes configuraciones electrodicas, para una distancia interelectródica de 5 m y distintos niveles de medición (Loke,2004).

3.6 Técnica de TRE 2D

La técnica de Tomografía de Resistividad Eléctrica consiste en obtener la distribución de la resistividad en el subsuelo mediante imágenes, en secciones en el caso 2D, o de un volumen, en el caso 3D.

La TRE 2D está integrada por las técnicas de Sondeo Eléctrico Vertical y Perfilaje Eléctrico permitiendo observar cambios en la resistividad del subsuelo tanto laterales como verticales. Este método emplea generalmente 4 electrodos, dos mediante los cuales se inyecta corriente y dos que permiten medir la diferencia potencial. Para efectuar este estudio es necesario marcar una línea que servirá de guía, en ella se deberá ubicar la posición de los electrodos. Sí se pretende medir como varía la resistividad del terreno a profundidad, el espaciamiento entre los electrodos se irá incrementando ‘a’ (Fig.3.4.2). Para

el caso en el cual se requiera determinar la variación lateral de la resistividad, únicamente se desplazaran de posición los 4 electrodos.

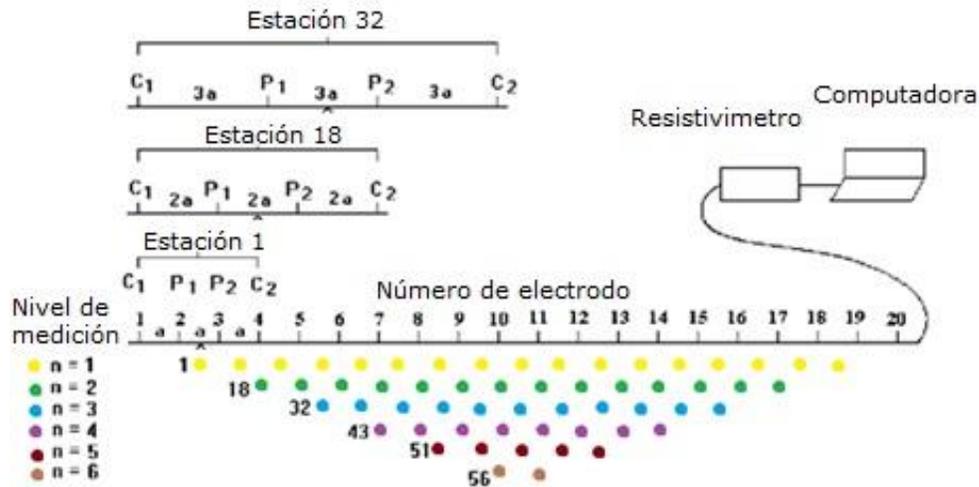


Fig.3.6.1 Secuencia de mediciones para un arreglo Wenner (Modificado de Loke, 2010)

En la imagen anterior se observa cómo se van realizando las mediciones empleando el arreglo Wenner. Se comienza con un espaciamiento electródico de ‘a’ y ocupando los electrodos 1, 2, 3 y 4, para la segunda medición se desplaza un lugar y ahora se utilizan los electrodos 2,3, 4 y 5 manteniendo la misma distancia ‘a’. Esto se repite hasta que se utilicen los electrodos 17, 18, 19 y 20. Después de haber recorrido todos los electrodos con el mismo espaciamiento, ahora este se incrementa a ‘2a’ y se vuelven a realizar las mediciones con los electrodos correspondientes; este proceso se repite hasta haber llegado al nivel de profundidad requerido.

Gracias a los equipos automáticos multicanales empleados en este método, no es necesario mover los electrodos en cada medición, sino que todos se colocan en una línea y se programa la secuencia de medición mediante cierto software, de tal manera, que después de que estén cargadas las secuencias en el equipo se puedan medir de manera automática.

Además de las imágenes 2D existen también las técnicas tridimensionales, las cuales dan una mejor aproximación y resultados más confiables en un subsuelo heterogéneo. Lo ideal es que las mediciones de los valores de resistividad aparente deben de constituir un conjunto de datos 3D medidos en todas las posibles direcciones (Aizebeokhai, 2010). Las técnicas tridimensionales han sido presentadas por Loke y Barker (1996), mediante el uso del arreglo Polo-Polo y Polo-Dipolo en una rejilla cuadrada o rectangular con un espaciamiento constante en ambas direcciones ‘x’ y ‘y’, en las cuales cada electrodo es usado como electrodo de corriente, mientras que el electrodo de potencial será cada uno de los restantes, de tal manera que se obtienen mediciones en diferentes direcciones. El procedimiento anterior suele ser costoso e implica mucho tiempo; por lo que otra forma de medir desarrollada por Loke y Barker (1996) es mediante el método Cross-Diagonal, en el cual las mediciones son realizadas a lo largo del eje ‘x’ y del eje ‘y’ y en líneas a 45° que pasan a través del electrodo de corriente. Este método sigue siendo poco práctico debido a los arreglos empleados ya que el arreglo polo-polo es susceptible al ruido telúrico y el arreglo polo-dipolo es asimétrico lo que implica realizar más mediciones. Un diseño más flexible es realizar perfiles 2D sobre líneas paralelas y líneas ortogonales, permitiendo obtener modelos 3D mediante la interpolación de los datos obtenidos. El espaciamiento entre líneas como entre electrodos debe de ser adecuado, para propósitos prácticos el interlineado no debe ser mayor a cuatro veces la separación de los electrodos (Aizebeokai, 2010).

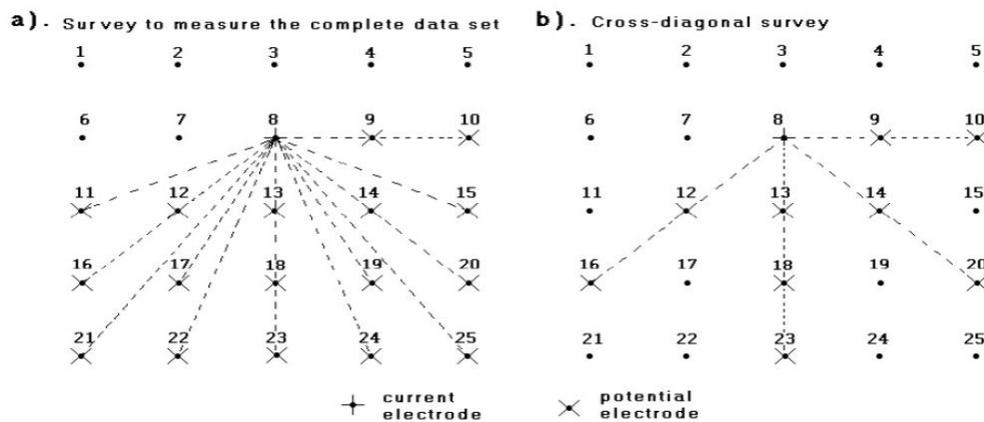


Fig.3.6.2 Posibles secuencias de medición para estudios 3D ; a) conjunto de datos completo, b) estudio cross-diagonal (Loke and Barker, 1996).

Otras técnicas que han sido desarrolladas para estudios tridimensionales son el arreglo en 'L' y el arreglo en esquina. El primero permite obtener imágenes del subsuelo en lugares donde no se pueden realizar líneas sobre la estructura como los son edificios y construcciones que se encuentran principalmente en zonas urbanas, si se realiza el estudio en forma de un cuadro realizando un total de cuatro 'L', se obtienen datos que se encuentran por debajo de la estructura, permitiendo obtener imágenes tridimensionales del subsuelo.

3.7. Principios de la Inversión

Los métodos resistivos de corriente directa obtienen información de estructuras conductoras en el subsuelo mediante la inyección de corriente eléctrica desde la superficie y midiendo el potencial eléctrico en diferentes posiciones. Las mediciones realizadas, no proveen de la información requerida directamente, por lo que las técnicas de inversión han sido desarrolladas para reconstruir la distribución espacial de la conductividad (Günter, 2006).

3.7.1. Problema directo.

El problema directo consiste en hallar una expresión para obtener la diferencia de potencial entre cualquier par de puntos en el espacio en función de la distribución de resistividades del medio, de la configuración utilizada y de la corriente de entrada (Lascano,2000).

Debido a que no se puede despejar la solución exacta del problema directo se requiere la utilización de métodos numéricos para obtener una solución aproximada.

Con el problema directo se analiza si un modelo de resistividad aparente presenta una respuesta similar a la obtenida en campo. Los modelos del subsuelo pueden ser 1D, 2D o 3D, dependiendo de la dirección en que varía la resistividad, para el primer caso la resistividad varía con la profundidad; en el segundo caso cambia con la profundidad y en una dirección lateral y en el caso 3D se considera que la resistividad cambia con la profundidad y en ambas direcciones laterales.

Hay tres métodos principales para calcular los valores de resistividad aparente para un modelo específico. Ellos son: método analítico, método de elementos de contorno, métodos de diferencias finitas y elemento finito. Los métodos analíticos son, probablemente, los más exactos, pero se restringen a geometrías relativamente simples (esferas o cilindros). Los métodos de elementos de contorno son más flexibles, pero el número de regiones con diferentes valores de resistividad que permite, es de alguna manera limitado (usualmente menor a 10). En estudios ambientales e ingenieriles, el subsuelo tiene una distribución de resistividad arbitraria, por lo que los métodos de diferencias finitas y elemento finito son usualmente los únicos que permiten esta elección (Loke, 2004).

El método de diferencias finitas consiste en discretizar al subsuelo en bloques rectangulares, en el caso bidimensional ó en cubos de resistividad constante, utilizando una rejilla, determinando el potencial en cada nodo de esta. La técnica de elementos finitos discretiza el volumen del terreno en elementos de resistividad constante, es decir que estos no necesariamente tienen una forma cubica. Se obtienen los potenciales en los nodos de la rejilla, como en el método anterior.

3.7.2. Problema inverso.

Menke (1989) dice que el problema inverso es simplemente el conjunto de métodos usados para extraer información útil de nuestro entorno a partir de medidas físicas o datos.

En el problema inverso los valores de resistividad aparente que se obtuvieron en campo constituyen los datos y se requiere obtener la distribución de resistividades del subsuelo que generó esos valores (Lascano, 2000). Este problema requiere una solución iterativa, la cual no es única, pues se pueden obtener infinidad de modelos. La diferencia entre los valores medidos en campo y los que se predicen con el modelo calculado se le conoce como ajuste, el cual debe de ser del orden de los errores de medición. Hay diferentes métodos de inversión como son mínimos cuadrados, máxima entropía y redes neuronales.

Un método comúnmente usado es mínimos cuadrados porque nos permite incluir información del subsuelo como restricción en el modelo de inversión, el cual se basa en la siguiente ecuación:

$$(J'J + uI)d = J'g$$

Donde:

J: Matriz de derivadas parciales

$$J_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial q_j}$$

La cual muestra un cambio en la i-esima respuesta del modelo debido a un cambio en el j-esimo parámetro del modelo.

J': Matriz transpuesta de J

u: Factor de amortiguamiento

I: Matriz identidad

d: vector del modelo de perturbación (parámetros del modelo)

g=vector de discrepancia (Diferencia entre los datos observados y los valores de la respuesta del modelo).

El modelo de inversión divide al suelo en un pequeño número de prismas rectangulares e intenta determinar los valores de resistividad de los prismas, para minimizar la diferencia entre los valores de resistividad aparente observados y los valores calculados. Una medida de esta diferencia está dada por el error RMS (*root mean squared* por sus siglas en inglés), el cual es un promedio de los datos desajustados sobre todos los datos. No indica el porcentaje de puntos malos, ya que un solo dato erróneo puede producir un error muy grande.

4. METODOLOGIA

El diseño del trabajo de campo para estudios geoelectricos depende del objetivo de interés, la resolución de las imágenes que se quiera obtener, la profundidad de investigación, la geología, etc. En los estudios arqueológicos comúnmente el objetivo es somero por lo que no se requiere una gran profundidad de investigación, pues es necesario obtener imágenes de alta resolución, de tal manera que se puedan observar de manera detallada los cuerpos de interés.

4.1. Adquisición de datos.

Previo al estudio de campo se realizó la programación de los arreglos que serían utilizados de manera manual mediante una hoja de cálculo. Con la ayuda del software Electre Pro , se llevo a cabo la visualización de estos arreglos para observar la cantidad y la localización de los datos que serían medidos durante el trabajo de campo. Los arreglos electrónicos programados fueron Wenner-Schlumberger (W-S), Ecuatorial Paralelo (EQP) y Mínimo Acoplamiento (MA).

La adquisición de datos se llevo a cabo mediante el equipo SYSCAL-PRO SWITCH 48, de IRIS INSTRUMENTS, se emplearon estacas de cobre de aproximadamente 40 cm de longitud y sulfato de cobre, necesario para poder disminuir la resistencia de contacto.



Fig.4.1.1 Resistivimetro Syscal Pro Switch 48.

El trabajo de campo consto de dos fases de adquisición de datos llevadas a cabo durante diferentes etapas del proyecto.

Durante la primera fase del proyecto, en el sitio del Pahñú, se trabajó en la pirámide principal, obteniendo resultados favorables, por lo que gracias a la realización de este trabajo, se decidió extender el área de estudio. Se propuso estudiar el montículo localizado en la parte Sur del sitio arqueológico con el fin de encontrar algunas estructuras de interés. Tras realizar el estudio de Tomografía de Resistividad Eléctrica, en una pequeña área que cubría únicamente la parte central del montículo, se obtuvieron como resultado imágenes que revelaron cuerpos de importancia arqueológica. Gracias a estos resultados se decidió extender el estudio a un mayor volumen del terreno, de tal manera que se pudieran delimitar más claramente estos cuerpos.



Fig.4.1.2 Adquisición de datos en campo.

Sitio Arqueológico Del Pahñú

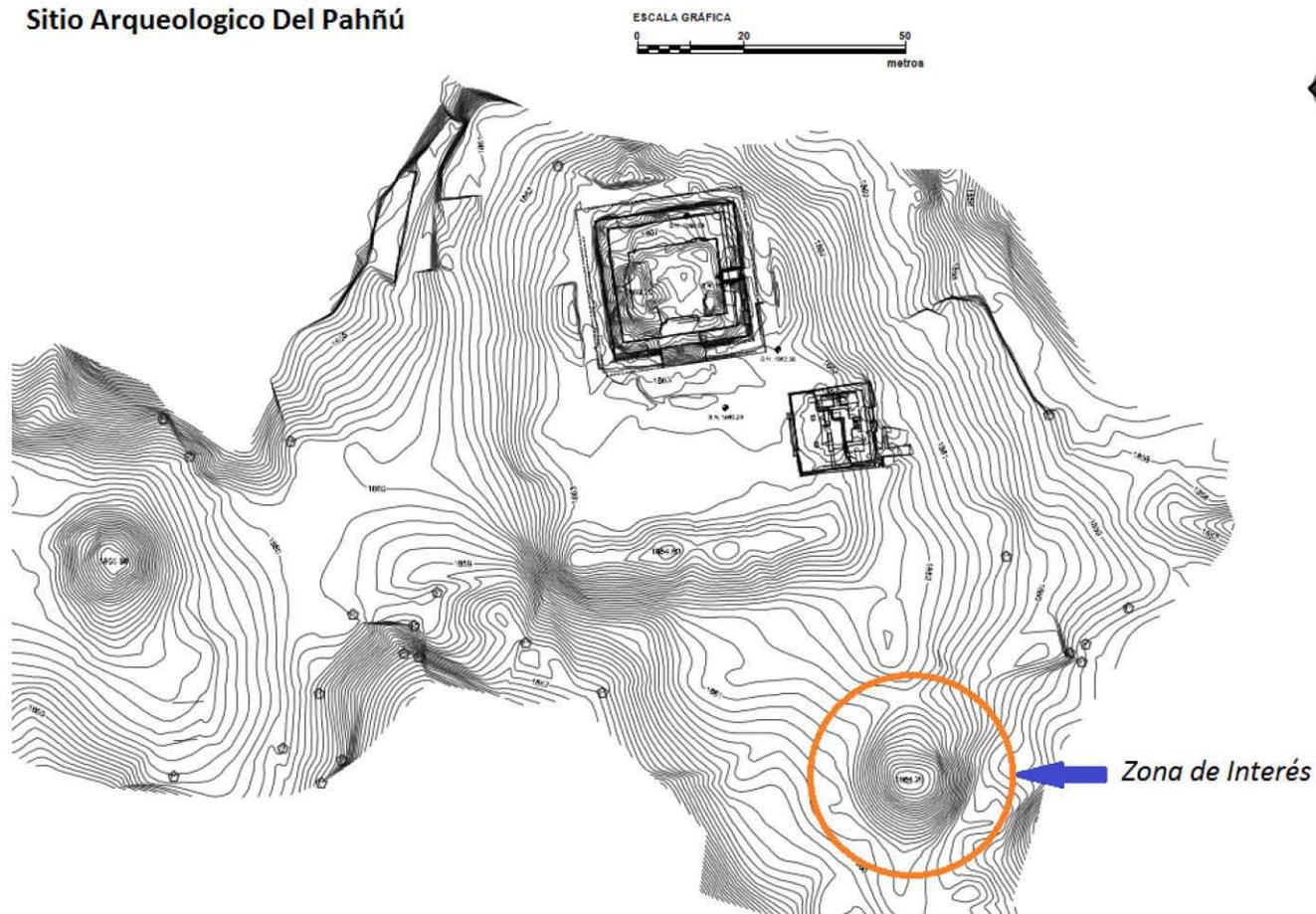


Fig.4.1.3 Ubicación del sitio de estudio (Modificado de Argote et. al., 2013).

4.2 Trabajo de campo.

El trabajo de campo se realizo en dos etapas, en la primera fase se realizaron dos líneas con dirección Norte-Sur, localizadas en el centro del montículo, cada una contó una longitud de 33 m con un interlineado de 6 m y un espacio intereléctrodico de 3 m.

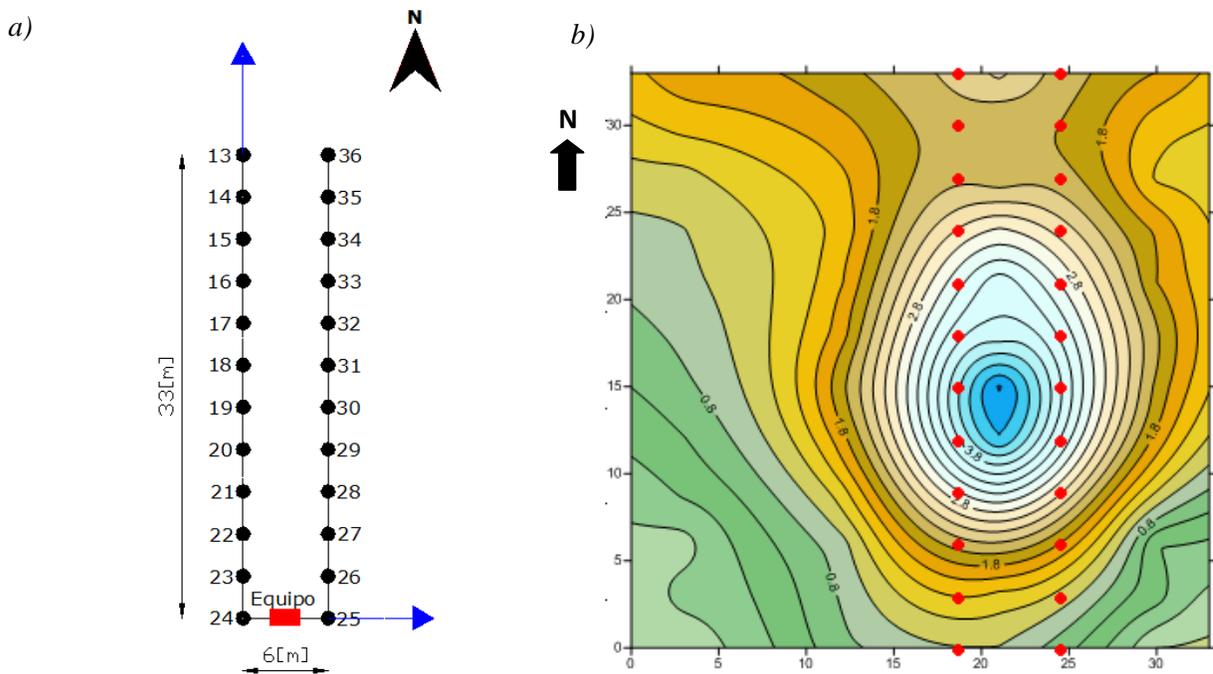


Fig.4.2.1 a) Líneas utilizadas durante la primera fase del trabajo de campo, b) Ubicación de las líneas sobre el montículo.

En la segunda fase del proyecto se realizaron dos tendidos con cuatro líneas cada uno. La longitud de cada línea fue de 33m con un interlineado de 9 m y un espacio intereléctrodico de 3m. En el primer tendido la orientación de las líneas fue Norte-Sur mientras que en el segundo tendido fue Este-Oeste (Fig.4.2.2).

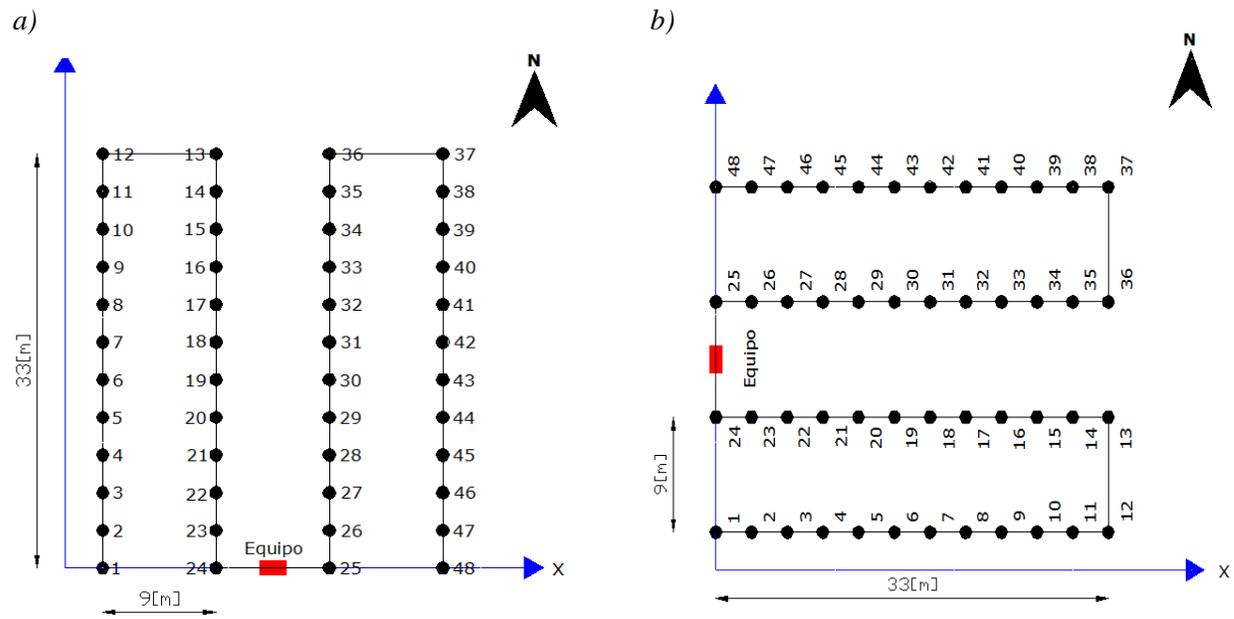


Fig.4.2.2 a) Tendidos utilizados en la segunda fase del proyecto: a) Líneas Norte-Sur, b) Líneas Este-Oeste.

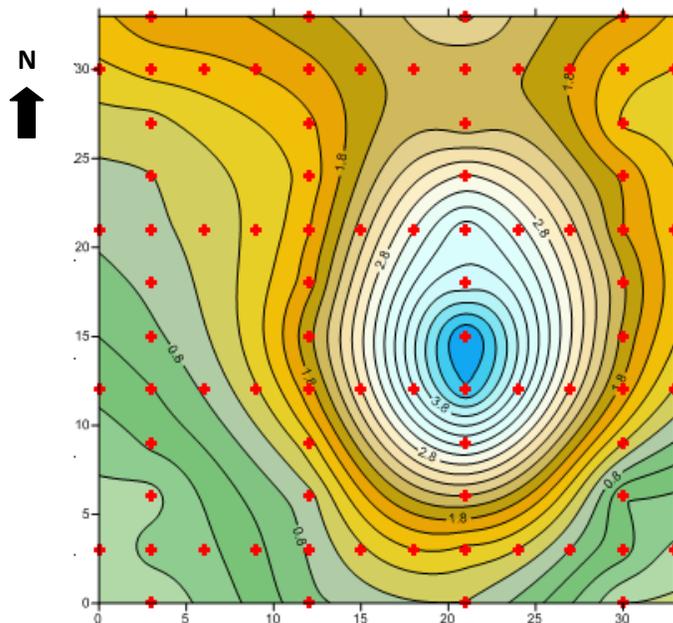


Fig.4.2.3 Ubicación de los electrodos en el área de estudio durante la segunda fase del proyecto.

4.3 Secuencias de Medición

Las secuencias utilizadas durante este proyecto fueron Wenner-Schlumberger (W-S), Mínimo Acoplamiento (M.A.) y Ecuatorial Paralelo (EQP).

En la secuencia Wenner-Schlumberger se obtuvieron perfiles 2D, localizados debajo de cada línea medida. Las primeras mediciones fueron realizadas con una separación equidistante entre todos los electrodos del arreglo. En los extremos se localizaron los electrodos de corriente (A, B) y en la parte central del arreglo, los electrodos de potencial (M, N) (Fig.4.3.1). La primera medición se realizó con los primeros cuatro electrodos, A=1, B=4, M=2, N=3, para la segunda medición se desplazaron un lugar y así sucesivamente hasta llegar al último cuadrípolo que fue A=9, B12, M=10 y N=11. Una vez medida toda la línea, se aumento la distancia entre los electrodos de corriente y los electrodos de potencial (na), pero siempre manteniendo la distancia constante entre los electrodos de potencial ($a=3\text{ m}$), de esta manera se logró aumentar el nivel de profundidad investigación; para el último nivel medido, el ultimo cuadrípolo fue: A =1, B=12, M= 6 y N=7. El total de niveles obtenidos para este arreglo fue de 5, alcanzando una profundidad de investigación de aproximadamente 6.3 m (Fig.4.3.2).

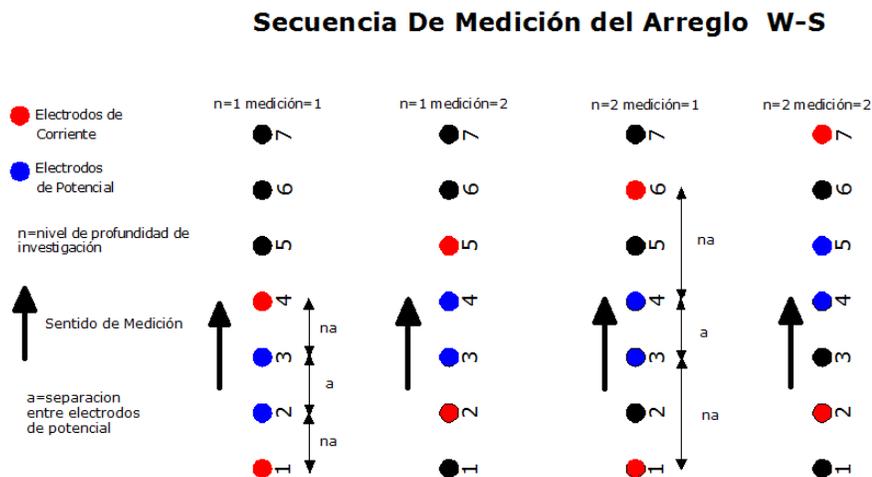


Fig.4.3.1 Secuencia de medición del arreglo Wenner-Schlumberger

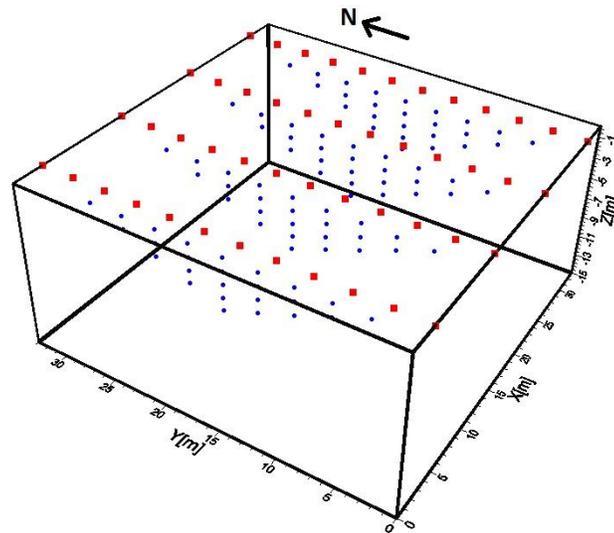


Fig.4.3.2 Distribución de los puntos de atribución con el arreglo Wenner-Schlumberger

El arreglo Ecuatorial Paralelo (EQP) se llevo a cabo mediante dos líneas paralelas, en una de ellas se colocaron los electrodos de corriente (A, B) y en la otra línea, los electrodos de potencial (M, N). Este arreglo midió de dos maneras; en una de ellas se colocaron los electrodos en la siguiente secuencia A, M, N y B; sin embargo los electrodos se ubicaron en distintas líneas; A y B se localizaron en la línea 1 y los electrodos de potencial M y N, en la línea 2 (Fig. 4.3.3). El procedimiento para medir es el mismo que para el arreglo W-S, la distancia entre los electrodos de potencial se mantiene constante y únicamente va cambiando la distancia entre los electrodos de corriente, para aumentar el nivel de profundidad. La siguiente forma de medir fue colocando un electrodo de corriente al inicio de cada línea seguidos por un electrodo de potencial (Fig.4.3.4), una vez realizada esta medición, únicamente se desplazaron los electrodos de potencial un lugar y se volvió a medir, esto se repitió hasta que los electrodos de potencial recorrieron toda la línea donde se ubicaban; finalizado este proceso, se desplazaron los electrodos de corriente un lugar y se volvió a medir de la misma forma hasta que los electrodos de potencial, nuevamente, recorrieron toda su línea, una vez realizado lo anterior, los electrodos de corriente, se volvieron a desplazar un lugar y se comenzaron a medir de la misma manera. Se

concluyeron, estas mediciones, cuando los electrodos de corriente se encontraron ubicados en el penúltimo lugar de cada línea y los electrodos de potencial únicamente pudieron ocupar el último sitio. Los puntos de atribución para este arreglo se ubicaron en una sección paralela e intermedia a estas dos líneas (Fig.4.3.5)

Debido a que se requieren dos líneas para medir de esta manera, se hicieron combinaciones con las cuatro líneas del tendido quedando de la siguiente manera: 1-2, 2-3, 3-4, 1-3, 1-4 y 2-4.

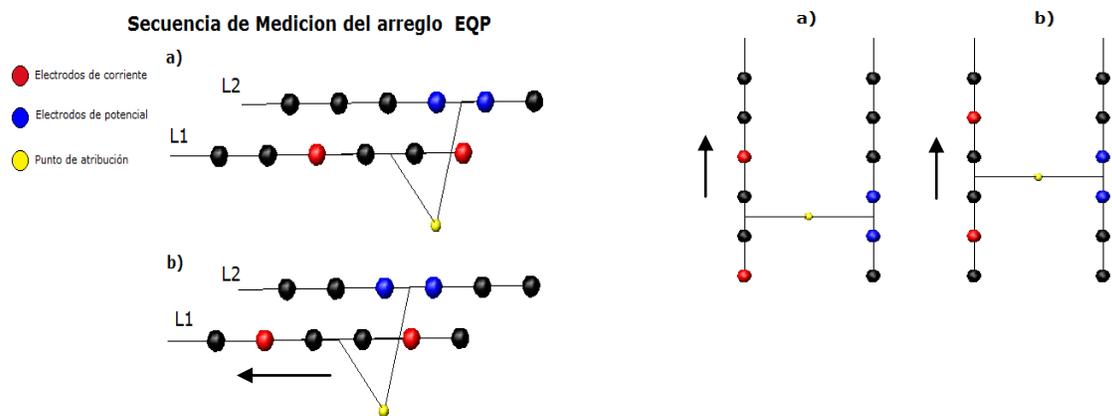


Fig.4.3.3 Vista de perfil (izquierda) y de planta (derecha) del arreglo Ecuatorial-Paralelo

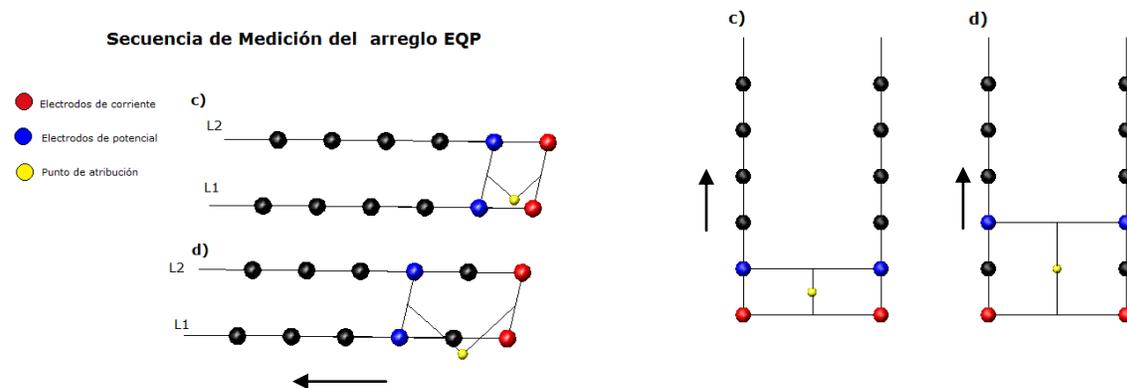


Fig.4.3.4 Vista de perfil (izquierda) y de planta (derecha) del arreglo Ecuatorial-Paralelo

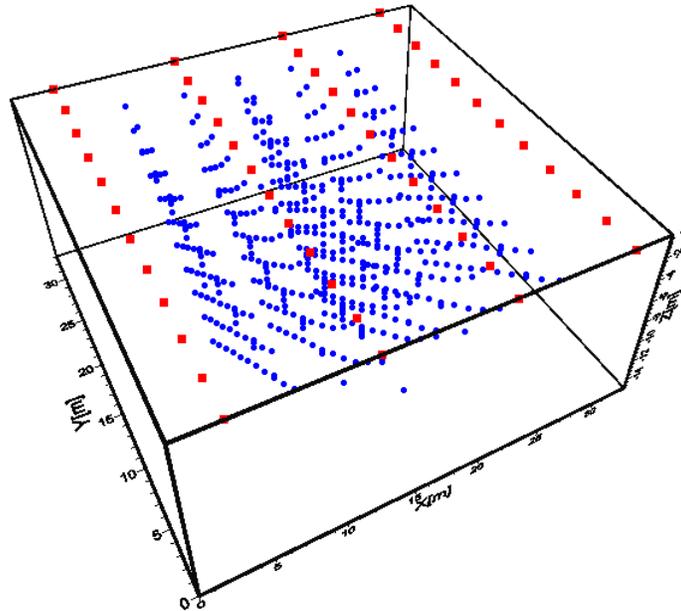


Fig.4.3.5 Puntos de atribución obtenidos con el arreglo Ecuatorial Paralelo.

Para el arreglo Mínimo Acoplamiento (M.A.) se utilizaron dos líneas paralelas. Al inicio de cada línea (línea 1 y línea 2) se colocó un electrodo de corriente (A y B), los electrodos de potencial (M y N) fueron colocados sobre la misma línea en los siguientes dos lugares y se efectuó la primera medición (Fig.4.3.6). Posteriormente ambos electrodos de potencial se desplazaron un lugar y se volvió a medir, esto se repitió varias veces hasta que los electrodos M y N ocuparon los últimos lugares de la línea. Finalizado el proceso anterior, los electrodos A y B avanzaron un lugar y los electrodos M y N, se colocaron y se desplazaron de la misma manera que lo habían hecho anteriormente; este procedimiento se repitió hasta que los electrodos A y B ocuparon el antepenúltimo lugar de cada línea y los electrodos M y N el penúltimo y último respectivamente. Una vez concluidas las mediciones se vuelven a repetir pero ahora los electrodos de potencial se ubicaron en la otra línea. Para este arreglo, los puntos de atribución se localizaron en forma paralela a los dos líneas utilizadas, sin embargo no se encontraron a la mitad de la distancia entre ellas, si no que se ubicaron en una sección cercana a la línea donde se colocaron los electrodos de potencial, por lo que se obtuvieron dos secciones entre cada dos líneas (Fig.4.3.7).

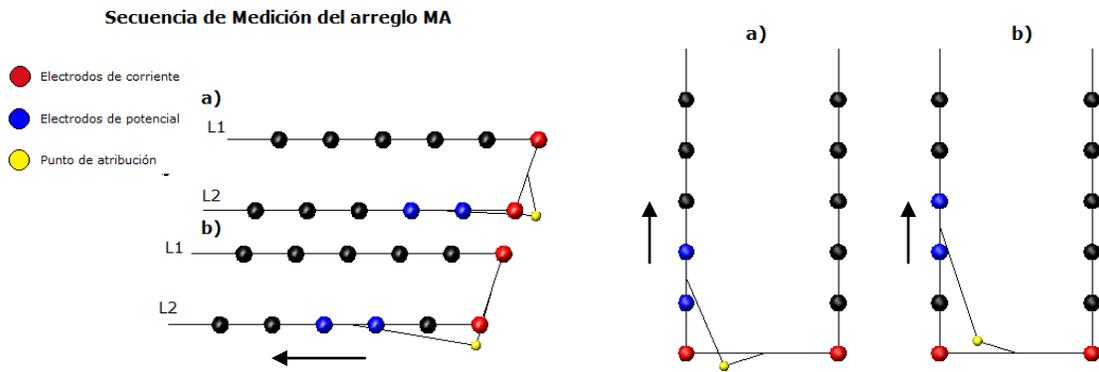


Fig.4.3.6 Vista de perfil (izquierda) y de planta (Izquierda) del arreglo Mínimo Acoplamiento

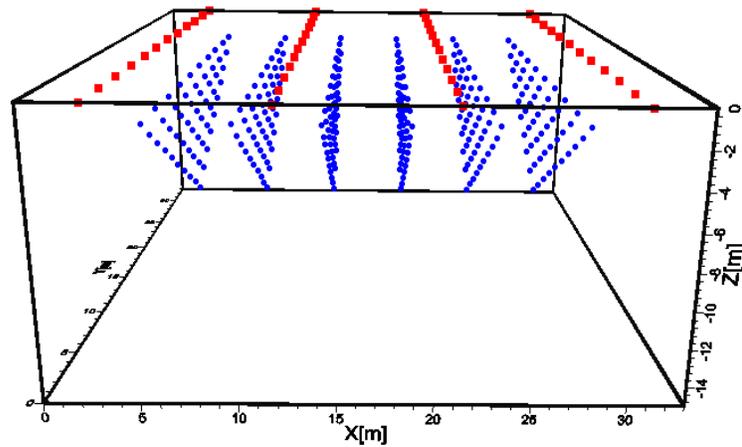


Fig.4.3.7 Distribución de los puntos de atribución con el arreglo Mínimo Acoplamiento.

En el primer tendido (líneas Norte-Sur) se obtuvieron 546 cuadripolos para el arreglo Ecuatorial Paralelo (EQP), 330 para el arreglo Mínimo Acoplamiento (MA) y 100 para el arreglo Wenner-Schlumberger (W-S), obteniendo un total de 976 cuadripolos (Fig.4.3.8).

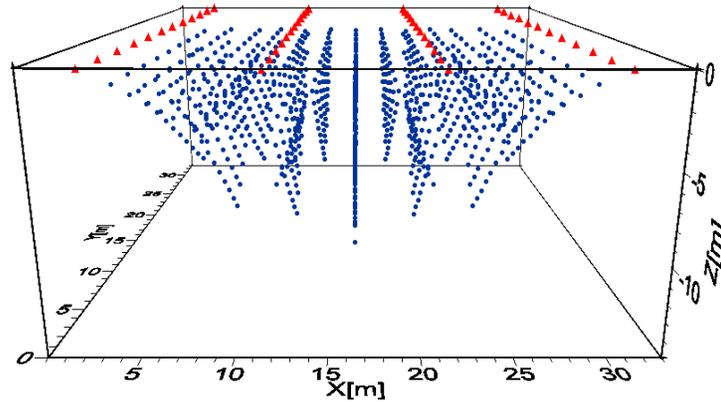


Fig.4.3.8 Distribución del total de puntos de atribución del primer tendido.

Para el segundo tendido (líneas Este-Oeste) se utilizaron los mismos arreglos que en el tendido anterior y las mismas secuencias de medición. Solamente fue necesario cambiar la posición de cada uno de los electrodos, debido al cambio de orientación de las líneas (Fig.4.3.9).

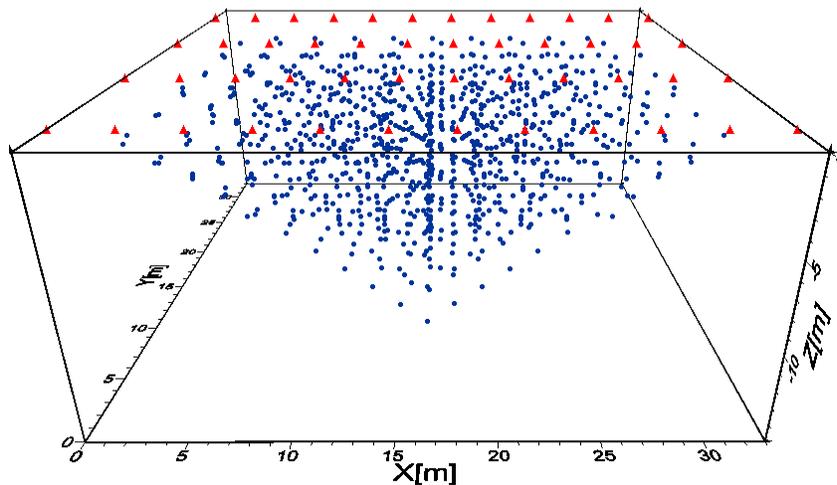


Fig.4.3.9 Distribución total de puntos de atribución del segundo tendido.

Se obtuvieron un total de 1,952 cuadripolos para ambos arreglos, distribuidos de la siguiente manera (Fig.4.3.10):

Líneas	Arreglo	No. Cuadripolos
N-S	W-S	100
	M.A.	330
	EQ.P.	546
E-W	W-S	100
	M.A.	330
	EQ.P.	546
Total		1,952

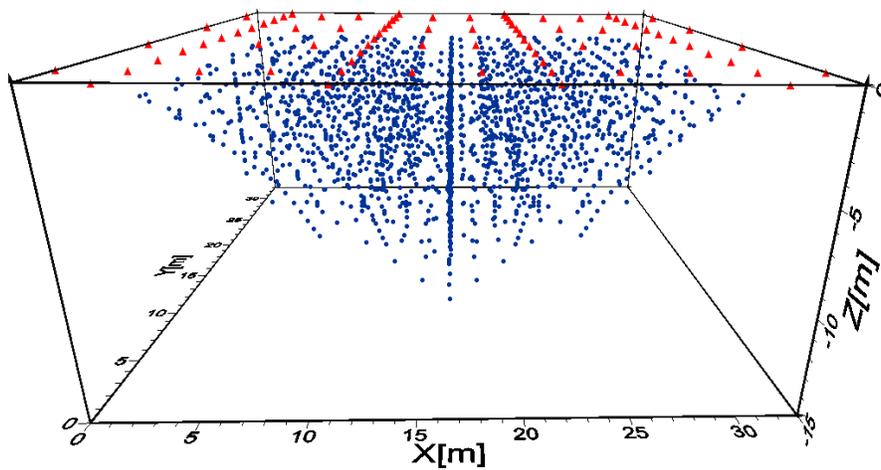


Fig.4.3.10 Distribución total de los puntos de atribución.

5. RESULTADOS

5.1 Procesamiento de Datos

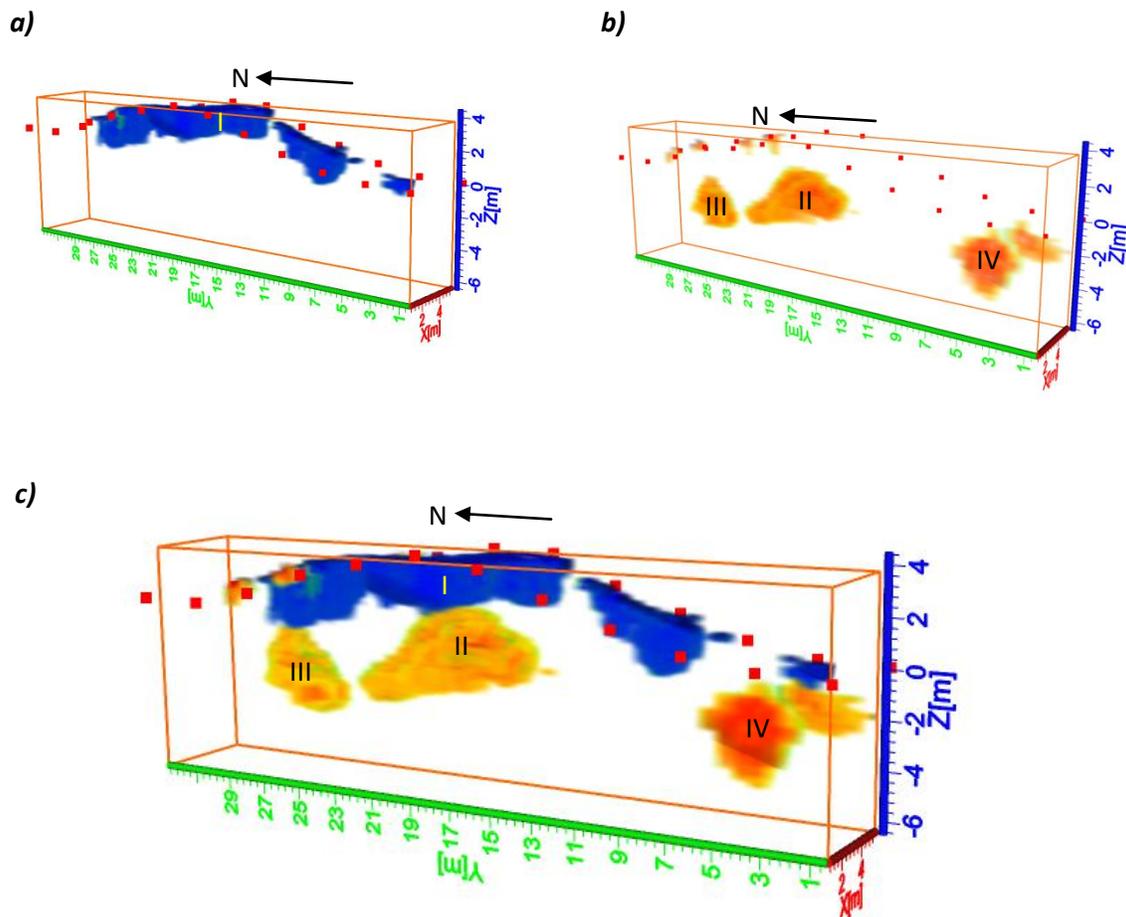
Los datos se descargan del equipo Syscal en un archivo .bin y mediante el software Prosys II de IRIS INSTRUMENTS se pueden visualizar los datos en un archivo de texto. El archivo contiene el nombre del arreglo, coordenadas de cada uno de los electrodos en cada de medición, resistividad aparente, desviación estándar, voltaje medido, corriente inyectada y tiempo de inyección de corriente.

Una vez generado el archivo de texto, se realizó el archivo .urf (Universal Resistivity Files), necesario para poder procesar los datos con el software EarthImager 3D. Para llevar a cabo la inversión de los datos, además del archivo .urf, se requiere un archivo de texto que contenga la topografía de cada punto medido. El archivo de la topografía consta de 3 columnas para las diferentes coordenadas 'x', 'y', y 'z' (altura).

El modelo de inversión se obtuvo con el software EarthImager 3D, éste nos permite elegir el método de solución para el modelo directo y el método de inversión que se utilizará. Se escogió el método de elemento finito para el modelo directo ya que permite discretizar el subsuelo en una rejilla que no necesariamente es rectangular adecuado para lugares con desniveles topográficos; la matriz, la resuelve el programa con el método de gradiente conjugado y el método de inversión que se ocupó en este software fue el método de suavizado con un máximo de ocho iteraciones.

5.2 Análisis de Resultados

A partir de la primera toma de datos realizada mediante las dos líneas, se obtuvieron las siguientes imágenes en las que se pueden observar varias estructuras bien definidas gracias a sus contrastes resistivos. Se observa un cuerpo anómalo, de color azul correspondiente a valores bajos de resistividad localizado en la parte superior del montículo con valores de 100 a 500 ohm-m (Fig.5.2.1 a); también se denotan varios cuerpos de color naranja que corresponden a estructuras con valores más altos de resistividad, localizados en la parte inferior correspondientes a valores entre 4,500 y 9,000 ohm-m aproximadamente (fig.5.2.1 b).



5.2.1 Imágenes que muestran los cuerpos anómalos observados

Para obtener una mejor representación de estos cuerpos anómalos, se invirtieron los datos de ambas rejillas utilizadas en la segunda etapa del proyecto, obteniendo un total de 1,952 cuadripolos. El error RMS que se obtuvo fue de 8.1 %. Este modelo fue comparado con el primer modelo de las dos líneas; obteniendo estructuras consistentes en ambas imágenes.

En la siguiente imagen (Fig.5.2.2) se muestra la zona correspondiente a valores bajos de resistividad cuyo rango de valores es de 100 hasta 800 ohm-m, aproximadamente. Los puntos observados en color rojo corresponden a la ubicación de cada uno de los electrodos. Se puede observar al cuerpo de interés en la parte superior de la estructura. Este cuerpo, se localiza en la parte oriente de la rejilla, entre una altura de va desde la superficie a 0 m hasta 4 m, teniendo un espesor promedio de aproximadamente 3 m.

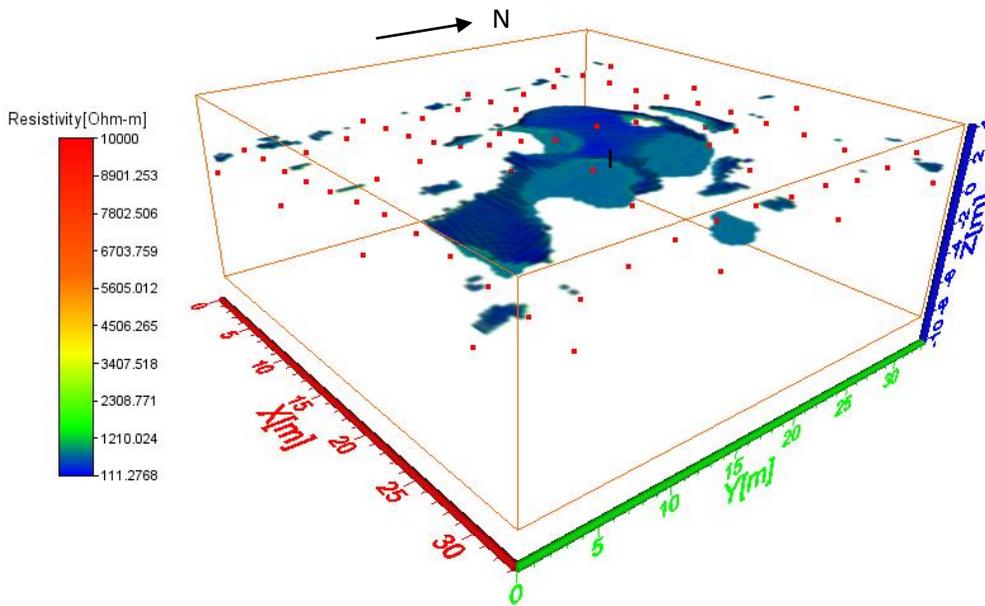


Fig.5.2.2 Distribución de la resistividad en la parte superior de la colina.

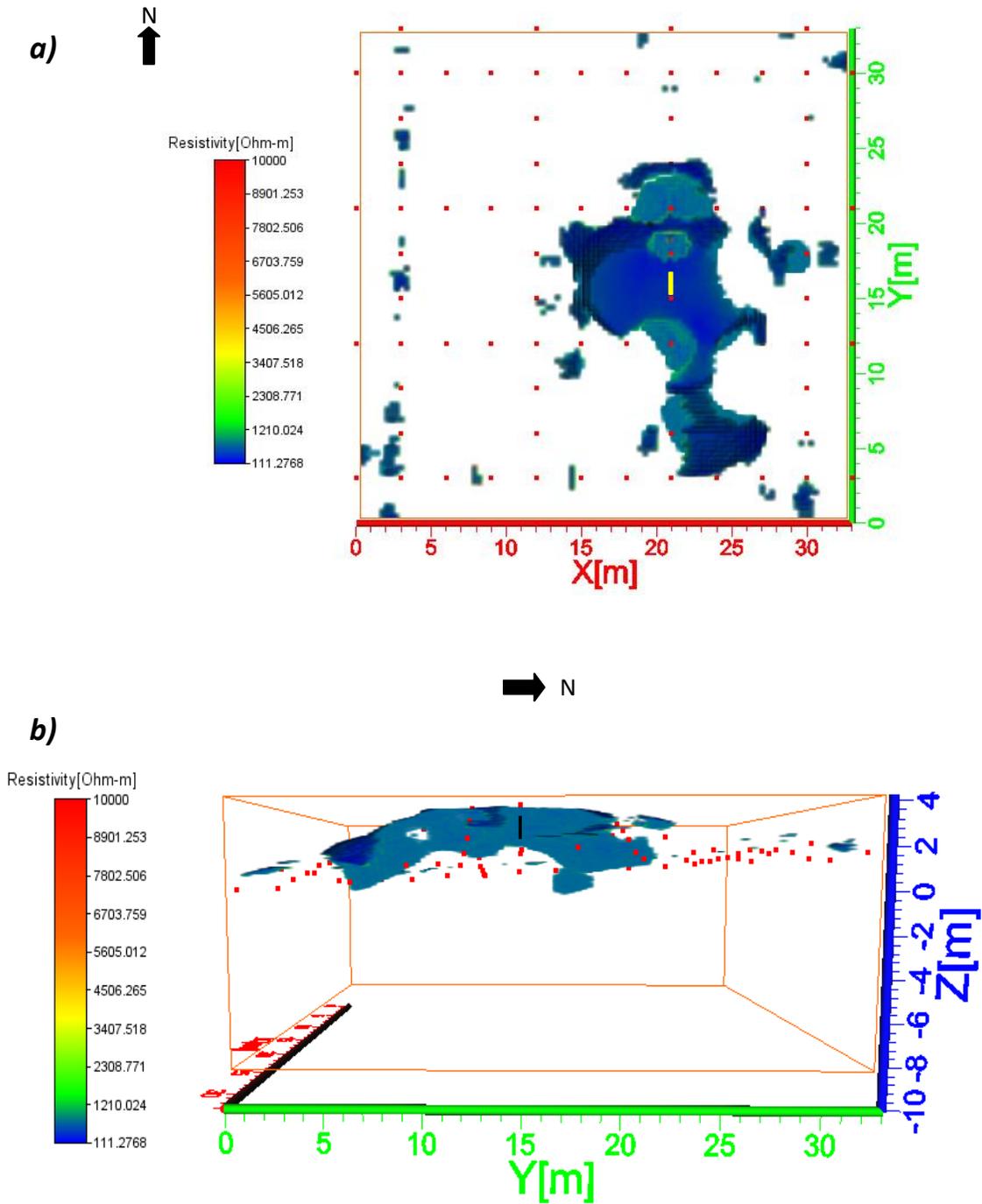


Fig.5.2.3 Cuerpo de baja resistividad a) Vista de planta, b) Vista de perfil.

En la imagen anterior (fig.5.2.3) se pueden observar las dimensiones aproximadas de la estructura; cuenta con una longitud de aproximadamente 20 m y un ancho de 12 m.

En el siguiente modelo (fig. 5.2.4) se puede observar el cuerpo resistivo II, que coincide con el modelo de las dos líneas, aunque no se pueden observar los cuerpos III y IV, lo que puede deberse a la distancia entre las líneas de electrodos, ya que en el primer tendido la distancia entre ambas fue menor de 6 m y en la rejilla fue de 9 m o puede ser por la cantidad de datos utilizada considerando que en este último se tienen más mediciones. En este modelo también se pueden apreciar algunos cuerpos anómalos más pequeños que, tal vez no requieran de mucha importancia debido a su tamaño; podrían relacionarse a la resistencia de contacto de los electrodos (V, VI, VII). La anomalía que concuerda en ambas imágenes es el cuerpo II, localizado en el centro del montículo. Los valores de resistividad para este cuerpo son mayores a 4,000 ohm-m.

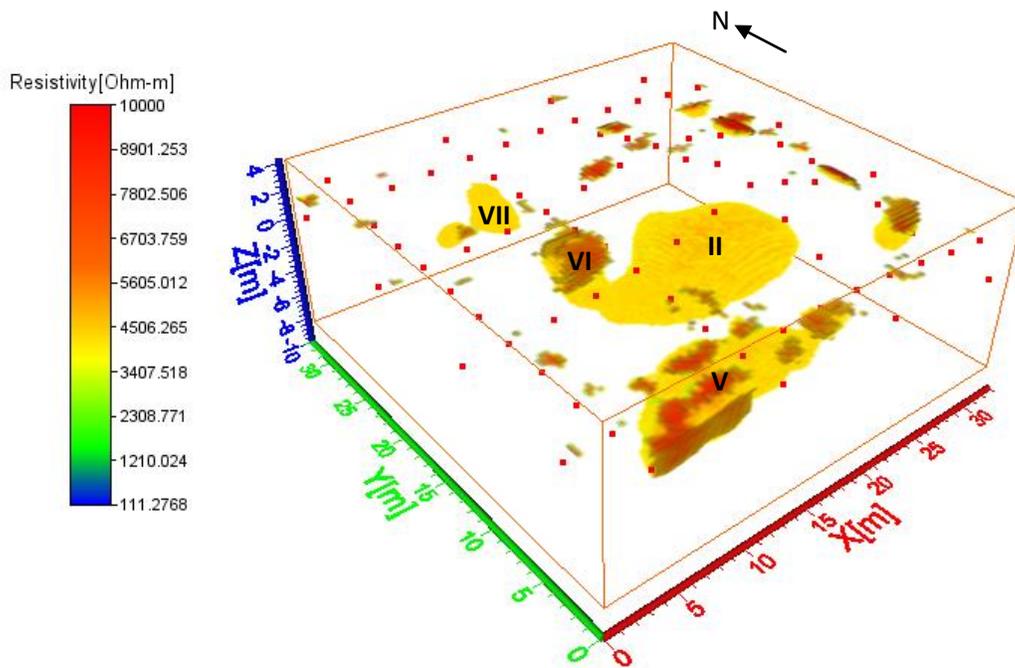


Fig.5.2.4 Distribución de los valores altos resistivos.

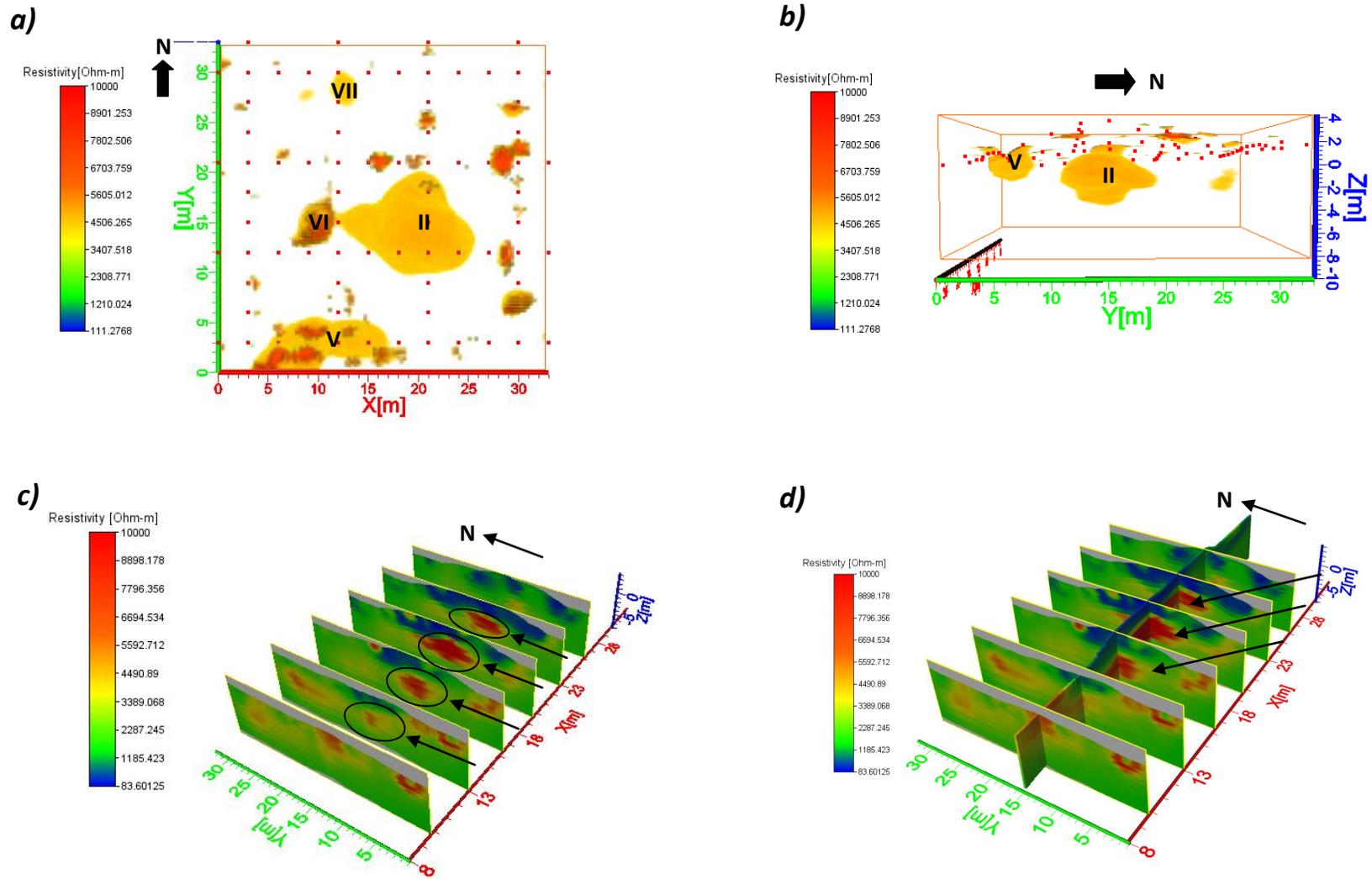


Fig.5.2.5 Imagen de la estructura resistiva

De acuerdo con la imagen anterior (Fig. 5.2.5 a) se encuentra un cuerpo anómalo en la parte sureste de la rejilla (Cuerpo V), que podría atribuirse al efecto de la resistencia de contacto de los electrodos, ya que se encuentra ubicado debajo de la primera línea del tendido E-W, lugar donde los electrodos muestran mayor cantidad de ruido; como no se encuentra debajo de toda la primera línea, no se descarta que pueda ser una estructura que represente algún interés arqueológico. También se logra observar un cuerpo localizado en la parte poniente del cuerpo II ubicado con el número VI y un cuerpo situado en la parte norte del tendido con el número VII, ambos parecen no tener demasiada relevancia porque podrían ser atribuidos a un efecto de resistencia de contacto de los electrodos debido a su tamaño. En la Fig.5.2.5 c) y d) se puede observar el cuerpo alto resistivo en diferentes secciones a lo largo del eje 'x',

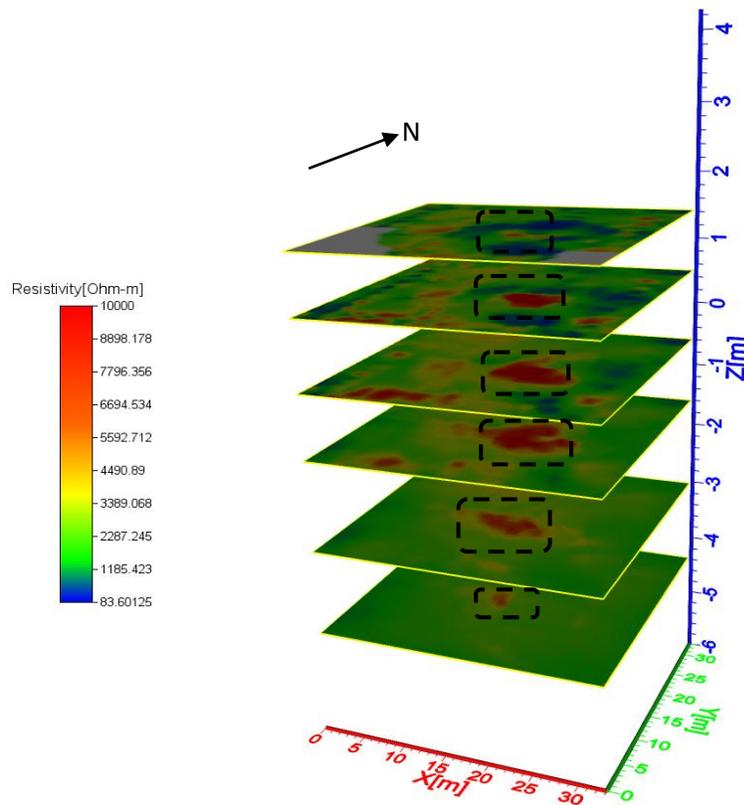


Fig.5.2.6 Perfiles horizontales que muestran la profundidad aproximada del cuerpo II

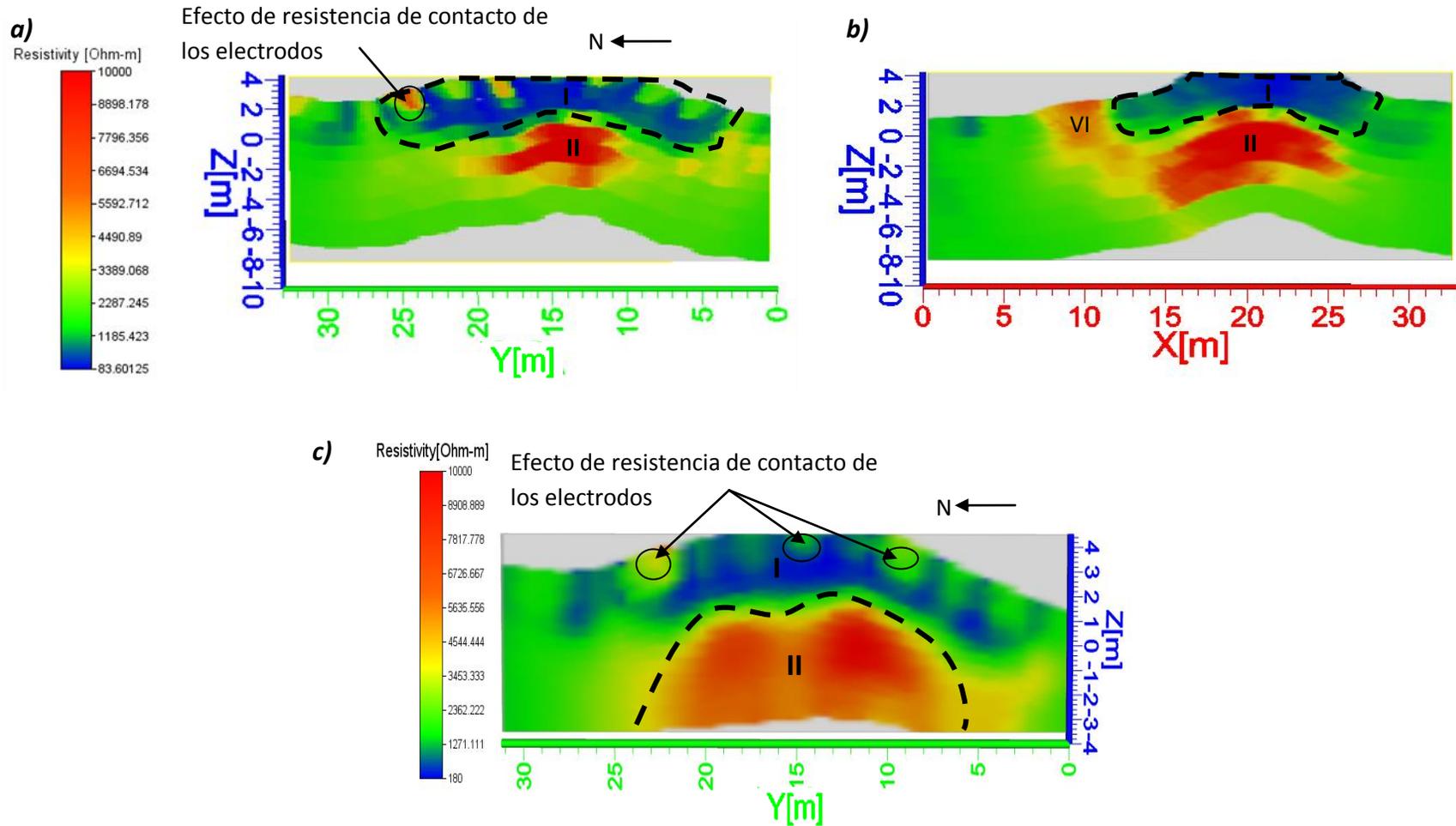


Fig.5.2.7 a) Perfil dirección E-W localizado en $y=14$ m , b) Perfil dirección N-S localizado en $x=21$ m, c) Perfil del arreglo Wenner-Schlumberger localizado en $x=21$ m

La Fig.5.2.6 muestra el rango de profundidad para el cuerpo II que comprende desde una altura de 1.5 m hasta una profundidad de -4.5 m aproximadamente

En la Fig.5.2.7 Se observan dos cuerpos anómalos y también se logra ver, en la parte superior el efecto de los electrodos en los perfiles 'yz' (a y c). El perfil 'xz' (b) no muestra efecto de resistencia de contacto de los electrodos debido a que no se encontraba una línea de medición en superficie. Tanto el perfil (a) y (b) se obtuvieron a partir del modelo tridimensional en el que se incluían todos los arreglos por lo que la profundidad de investigación es mayor que la profundidad del perfil (c). El perfil (c) se obtuvo realizando el modelo de inversión del arreglo W-S situado debajo de la línea 3 del tendido con dirección Norte-Sur en la distancia $x=21$ m. Todos los perfiles muestran ambas estructuras anómalas (cuerpo bajo resistivo y cuerpo alto resistivo). El cuerpo presentado en color azul corresponde a valores de baja resistividad entre 180 a 800 ohm-m; éste tiene una extensión de aproximadamente 24 m en la dirección 'y' y 13 m en la dirección 'x'. El cuerpo en la parte inferior de cada perfil, en color rojizo, representa los valores de resistividad mayores a los 4,000 Ohm-m ; cuenta con una extensión aproximada de 11 m a lo largo del eje 'y' (perfil (a)) y una longitud de 14 m a lo largo del eje x (perfil (b)). Los perfiles también presentan valores de resistividad que comprenden un rango entre 1,200 a 3,500 ohm-m aproximadamente, mostrados en color verde, representando los valores de resistividad del medio geológico circundante, correspondiente a toba riolítica. El estudio fue llevado a cabo en Marzo, posterior a los meses con menos precipitación, enero y febrero (Granados, 2004), por lo que el suelo se encontraba demasiado seco, además de otros factores que pueden afectar la resistividad del material, como la porosidad y el grado de fracturación de la roca.

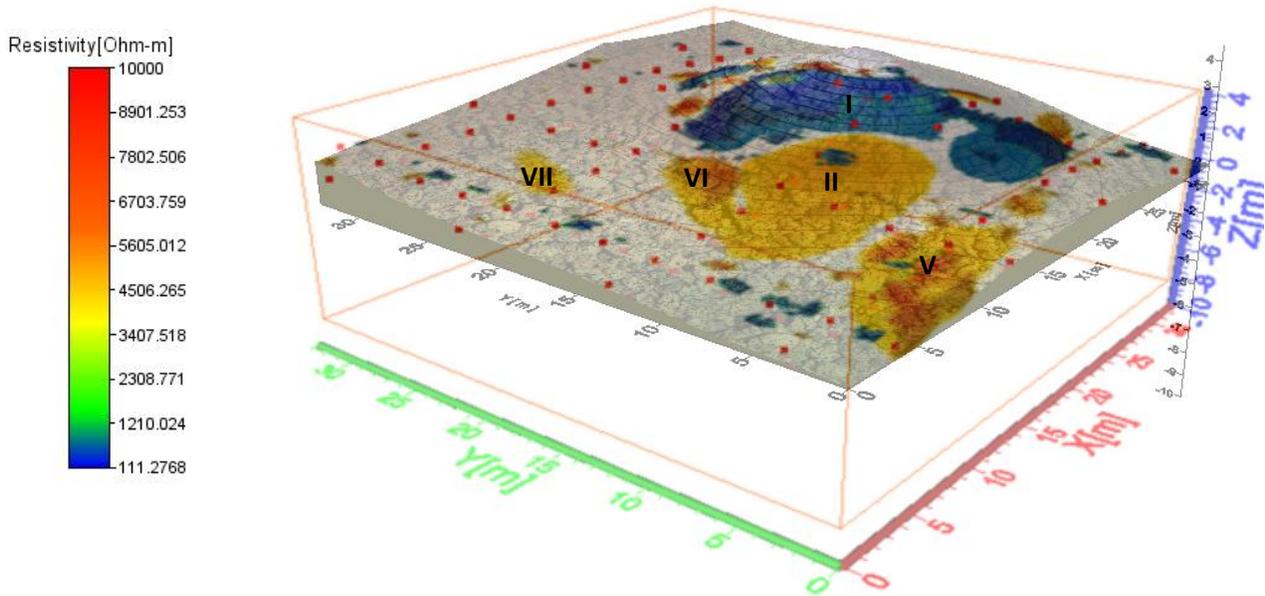


Fig.5.2.8 Anomalías ubicadas sobre la topografía del sitio

En la imagen anterior se observan las anomalías localizadas sobre la topografía del montículo, cabe mencionar que los cuerpos II y V están a profundidad. El cuerpo II se encuentra desde 1.5 m hasta los -4.5 m; el cuerpo V se encuentra desde los 2 m hasta la profundidad de -1.5 aproximadamente.

Con base en las construcciones de las pirámides prehispánicas, el cuerpo localizado en la parte interna del montículo (indicado en las imágenes como II) correspondiente a un valor alto de resistividad podría estar asociado al material depositado como soporte para la edificación de estas construcciones. Pues para que estos edificios fueran estables se requería la acumulación de material en la parte interna de la construcción ya fuera depositado de manera artificial o natural; este volumen de material podría relacionarse con el cuerpo II, en forma y tamaño.

La resistencia de estos edificios se garantizaba si se les colocaba material envolvente que pudiera contener el material que conformaba el basamento; lo que podría estar asociado al cuerpo I indicado en color azul, mostrado en las imágenes anteriores, y ubicado en la parte superior (Ver Fig. 5.2.9).

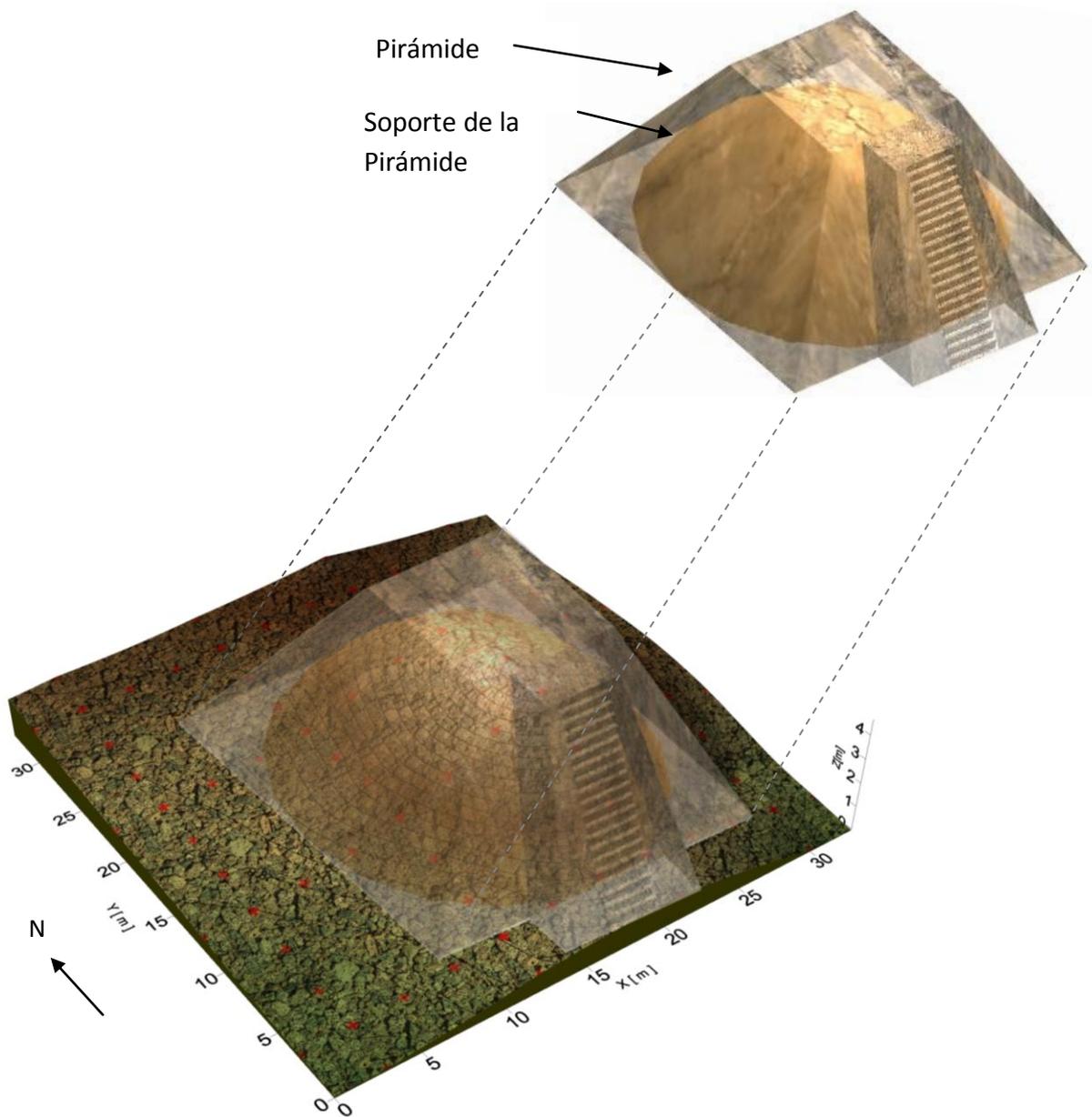


Fig.5.2.9 Ubicación de la posible construcción precedente al montículo.

De acuerdo con los trabajos arqueológicos y los trabajos geofísicos previos en el sitio se descubrió que en la zona habían existido dos etapas constructivas en los edificios principales; tomando en cuenta estos conocimientos es posible que de la hipótesis anterior, se pueda mencionar que el cuerpo profundo II podría corresponder a la primera etapa de edificación la cual sirvió como basamento para el cuerpo I, que corresponde a la segunda etapa y que se encuentra en la parte más somera de la colina.

6. CONCLUSIONES

En estudios arqueológicos es muy conveniente realizar estudios geofísicos, pues permiten conocer el subsuelo mediante mediciones hechas desde la superficie. Esto permite encontrar cuerpos enterrados de interés, evitando una excavación fallida y la destrucción de estructuras o artefacto históricos.

Cuando el sitio a explorar es de fácil acceso, es factible colocar los electrodos en una malla e ir midiendo con diferentes arreglos electródicos, como lo fue en este caso; cabe mencionar que en las zonas urbanas se han aplicado otros diseños de medición como lo son el arreglo en L o en herradura ya que estos permiten obtener la información del subsuelo colocando los electrodos en el perímetro de la zona de estudio.

El haber efectuado diferentes arreglos electródicos en el mismo tendido nos permitió obtener una mejor resolución del área explorada y una aceptable calidad en los datos. Como menciona Loke (2004): “en teoría es posible combinar las mediciones hechas con diferentes arreglos para tomar la ventaja de las diferentes propiedades de cada uno de ellos”.

Las anomalías I y II encontradas con el tendido de las dos líneas fueron concordantes con las anomalías encontradas en los modelos observados hechos con la rejilla, tienen aproximadamente las mismas dimensiones, también en este último estudio se observaron otras anomalías que cabría analizar más detenidamente y relacionarlas con la información histórica del lugar para averiguar a que podrían corresponder.

En este estudio los arreglos 3D proporcionaron información más completa y detallada de los cuerpos de interés, como lo muestran los perfiles mostrados en el capítulo anterior. El perfil que se obtuvo con el cubo de resistividades mostró una mayor profundidad de investigación gracias a la utilización de todos los arreglos, ya que en algunos de ellos los electrodos de potencial y de corriente se encontraban en lados opuestos de la malla, aumentado, con ello, la profundidad de investigación. El perfil obtenido únicamente con el arreglo Wenner-Schlumberger mostró una profundidad menor a los 4 m; en la parte profunda de este perfil se observa al cuerpo alto resistivo de, aparentemente, mayores dimensiones, lo que se puede deber a la sensibilidad de este

arreglo pues conforme aumenta la profundidad disminuye la sensibilidad haciendo menos perceptible cambios de resistividad en la toma del potencial.

El haber llevado a cabo estos estudios permitirá que los arqueólogos tengan información útil con la que ellos puedan realizar un rescate apropiado, y poder efectuar las excavaciones necesarias donde ellos consideren pertinentes, sin necesidad de hacerlo a prueba y error, y en caso de ser necesario realizar una perforación para corroborar la información obtenida de la TRE 3D; de tal manera que no se dañen estas estructuras, pues por su antigüedad llegan a ser muy sensibles a cualquier mínima perturbación.

Finalmente como recomendación se podría examinar si es factible utilizar otro método geofísico como GPR para comprobar los datos obtenidos con este método.

Referencias

Advanced Geosciences Inc. 2008. Instruction manual for EarthImager 3D version 1.5.3, Resistivity Inversion Software.

Advanced Geosciences Inc. 2009. Instruction manual for EarthImager 2D version 2.4.0, Resistivity and IP Inversion Software.

Aizebeokhai, A. P. 2010. 2D y 3D geoelectrical resistivity imaging: Theory and field design. *Scientific Research and Essays*, 5, 3, 3592-3605.

Aizebeokhai, A. P. 2010. Anomaly effects of arrays for 3D geoelectrical resistivity imaging using orthogonal or parallel 2D profiles. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 4, 7, 446-454.

Arciniega C. A., Hernández E., Cabral E., Morett L., Díaz O., Soler A., Chávez R. 2009. Shallow geophysical survey at the archaeological site of San Miguel Tocuila Basin of Mexico. *Journal of Archaeological Science*, 36, 1199-1205.

Argote D. L., Tejero A., Chávez R. E., López P. A., Bravo R. 2009. 3D modelling of magnetic data from an archaeological site in north-western Tlaxcala state, Mexico. *Journal of Archaeological Science*, 36, 1661-1671.

Argote-Espino D., Tejero A., Cifuentes G., Iriarte L., Farías S., Chávez R., López F. 2013. 3D electrical prospecting in the archaeological site of El Pahñú, Hidalgo State, Central Mexico. *Journal of Archaeological Science*, 40, 2, 1213-1223

Barker R.D., 1989. Depth of investigation of collinear symmetrical four electrode arrays. *Geophysics*, 54, 1031-1037.

Carrillo M. 1998. Normal faulting in the Pathé geothermal area, Central Mexico. *Geofísica Internacional*, 37, 2, 103-111.

Chávez R. E., Tejero A., Argote D. L. & Cámara M. E. 2010. Geophysical study of a pre-Hispanic Lakeshore settlement, Chiconahuapan Lake, Mexico. *Archaeological Prospection*, 17, 1-13.

Edwards L. S. 1977. A modified pseudosection for resistivity and IP. *Geophysics*, 42, 1020-1036.

Granados D., López G., Hernández J. 2004. Agricultura nahuatl-otomí del Valle del Mezquital, Hidalgo. *Terra Latinoamérica*, 22, 1, 117-126.

Greenhalgh M. S. 2008. DC resistivity modelling and sensitivity analysis in anisotropic media.

INEGI. 2009. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Tecozautla, Hidalgo.

Loke M. H. 2004. Tutorial: 2D and 3D electrical imaging surveys.

López A., Loke M. H., Fanton G. O., Cara E. 2004. Técnicas prácticas para investigación de resistividad en dos y tres dimensiones (Tomografía eléctrica 2D y 3D).

López F., Fournier P. 2009. Espacio, tiempo y asentamientos en el Valle del Mezquital: un enfoque comparativo con los desarrollos de William T. Sanders. *Revista Cuicuilco*, 47, 113-146.

Matos E. 2010. Pirámides como centro del Universo. *Arqueología Mexicana*, 17, 101, 30-39.

Nyári Z., Kanh A. I. 2007. Imaging of buried 3D objects by using electrical profiling methods with GPR and 3D geoelectrical measurements. *Journal of Geophysics and Engineering*, 4, 83-93.

Servicio Geológico Mexicano, 2002. Carta Geológico- Minera, Tecozautla F-14-C68. Escala 1:50000.

Servicio Geológico Mexicano, 2007. Carta Geológico- Minera, Tequisquiapan F-14-C67. Escala 1:50000.

Servicio Geológico Mexicano, 2007. Informe Carta Geológico- Minera, Tequisquiapan F-14-C67. Escala 1:50000

Servicio Geológico Mexicano, 2010. Panorama Minero del estado de Hidalgo.

Siller J. A. 2007. Arquitectura en Mesoamerica II. La construcción de los espacios. *Arqueología Mexicana*, 15, 85, 20-27.

Silva L. y Córdoba D. A. 1996. Vulcanismo explosivo al norte y oeste de la ciudad de Tula, Estado de Hidalgo, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 13, 1, 52-64.

Telford W.M., Geldart L.P., Sheriff R.E. 1996. *Applied Geophysics Second Edition*. Cambridge University Press. Pp. 522-566.

Terraplus USA Inc. 2003. Syscal Pro standard & switch user's manual.

Villalobos A. 2010. Pirámides: procesos de edificación. *Tecnología constructiva mesoamericana*. *Arqueología Mexicana*, 17, 101, 56-63.