

XI

CONGRESO NACIONAL DE
AGUAS SUBTERRÁNEAS

11 - 13 de octubre, 2017 · Ciudad de Puebla



DEVELANDO EL INTERIOR DE LA PIRÁMIDE DEL CASTILLO DE CHICHEN-ITZA A TRAVÉS DE MÉTODOS GEOFÍSICOS NO CONVENCIONALES



¹Andrés Tejero, ²Gerardo Cifuentes, ²René E. Chávez, ³Denisse Argote,
²Esteban Hernández y ¹Alejandro García



¹Facultad de Ingeniería, Div. Ciencias de la Tierra, UNAM

²Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México

³Dirección de Estudios Arqueológicos, INAH

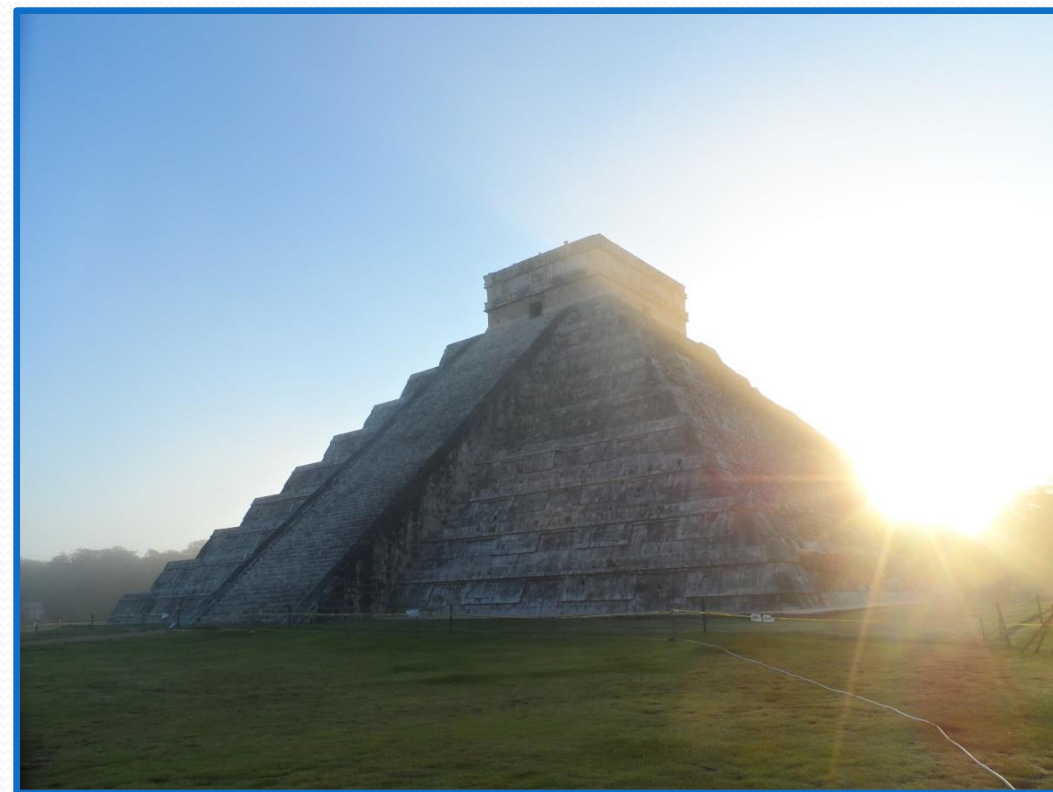
Puebla de Zaragoza, octubre de 2017

Hidrogeofísica-01



Antecedentes

- ❖ Se han encontrado bajo estructuras pre-Hispánicas importantes cavidades, probablemente dedicadas a ceremonias religiosas relacionadas con el *inframundo*.
- ❖ Estudios geofísicos previos realizados en los alrededores de la Pirámide de Kukulcán muestran evidencias de la existencia de un posible túnel hacia dentro de la Pirámide de KuKulKan

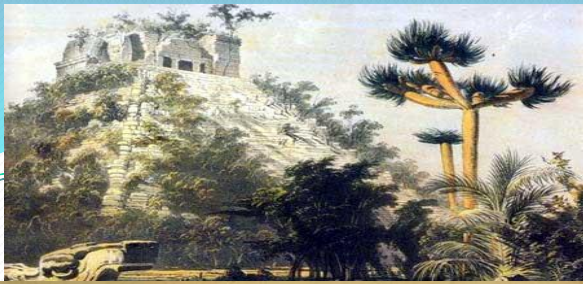


Pirámide de KuKulcán

Zona Arqueológica de Chichen Itzá



Pirámide El Castillo(1842-Hoy en Día)



Catherwood (1842)



Charnay (1860)



(1892)



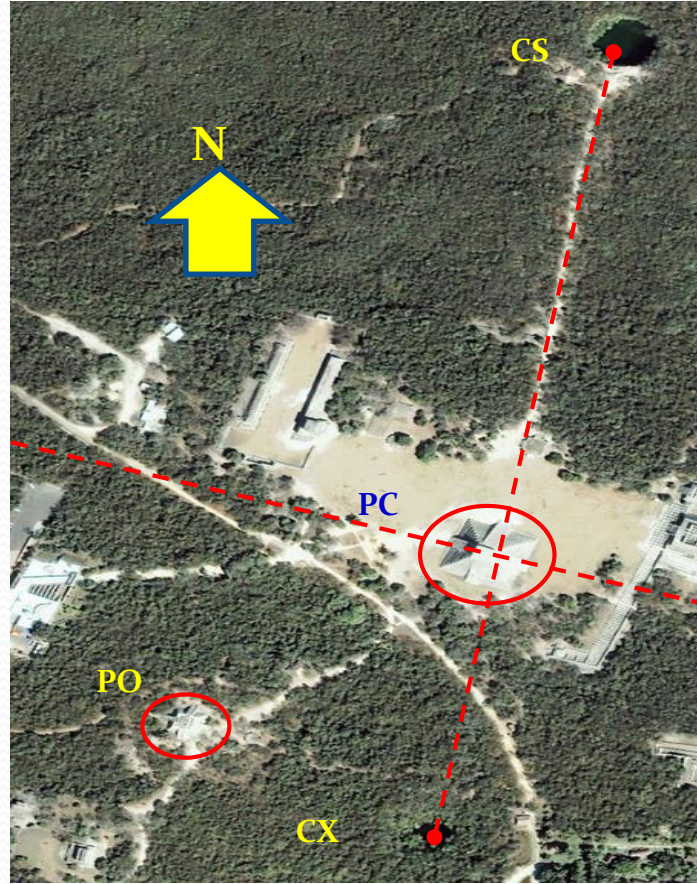
(1900)



(1928)



Paseos Turísticos(1925-40)



La ubicación de El Castillo (PC) coincide con el punto en el que los ejes asociados con el Cenote Sagrado (CS) y Xtoloc (CX), en su eje norte-sur, y los cenotes de Kanjuyum y Holtun en sus intersecciones del eje este-oeste, formando un patrón que podría estar asociado con el descenso mítico del sol a través de las regiones del mundo subterráneo en su viaje nocturno (Montero, 2013).



Hoy



Estudiando los alrededores de la Pirámide de Kukulcán en 1997



El GPR SIR-10



Sauck, Desmond, y Chávez, 1998)



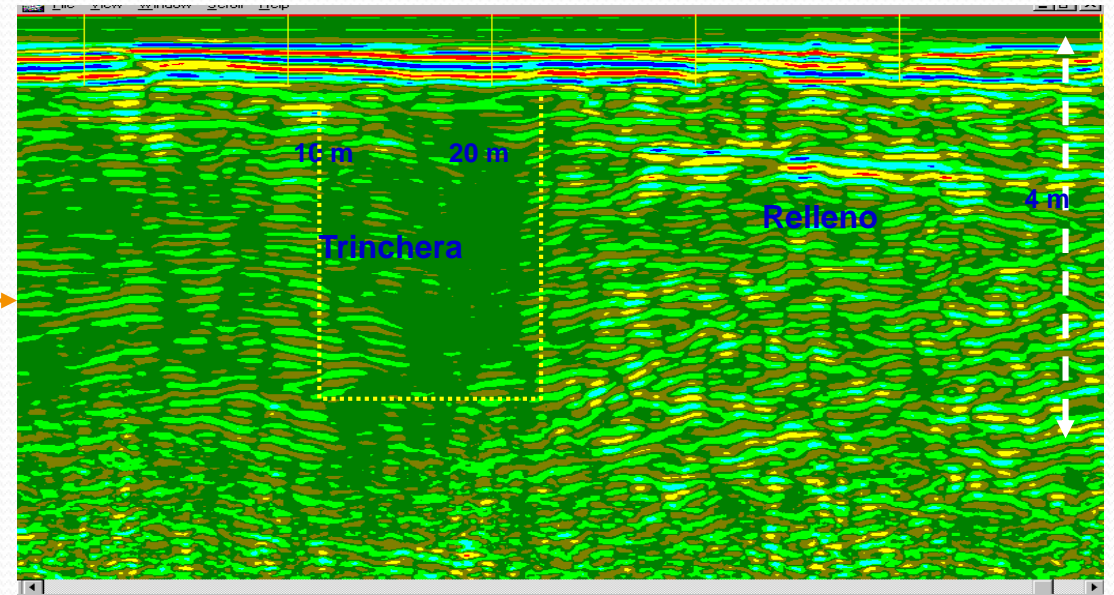
La antena de 60 MHz



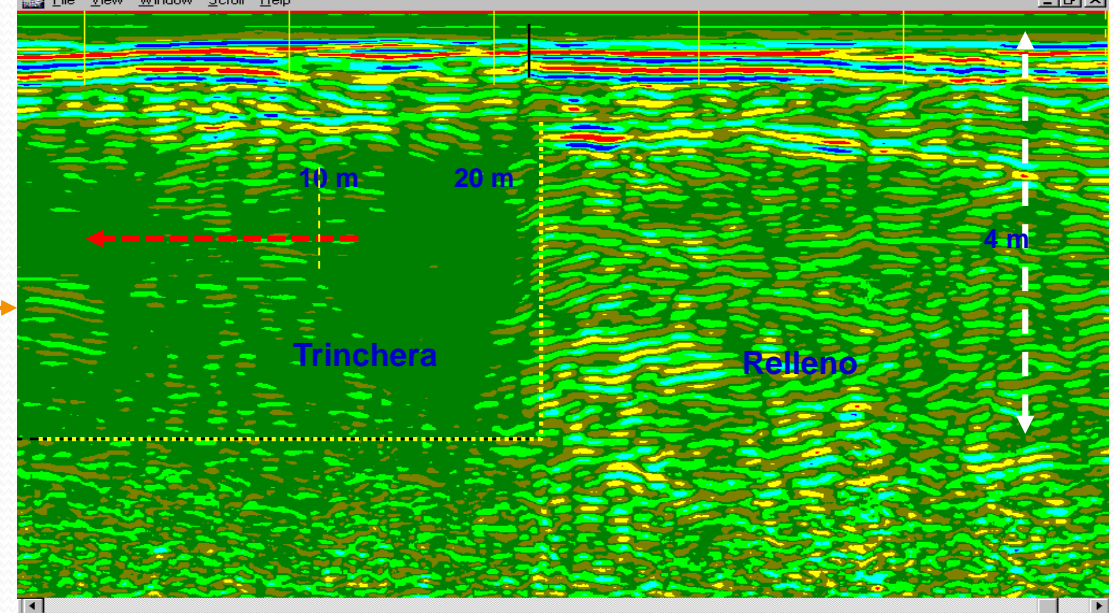
Perfiles de GPR: Evidencia de un posible túnel bajo Kukulcán?



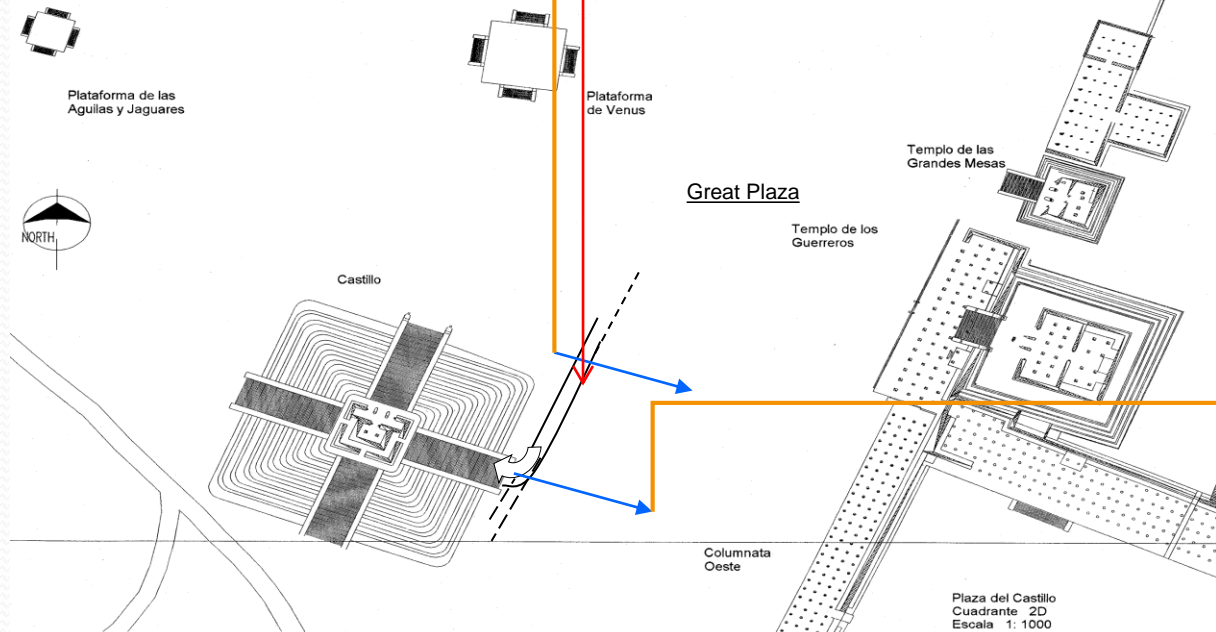
W E



(Sauck, et al., 1998)



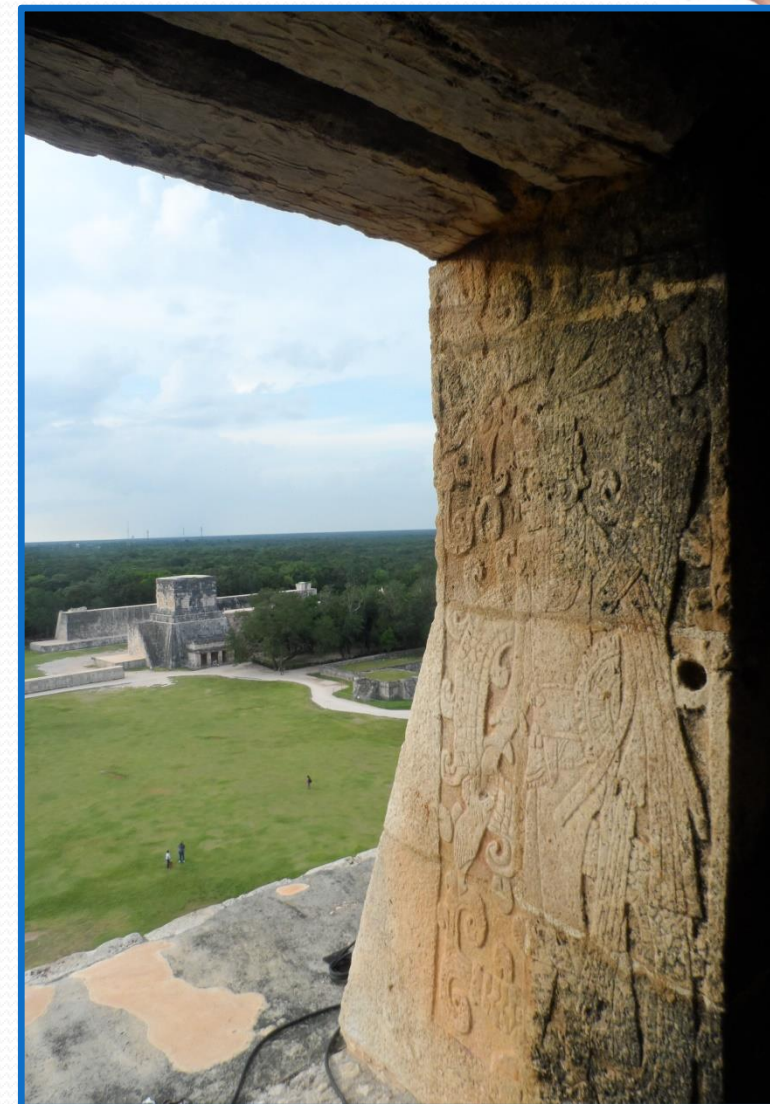
Excavación del 2010





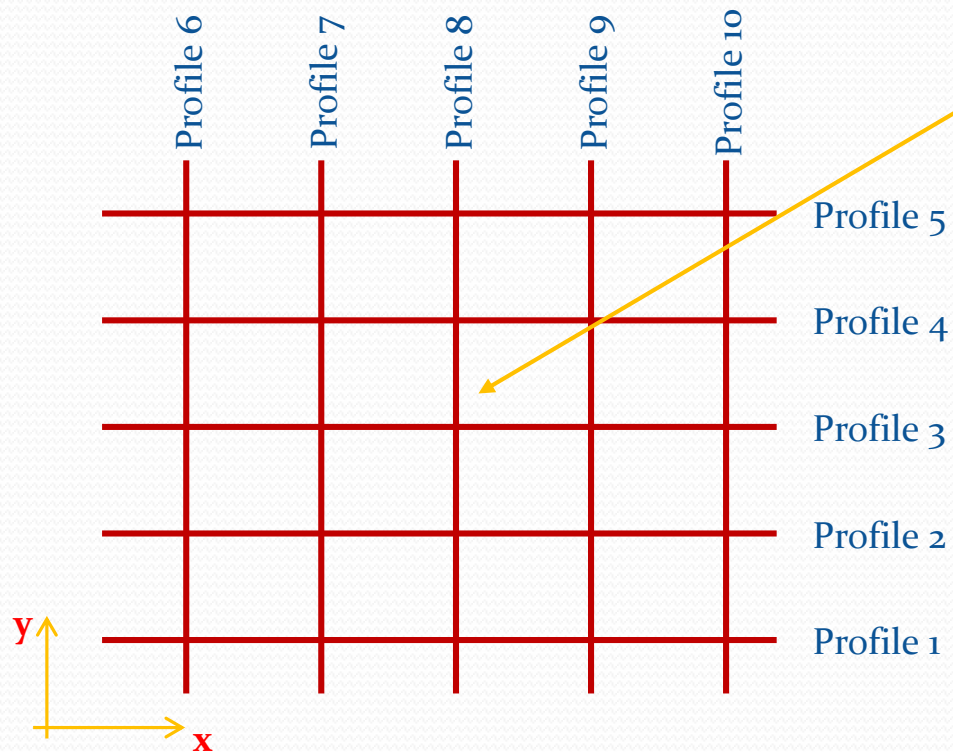
METODOLOGÍA TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

- En las dos últimas décadas la tomografía eléctrica resistiva en dos y tres dimensiones (TER2D Y TER3D) ha tenido un desarrollo vertiginoso.
- Eficientes algoritmos de inversión y equipos, que en forma automática pueden coleccionar gran cantidad de datos, han permitido el desarrollo de la TER 2D y 3D
- TER ha probado ser una herramienta útil para indicar qué zonas son de interés.



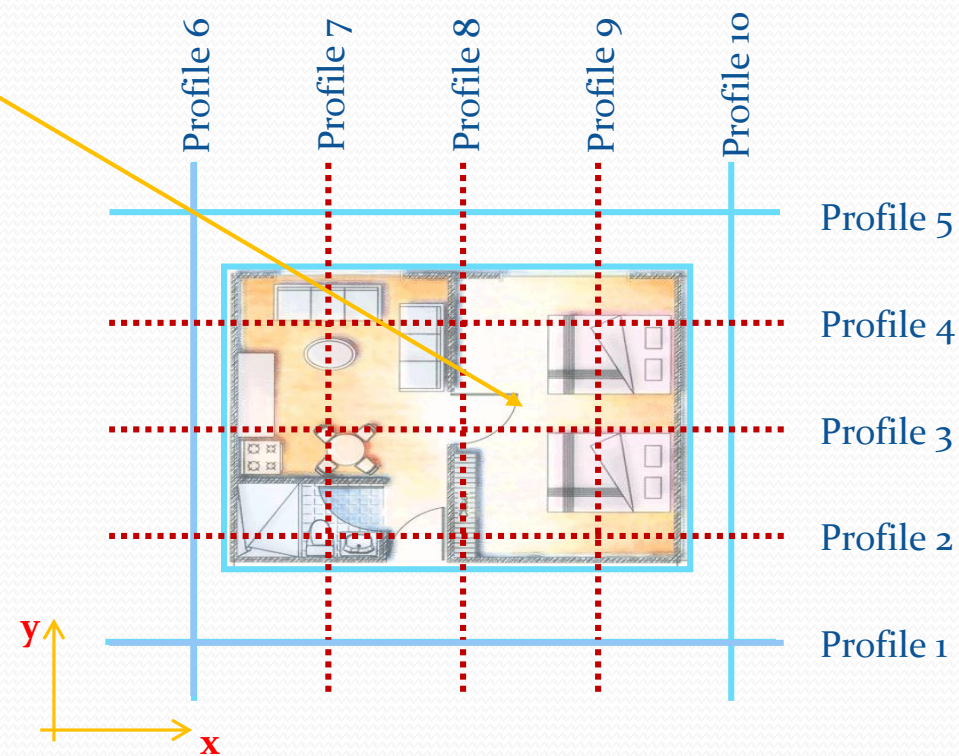
Vista desde lo alto del “Castillo”

Tomografía Eléctrica 3D en zonas urbanas y de interés histórico



Libre de obstáculos

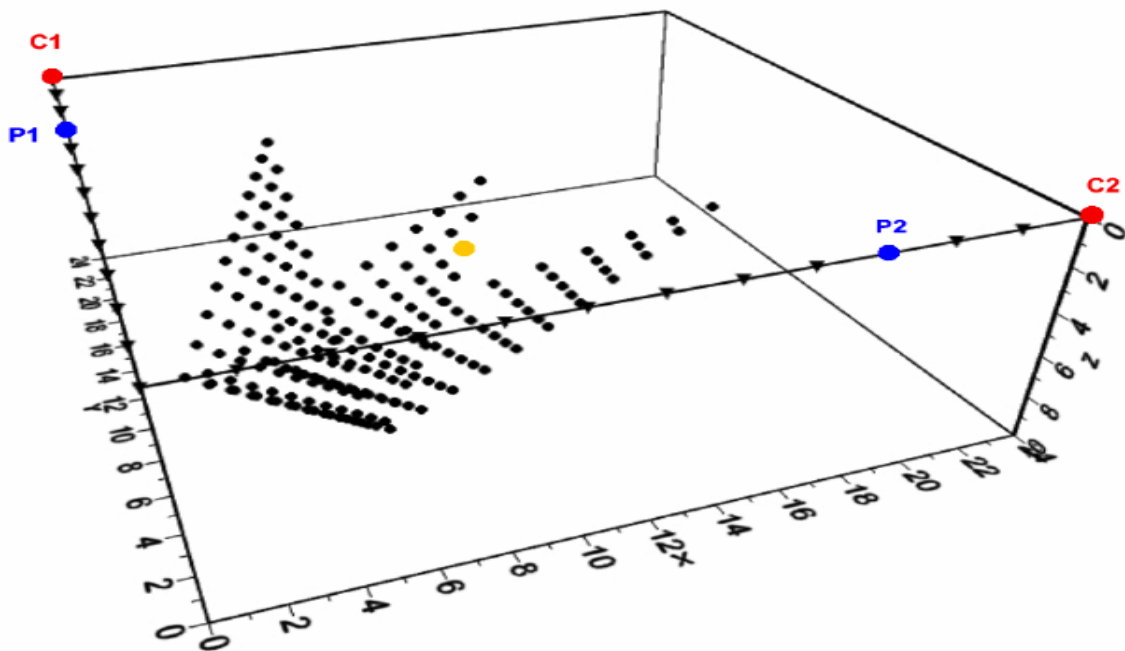
Área a estudiar



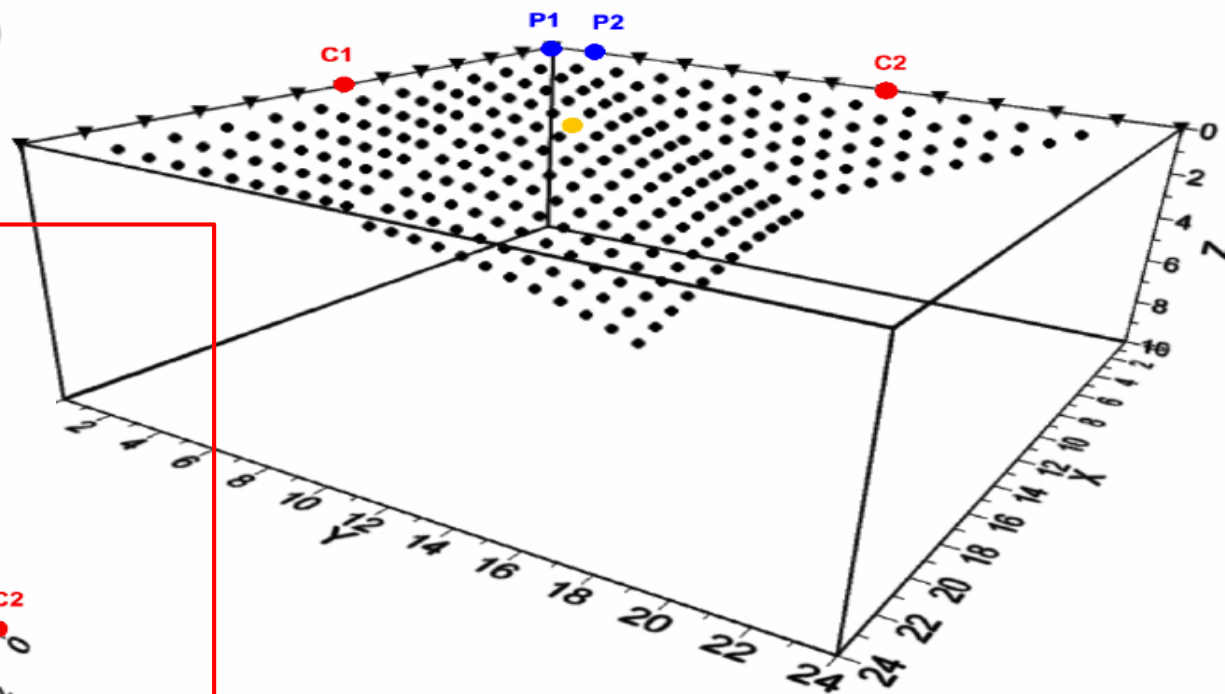
Con obstáculos

Secuencia de observaciones para un arreglo TER-3D

(Tejero et al, 2015; Chávez et al., 2014; Argote et al., 2013;) y seguidores (tesis):
(Chávez-Hernández, 2011; Aguilar, 2012; Iriarte-Sierra, 2012; Rodríguez-Aguilar, 2012; Sánchez-Vázquez, 2013).



Arreglo en "Esquina"



Arreglo en "L"

Y a partir de aquí se pueden diseñar diferentes combinaciones para formar diferentes geometrías (Chávez et al., 2015; Vargas-García, 2015).

A photograph of the Pyramid of Kukulcan at Chichén Itzá, Mexico, under a blue sky with scattered clouds. The pyramid is a large, stepped structure made of light-colored stone. The foreground is a grassy area with some trees and a paved path. The text is overlaid in yellow, bold, italicized font.

ESTUDIO DE TOMOGRAFIA

ELECTRICA 3D EN LA PIRÁMIDE

DE KUKULKAN

CHICHÉN ITZÁ, MÉXICO

FASE I 2014-2015

Objetivos (Fase 1):

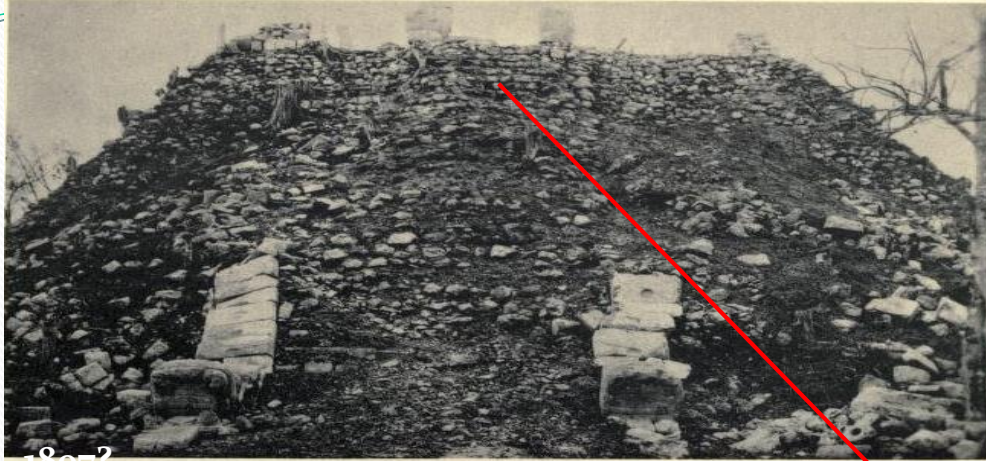


Pirámide El Osario

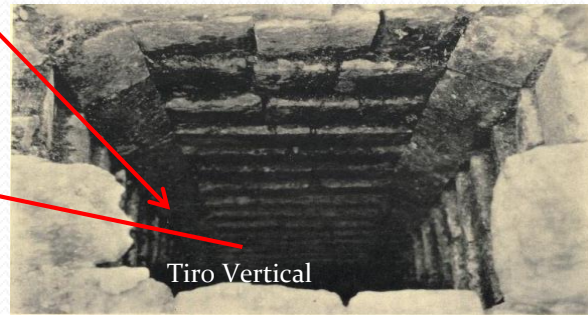
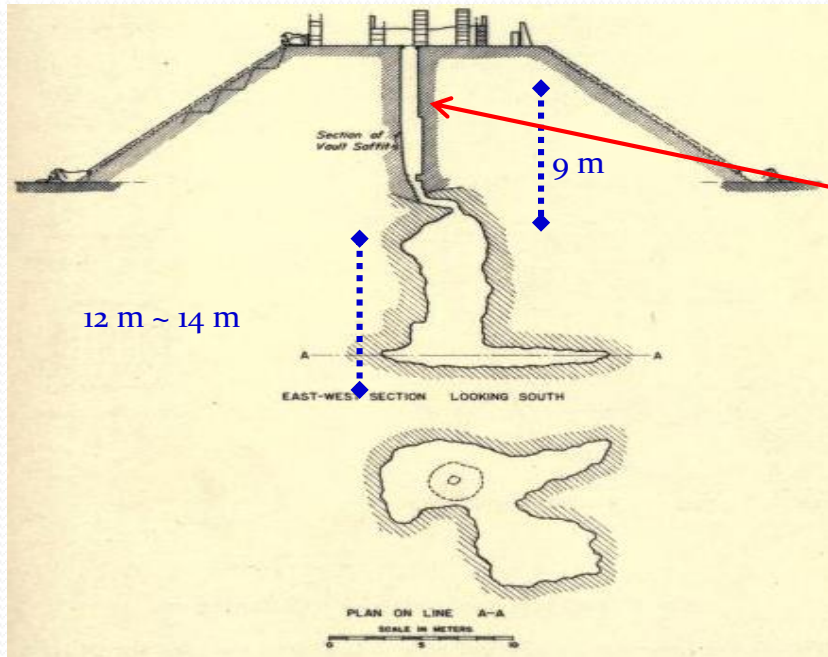
- ❖ Diseñar los arreglos de Tomografía de Resistividad Eléctrica Tridimensional (TRE-3D).
- ❖ Realizar una TER3D en la Pirámide el *Osario* con objeto de estudiar la modalidad de *Arreglo en L* y *Esquina* si es una técnica adecuada para TER3D .
- ❖ Determinar la distribución de la resistividad en el subsuelo, que permita reconocer las estructuras a profundidad.

Pirámide del Osario (Tumba del Sumo Sacerdote)

El Osario observado desde la parte superior



Today



E. Thompson (1857-1935)

Pirámide El Osario o Tumba del Sumo Sacerdote, fue construido como una versión reducida de la pirámide El Castillo cerca de 9 metros de altura (Schmidt, 2011). En la parte superior de El Osario, entre las dos primeras serpientes talladas, hay un eje de empedrado que desciende verticalmente a la base de la pirámide, entrando 12 metros de profundidad en una cueva natural. Esta cueva fue explorada por E. H. Thompson en 1897, se descubrieron siete tumbas, que contenían objetos de jade, cascabeles de cobre, cristal de roca y concha (Thompson y Thompson, 1938).

Dibujo Original de la Cavidad debajo EL Osario hecho por E. Thompson, (tomado de Thompson & Thompson, 1938)

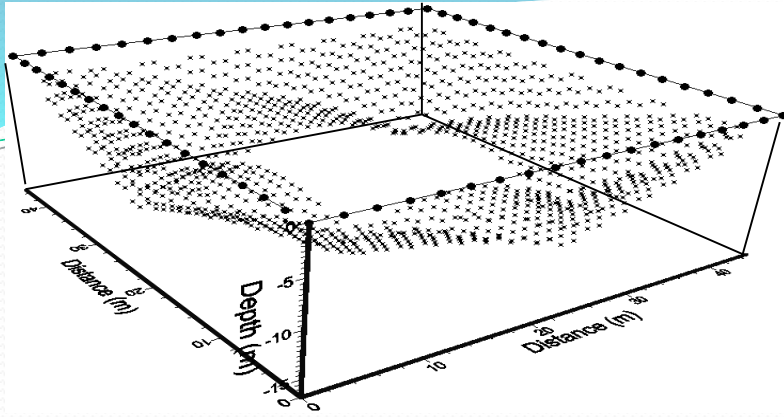
Estudio Geofísico (TRE-3D) en la Pirámide El Osario



Se emplearon 72 electrodos planos para rodear la estructura.

La distancia entre cada electrodo fue de 2.5 m.

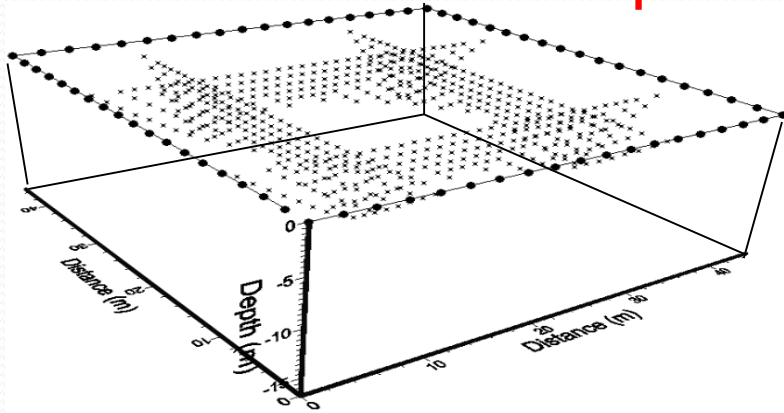
Diseño del Arreglo para TER-3D El Osario



Wenner-Schlumberger
perimetral

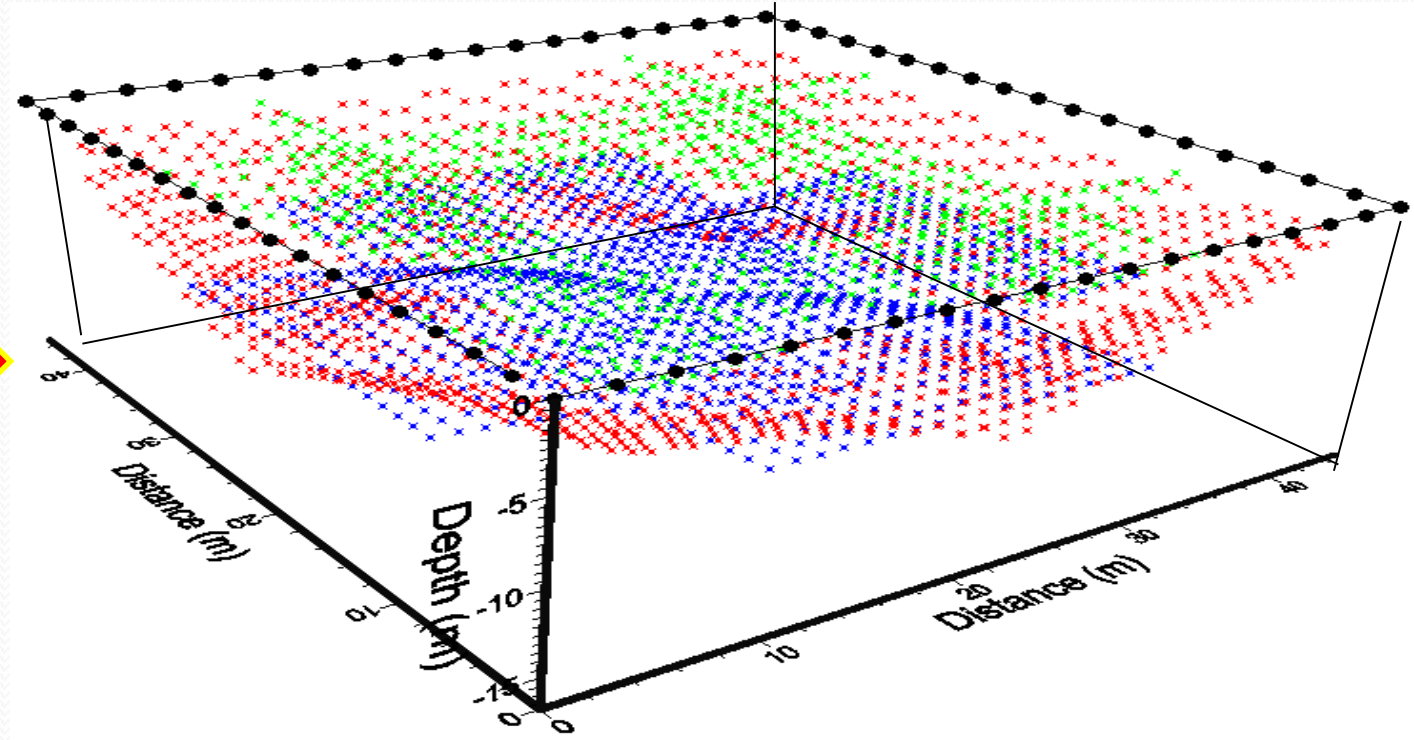
+

Acoplamiento
Mínimo



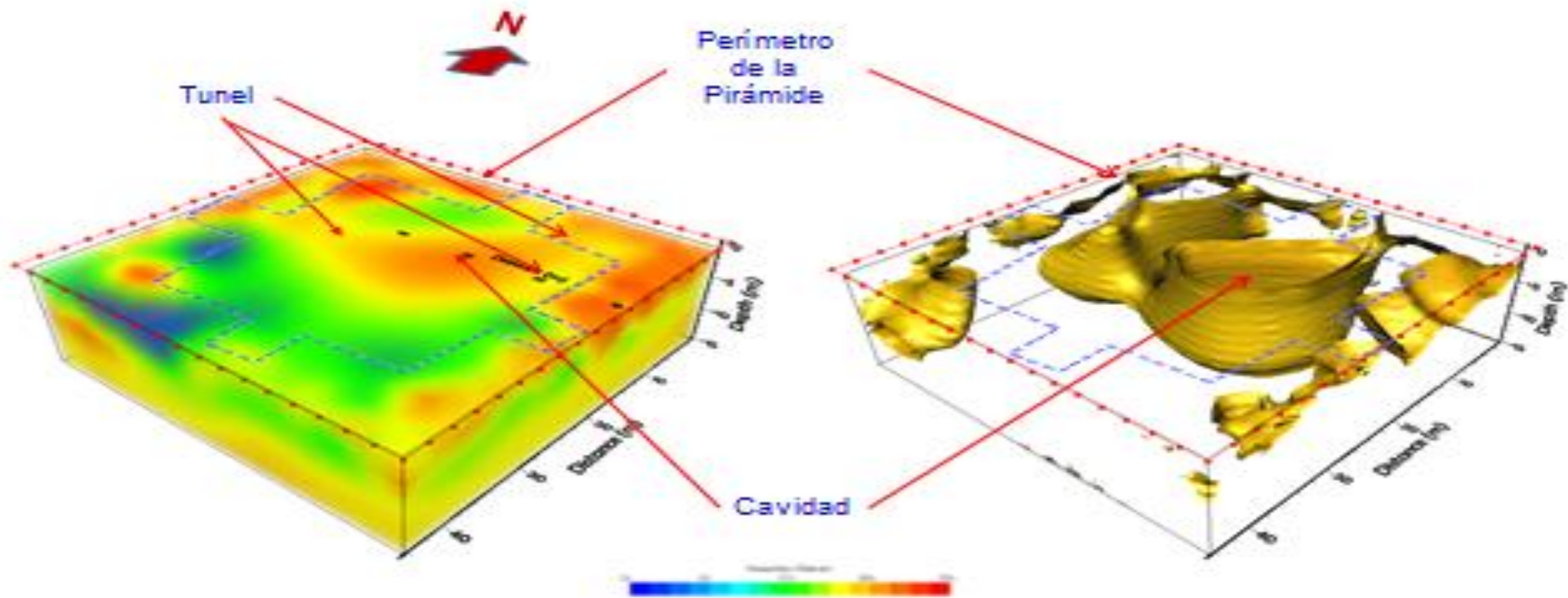
+

Wenner-Schlumberger
Gradiente



3550 Puntos de Observación

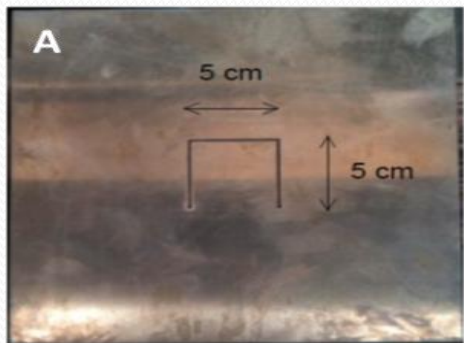
Modelo Resistivo: El Osario



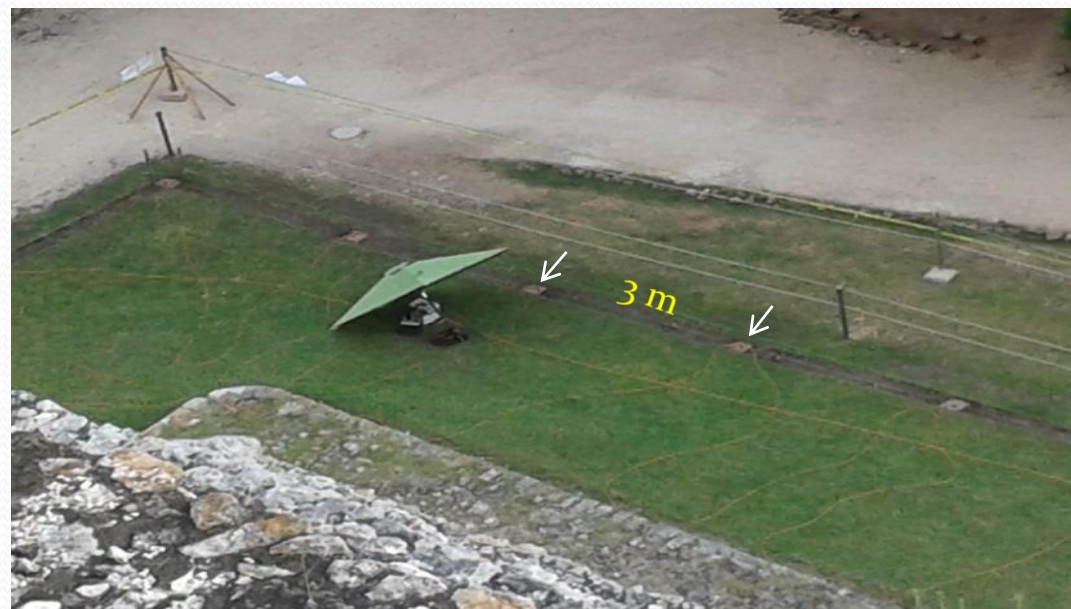


PIRÁMIDE DEL CASTILLO

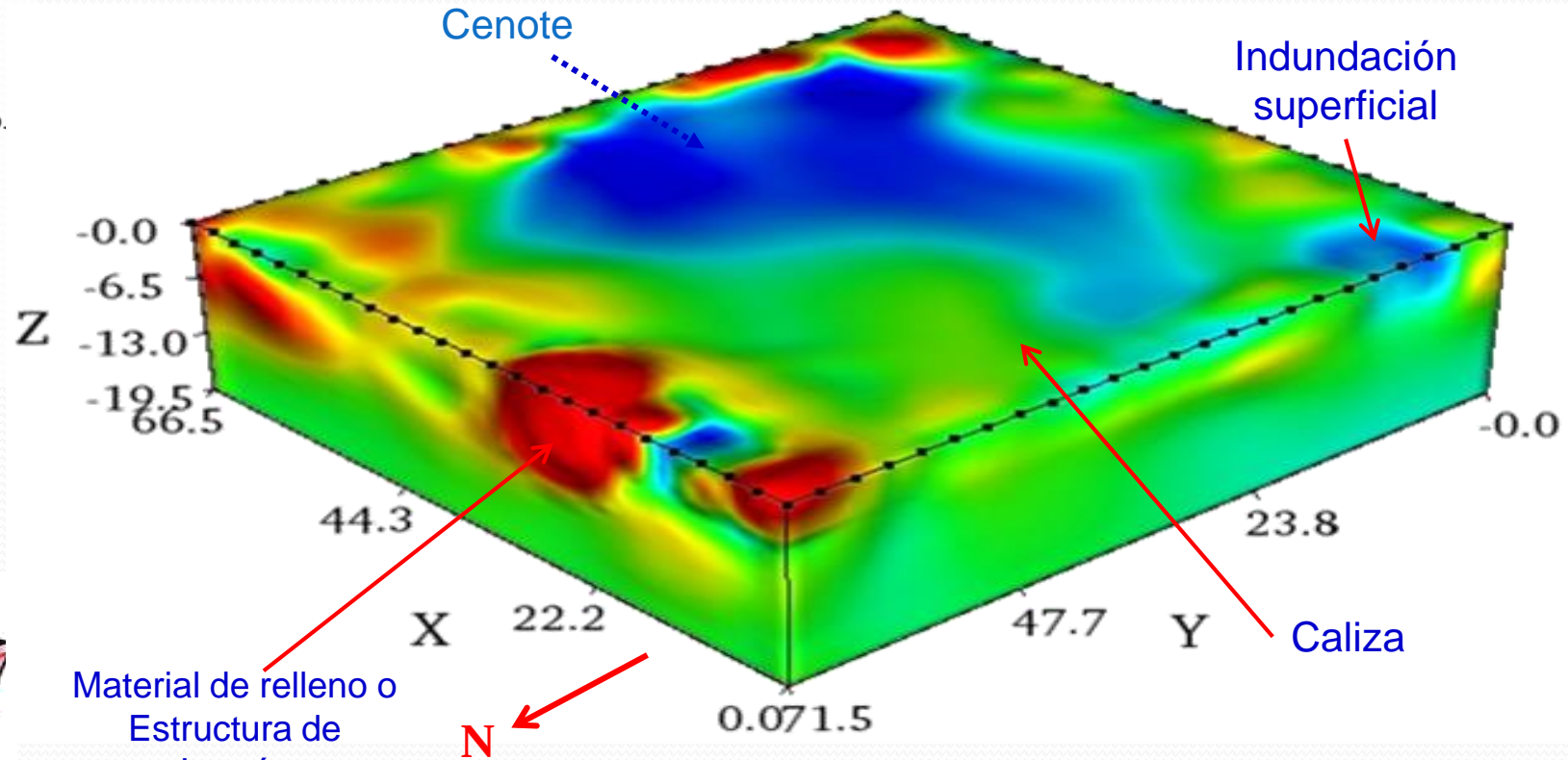
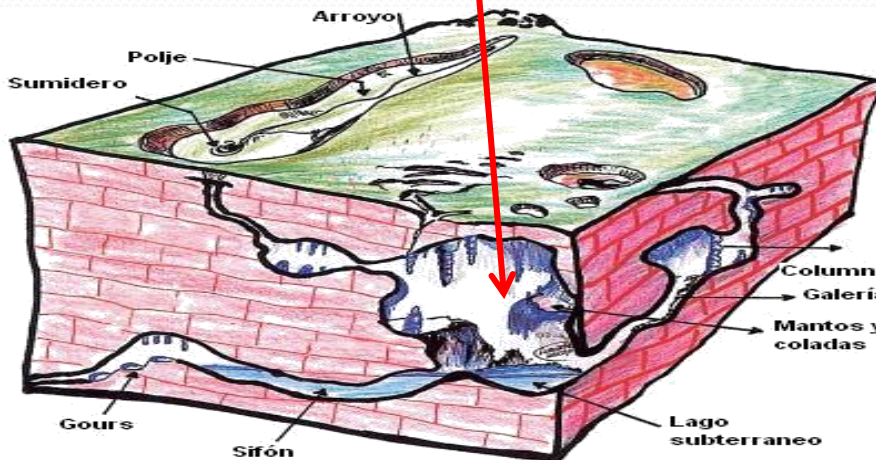
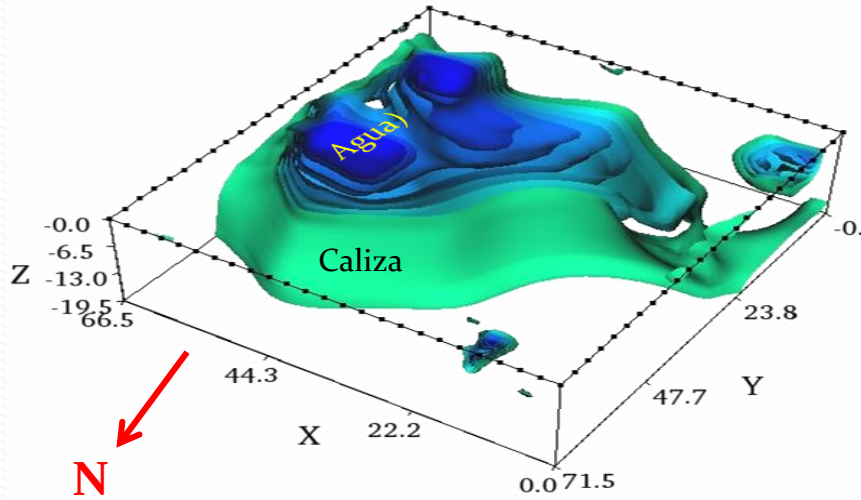
25 cm



25 cm

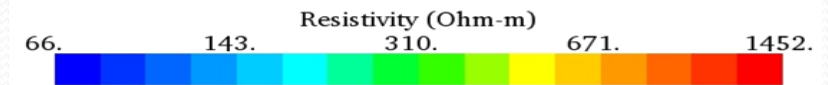


Modelo de Resistividad del Subsuelo: ¿hay algo por debajo de la pirámide (Cenote)?

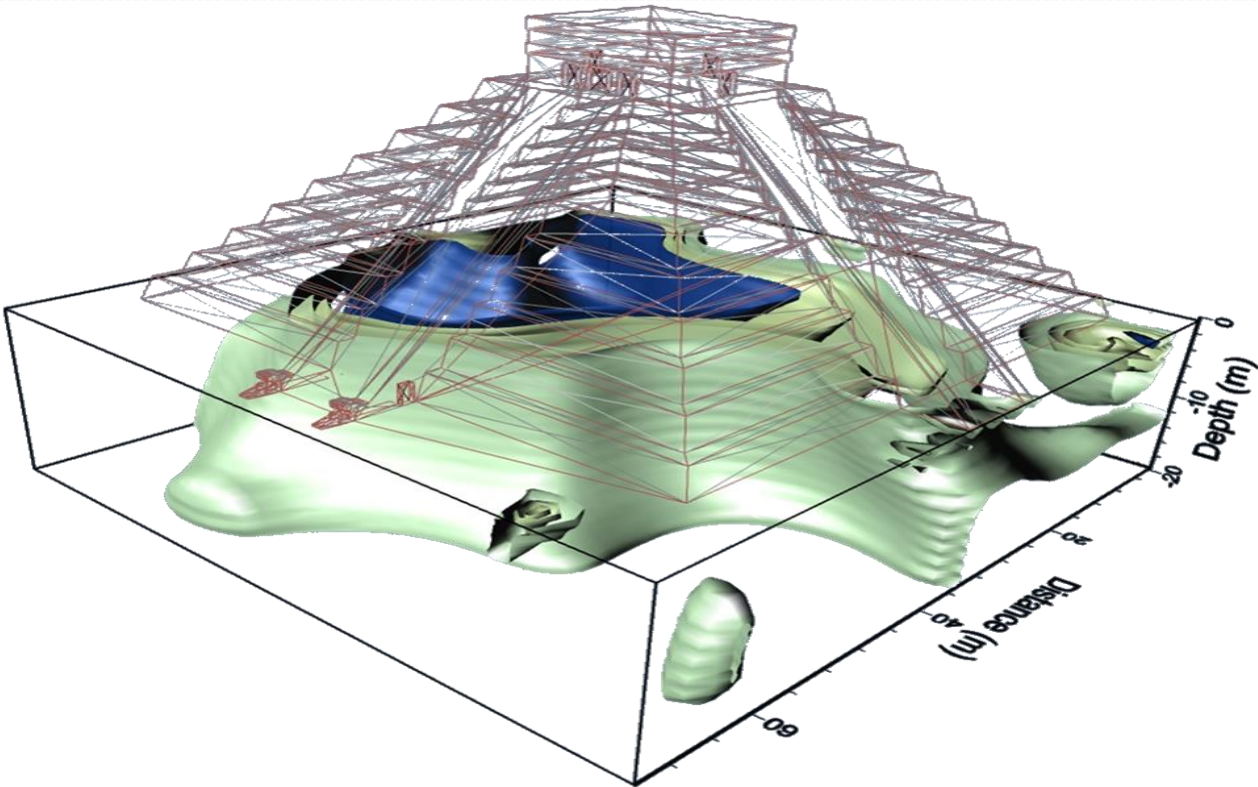
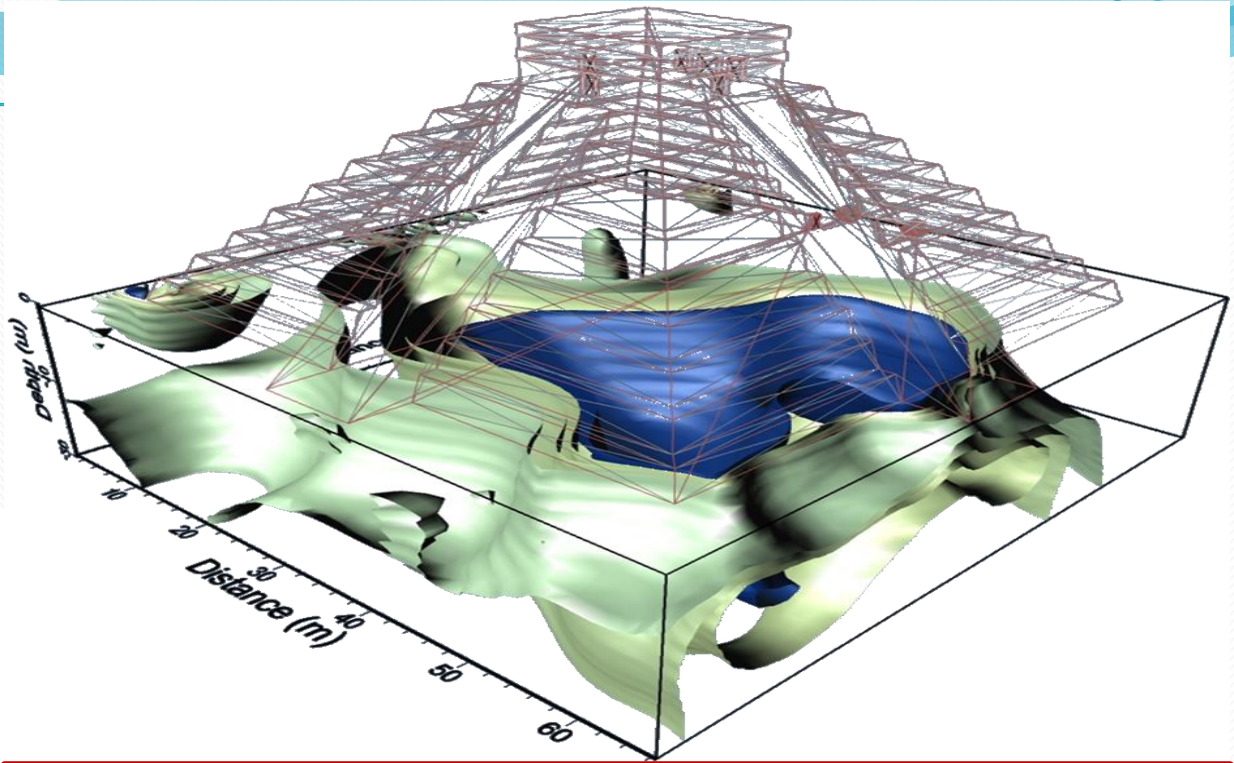


Material de relleno o Estructura de Interés

Subsuelo Kárstico



Cavidad Kárstica parcialmente llena de agua bajo la Pirámide El Castillo



PREGUNTAS:

- ❖ Sin embargo, ¿Sabían los antiguos Mayas de este Karst subterráneo?
- ❖ Si es cierto, ¿Por qué los Mayas construyeron este enorme templo en la parte superior de este Karst ?

A photograph of the Pyramid of Kukulcan at Chichén Itzá, Mexico. The pyramid is a large, stepped stone structure with a prominent staircase on the left side. It is set against a blue sky with scattered white clouds. The foreground is a green lawn, and there are trees and foliage framing the top and right sides of the image. The text is overlaid in yellow, bold, italicized font.

ESTUDIO DE TOMOGRAFIA

ELECTRICA 3D EN LA PIRÁMIDE

DE KUKULKAN

CHICHÉN ITZÁ, MÉXICO

FASE II 2015-2016



Los Objetivos de la segunda fase de este proyecto son:



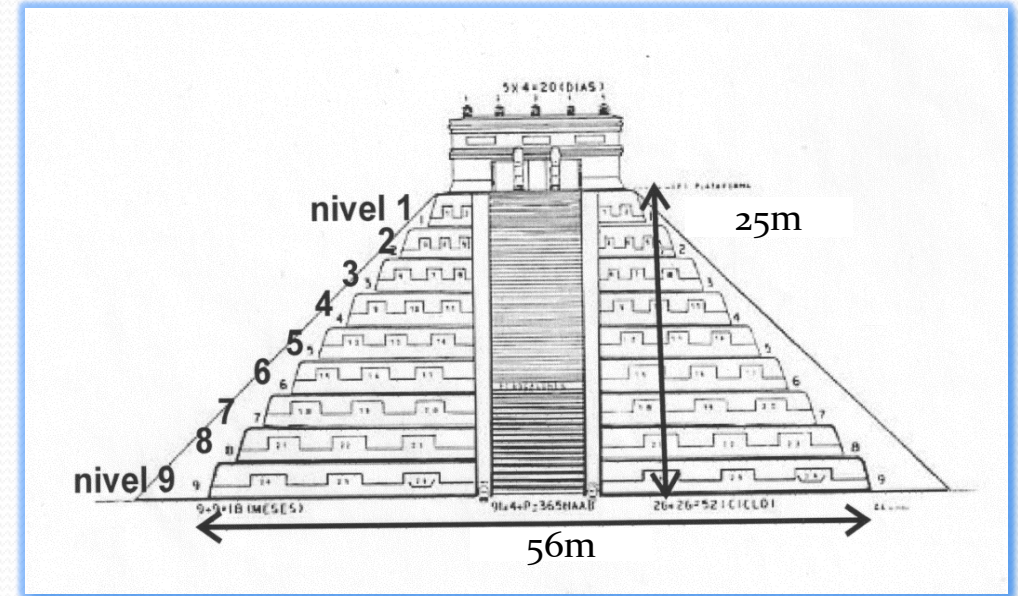
- ❖ Repetir el estudio del 2014 para verificar la existencia de la oquedad ('cenote') bajo El Castillo.
- ❖ Determinar la posible existencia de otras subestructuras al interior del Castillo, además de la que ya se conoce (desde 1935).



'ILUMINACION' del interior de El Castillo: ¿cómo lo hicimos?

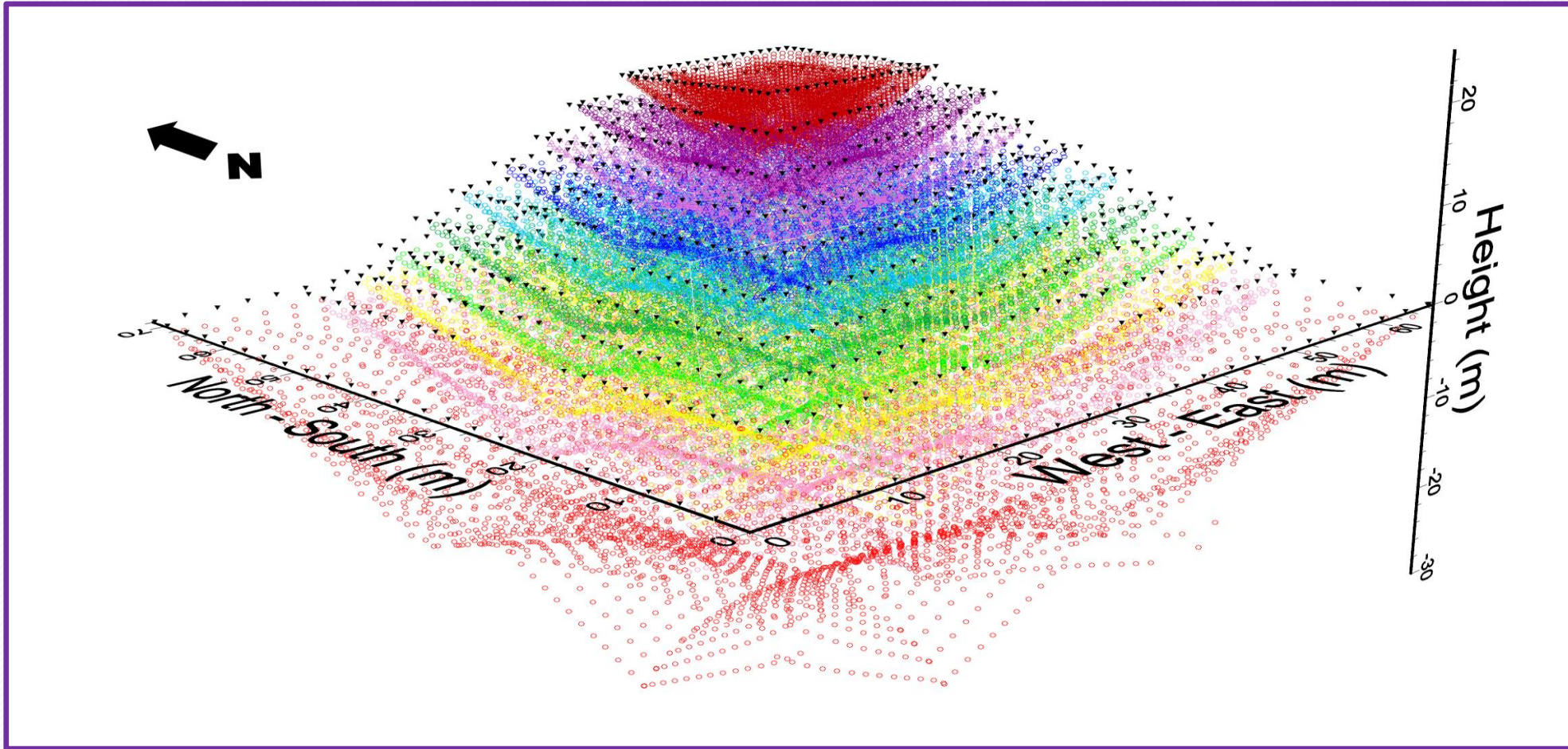
Como sabemos:

1. El castillo consta de 9 Niveles o Cuerpos piramidales. El décimo corresponde a la base.
2. Se colocaron electrodos planos en cada cuerpo de la pirámide, de arriba hacia abajo.
3. Se realizó un perfil de TER-2D sobre la primera subestructura en el interior de El Castillo



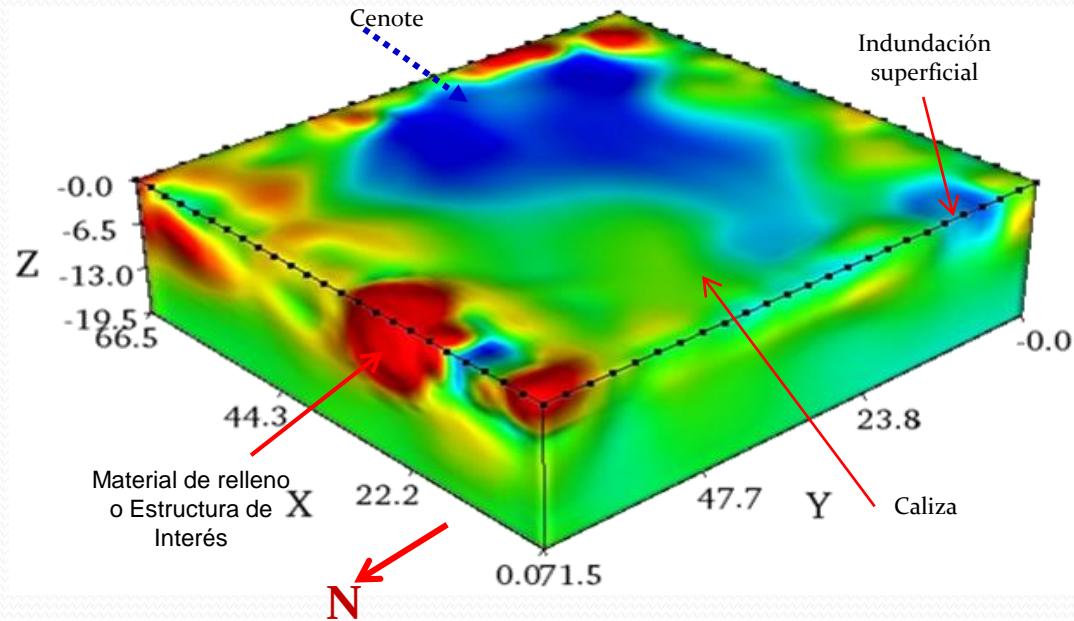


ILUMINACION DE LOS 10 NIVELES DE LA PIRAMIDE DE KuKulkan

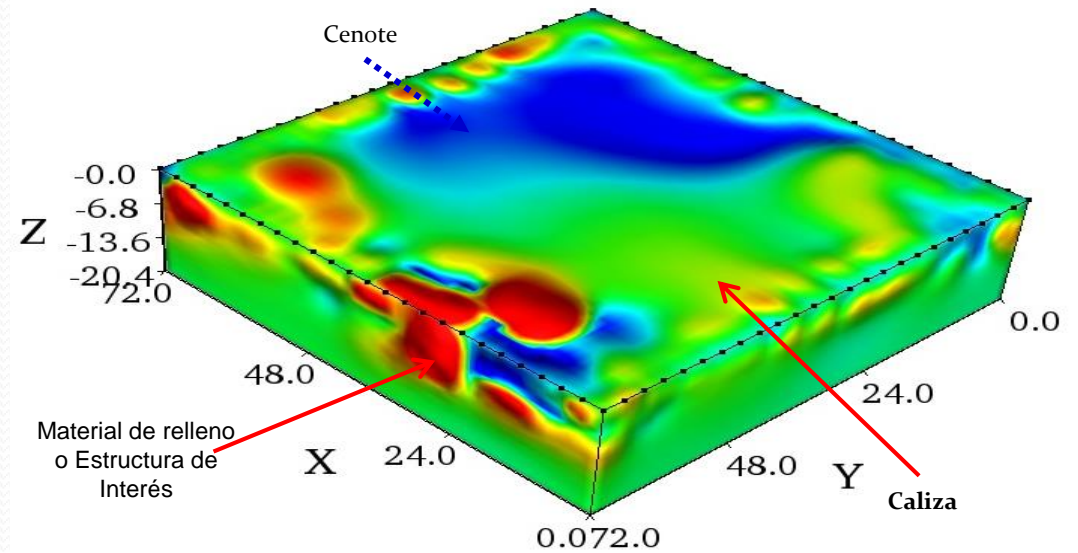


Número de Observaciones
37,539

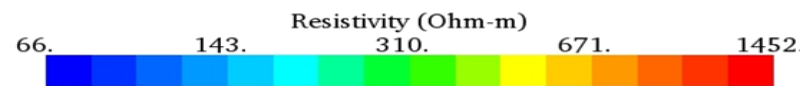
En la Fase I (2014) el objetivo principal fue estudiar el subsuelo debajo El Castillo, donde se descubrió una cavidad Kárstica. Este descubrimiento importante motivó hacer el estudio de todos los Niveles de la Pirámide El Castillo en la Fase II.



Fase I, 2014
A



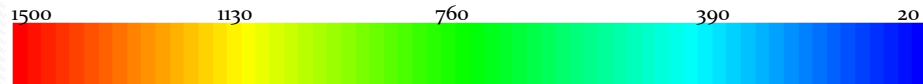
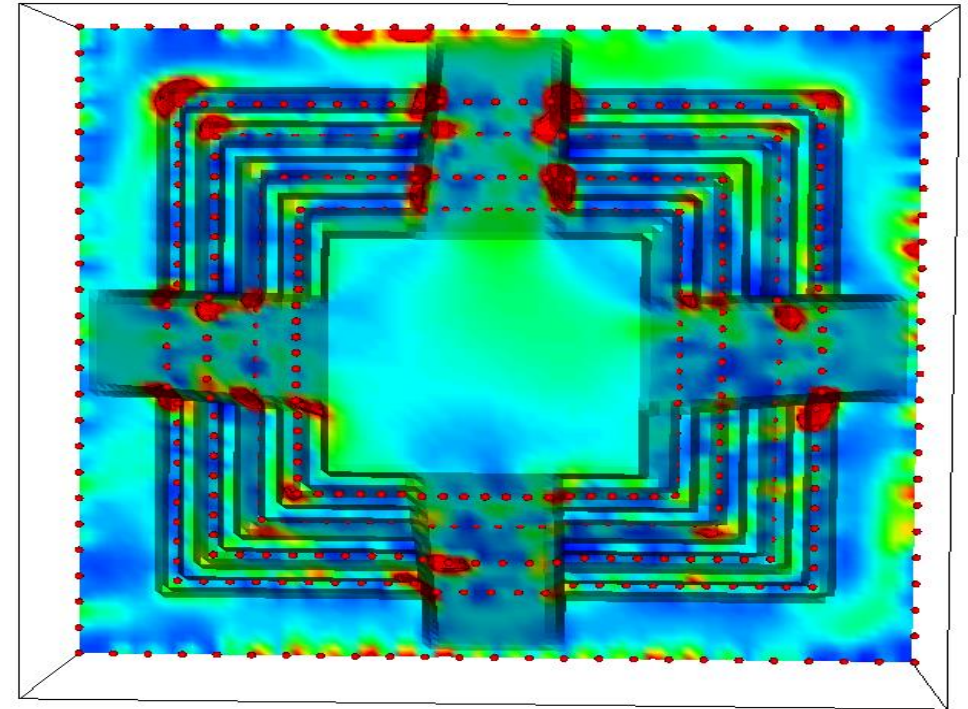
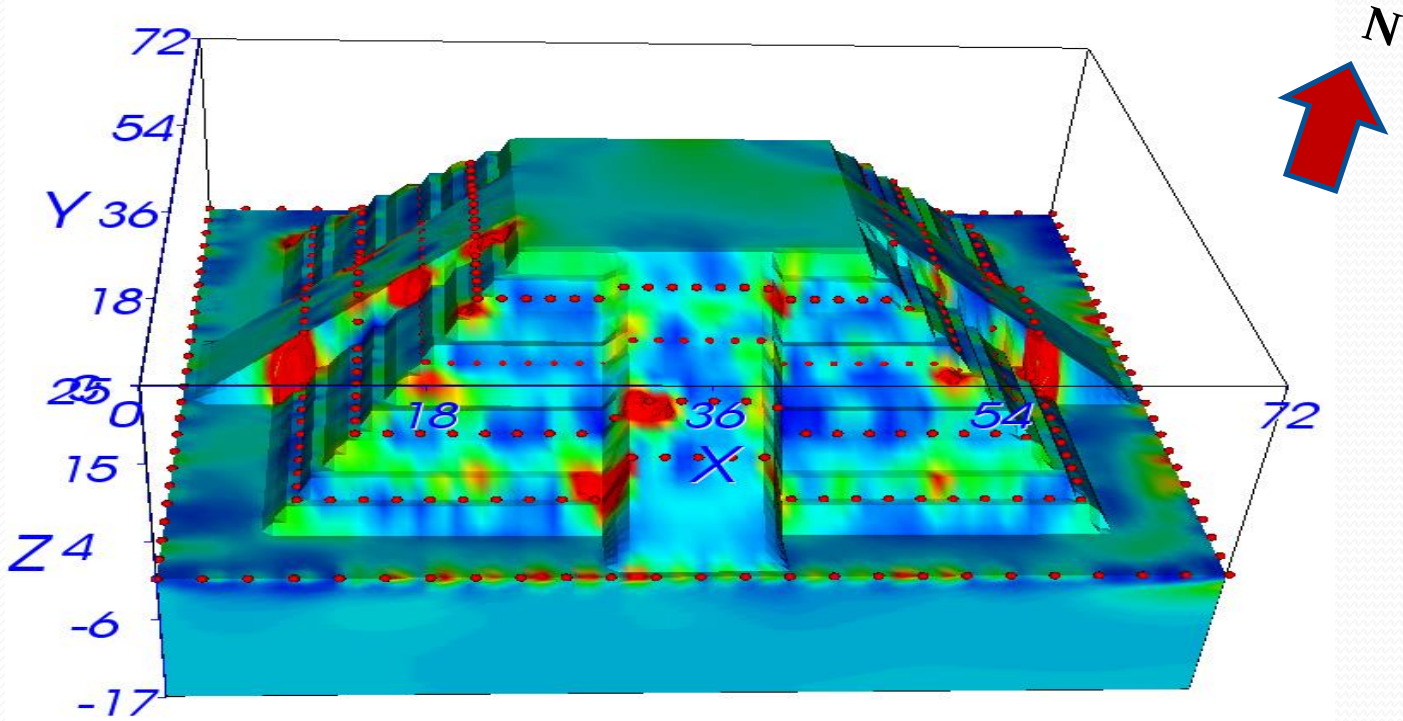
Fase II, 2015
B



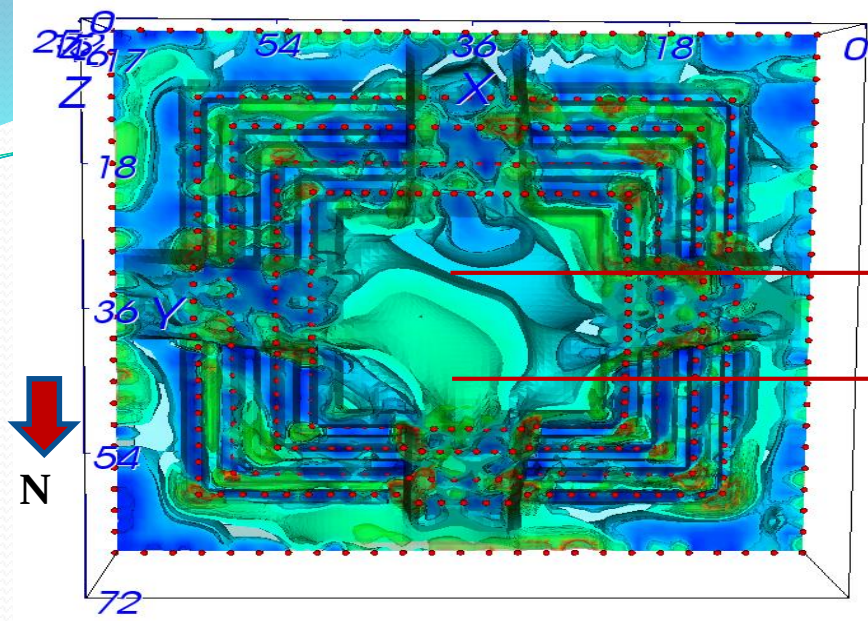
Las Figuras A y B Muestran la TER-3D del Nivel 10, donde los rasgos principales se marcan en ambas TER3D. Esto confirma, en forma indirecta, la calidad de los datos observados.

PIRAMIDE “EL CASTILLO”

TER3D NIVELES 10,9,7,5 y 3

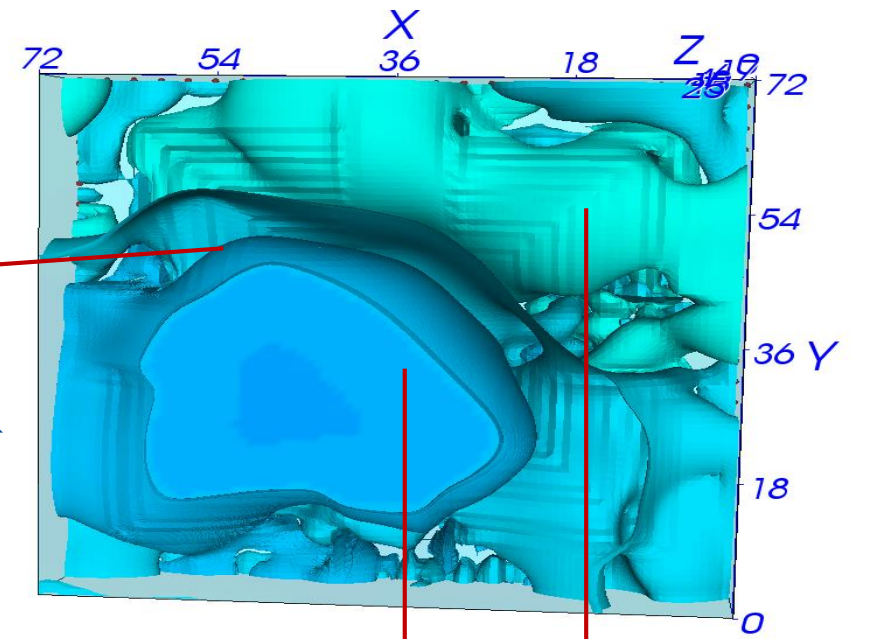


La inversión de los niveles 10,9,7,5 y 3 refleja características exteriores de la pirámide del castillo.



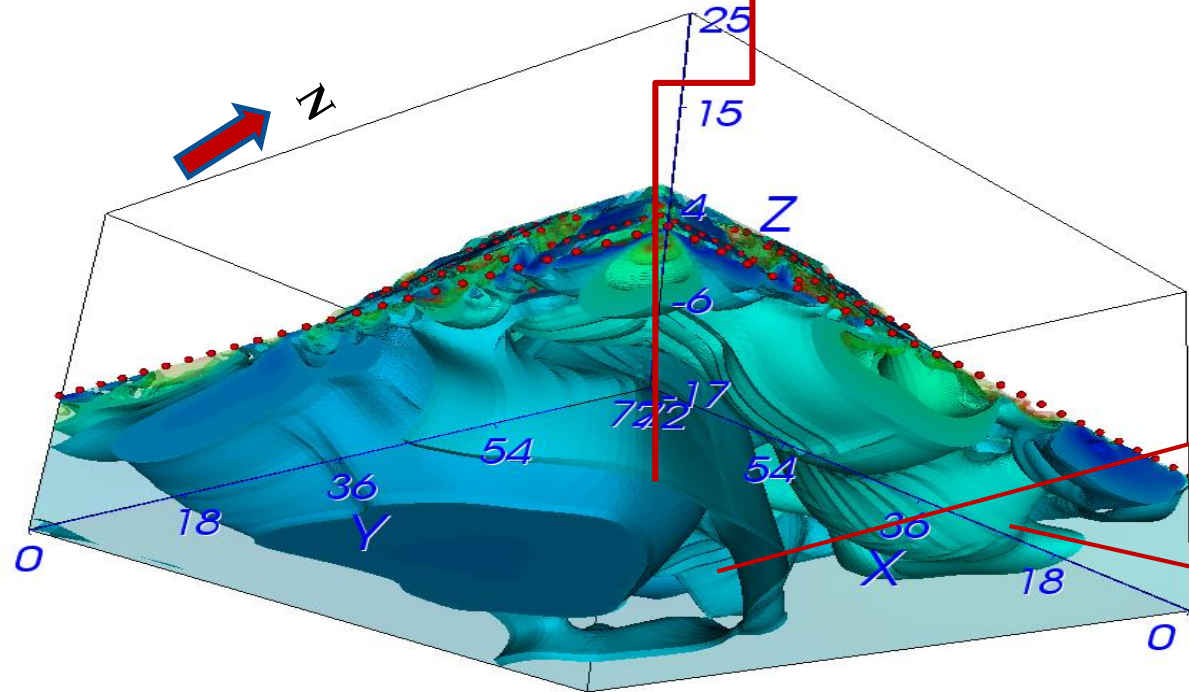
CALIZA

RELLENO

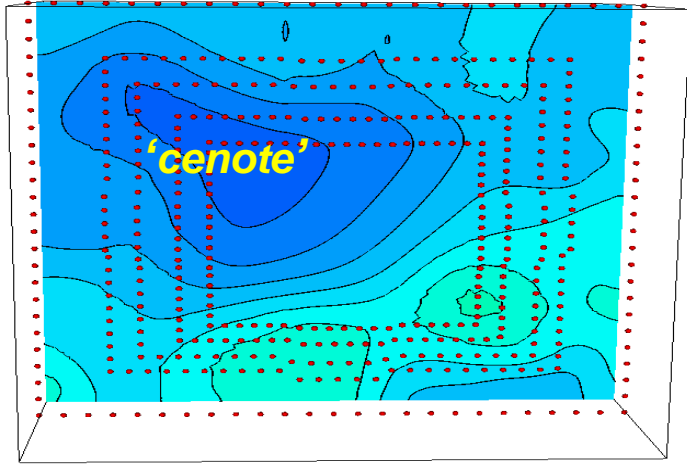


CENOTE

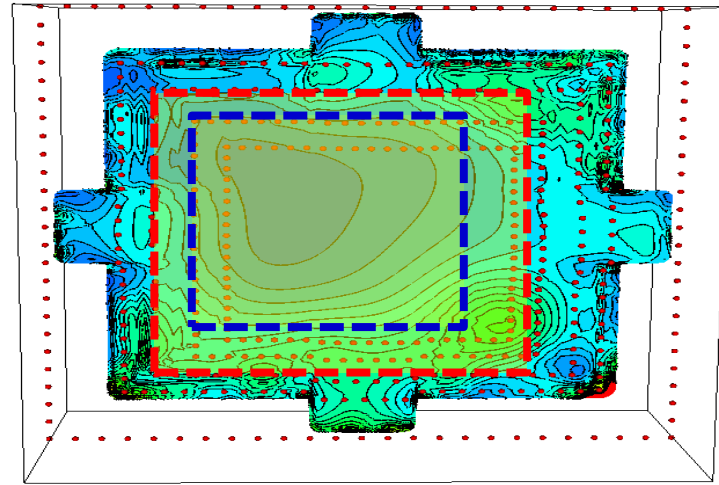
RELLENO



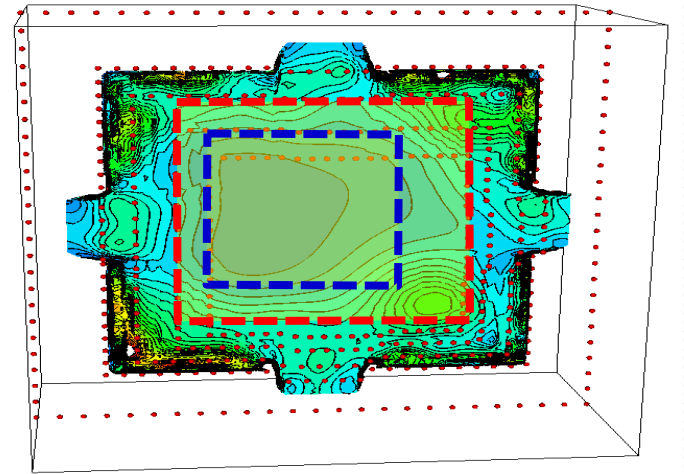
Analizando el modelo: Cortes a profundidad



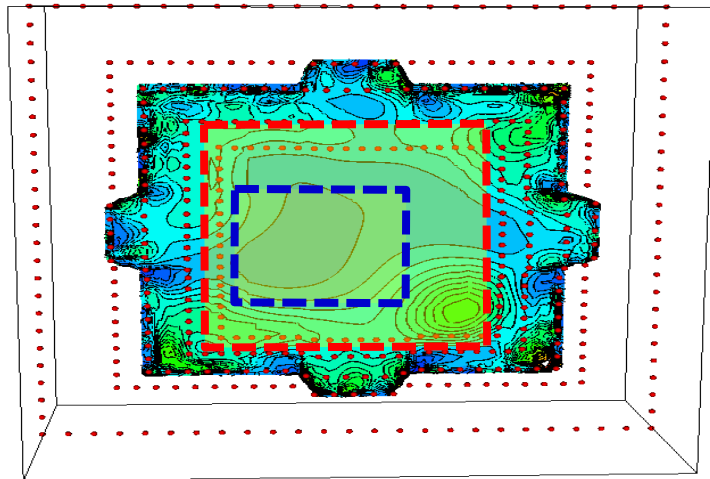
Z=-6 m



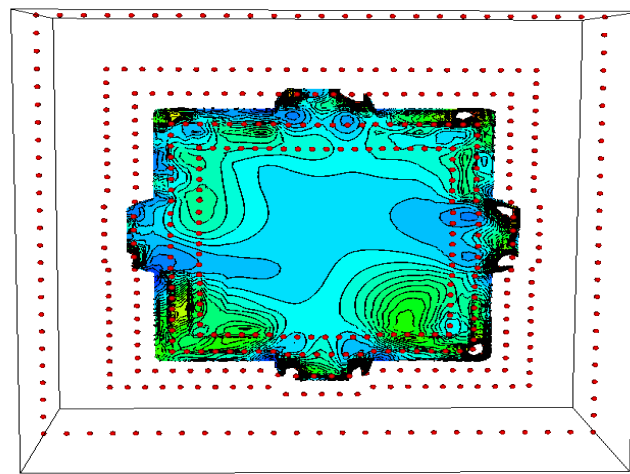
Z= 0 m



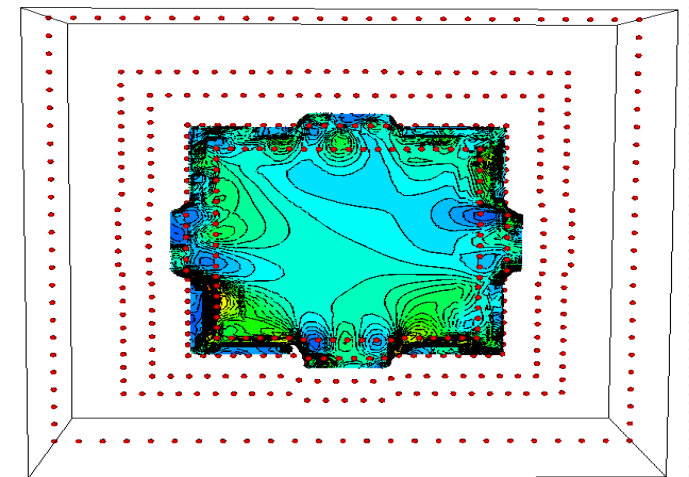
Z= 4 m



Z= 8 m

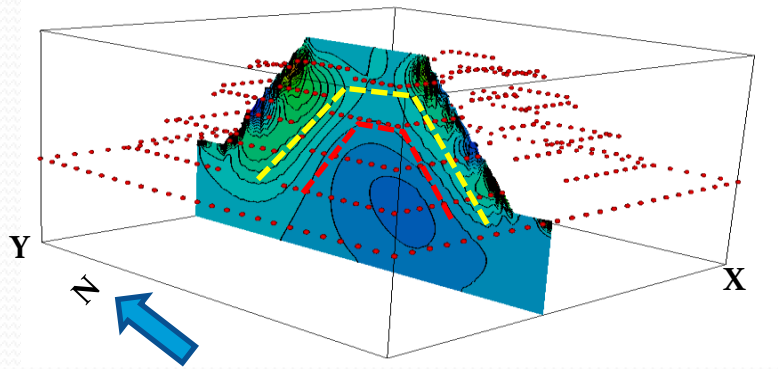


Z= 12 m

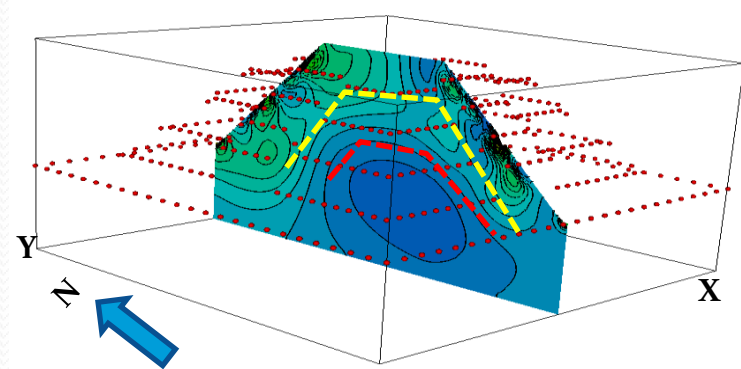


Z= 16 m

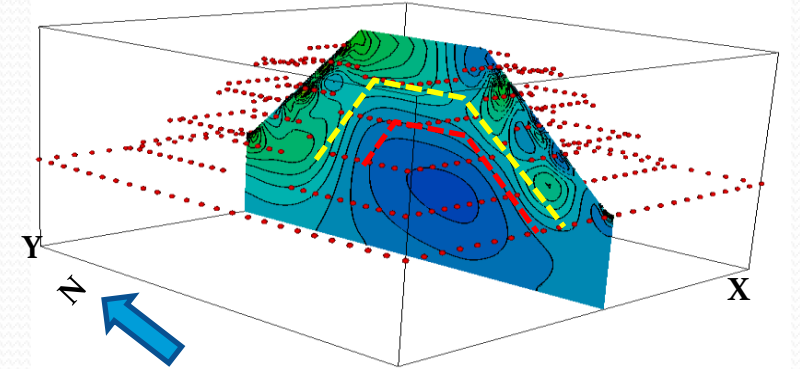
Analizando el modelo: Cortes laterales N-S



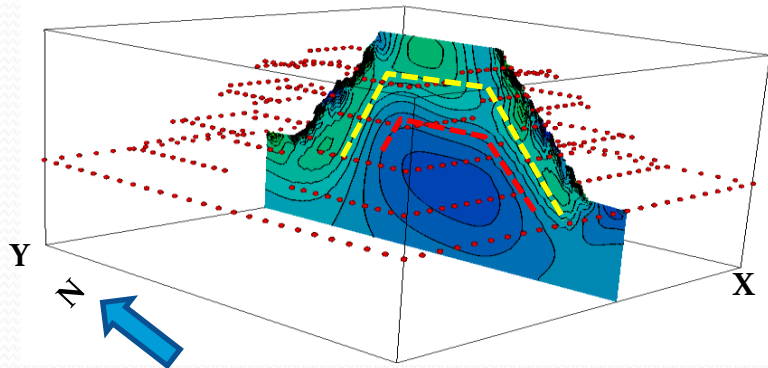
X = 29 m



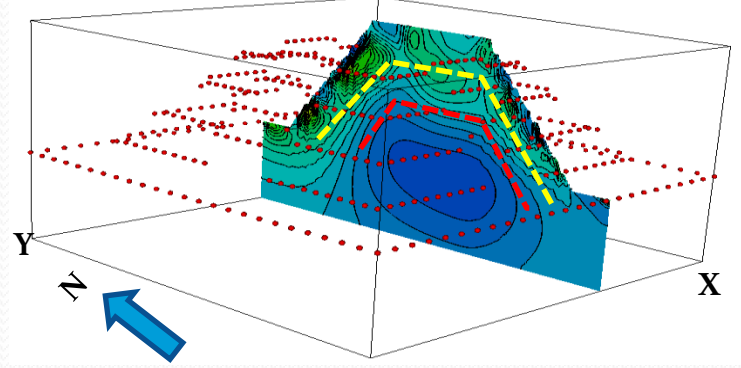
X=34 m



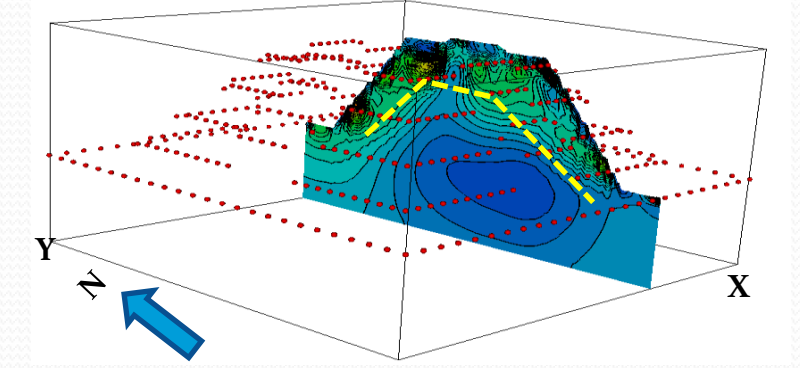
X=38 m



X=42 m

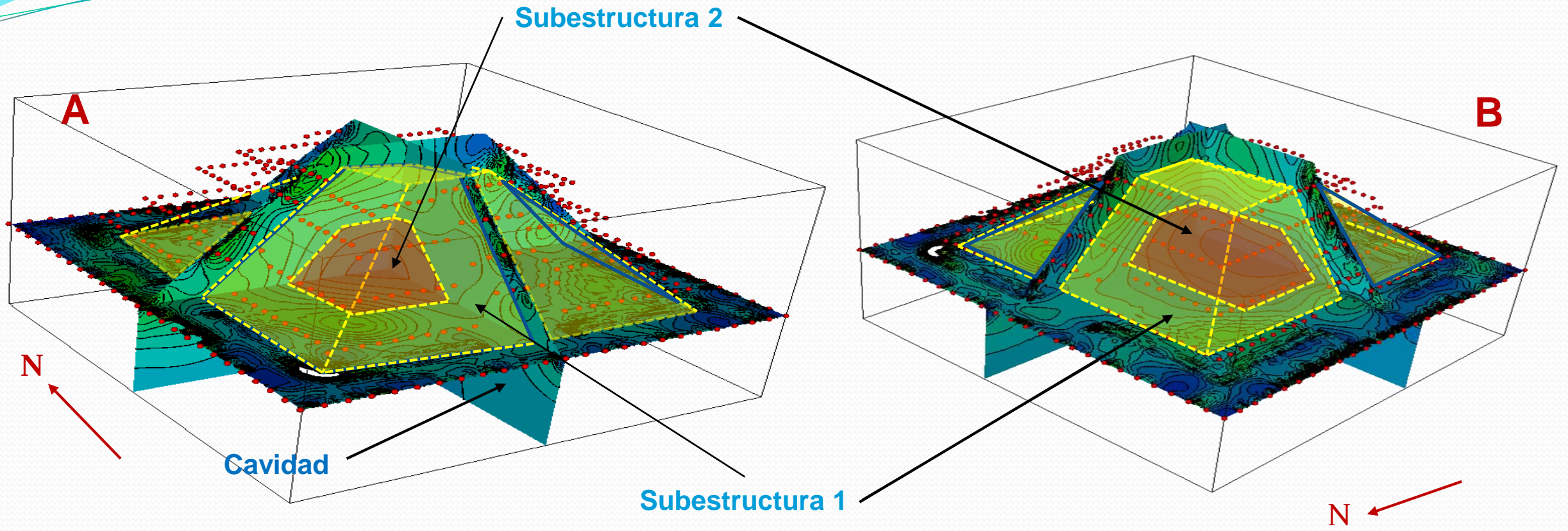


X=46 m



X=50 m

Interpretación integrada

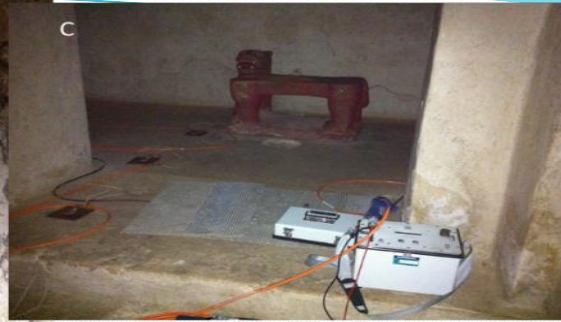


1500 1130 760 390 20

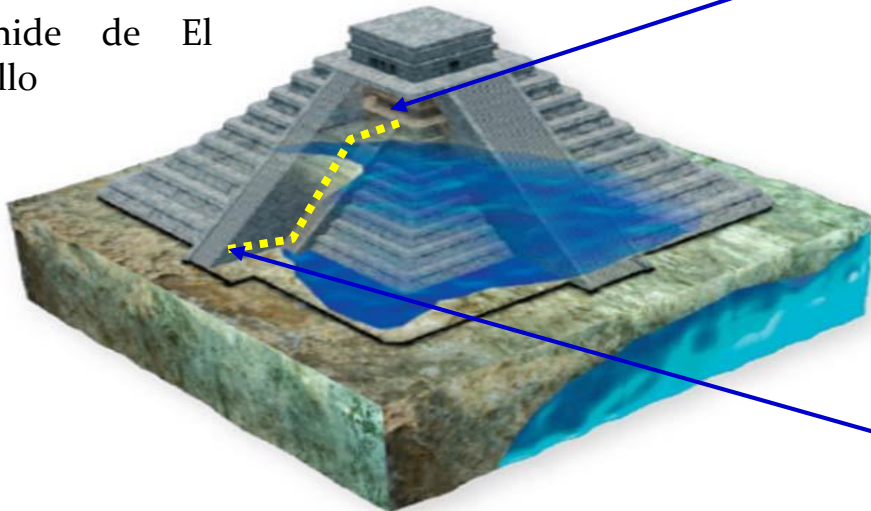
Ohm-m

Se pueden inferir la posición y el tamaño de las subestructuras

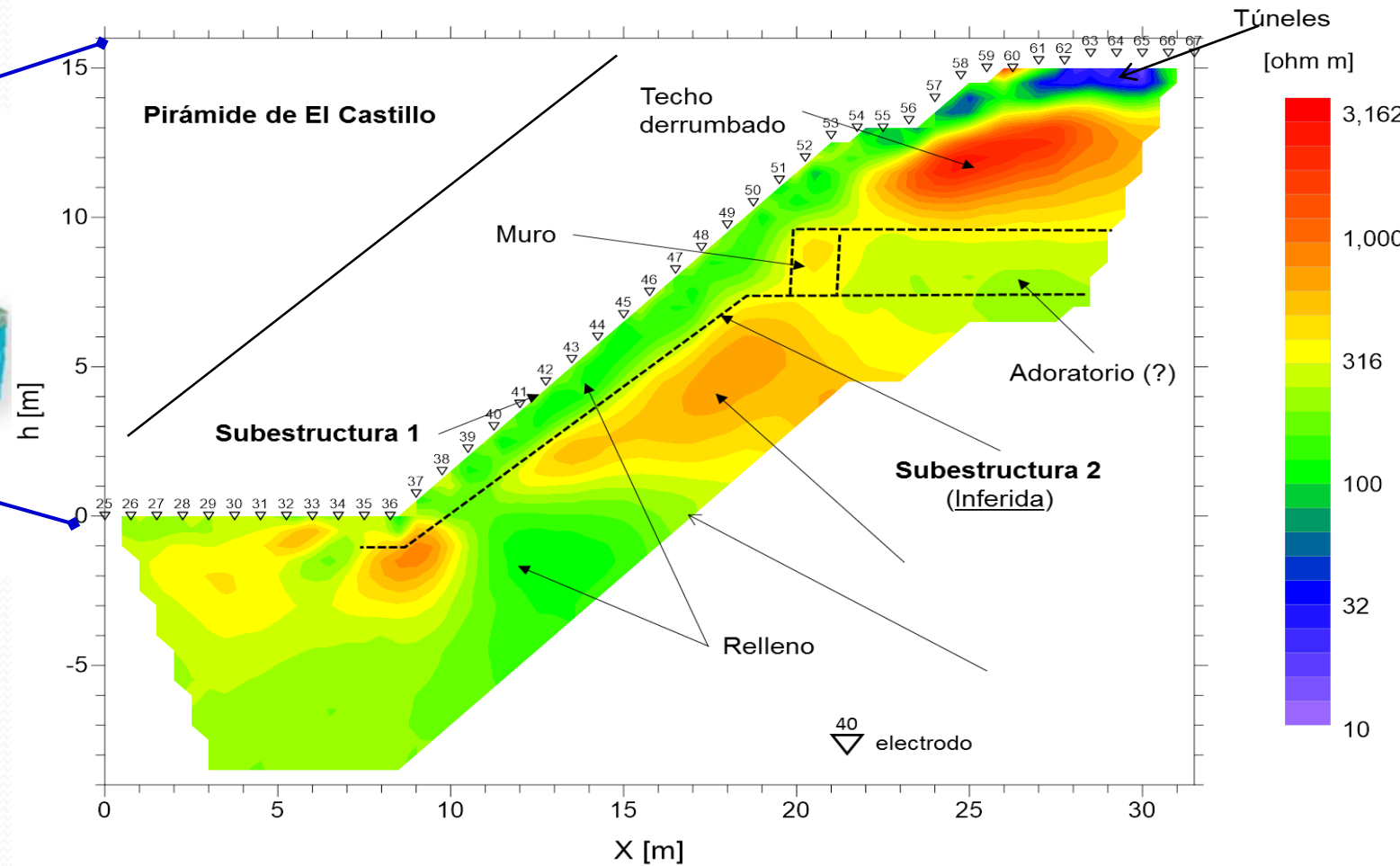
Finalmente, un perfil TRE-2D en el interior de la Pirámide de El Castillo



Pirámide de El Castillo



Este perfil 2D proporciona una fuerte evidencia sobre la existencia de una segunda subestructura al interior de El Castillo, el cual se encuentra por encima de una cavidad Kárstica



CONCLUSIONES

- ❖ *El modelo obtenido confirma la existencia de la cavidad Kárstica ('cenote').*
- ❖ *Se detecta la subestructura 1, descubierta en 1935, y una segunda al interior de la Pirámide de El Castillo.*
- ❖ *La modalidad de TER3D empleada es única en México y posiblemente a nivel mundial.*



MUCHAS GRACIAS!

POR SU ATENCION!

2015



2014



Agradecemos a los estudiantes de la Facultad de Ingeniería UNAM por su entusiasta colaboración en los trabajos de campo, a las autoridades del INAH y del Sitio Arqueológico (Dr. M.A. Santos) por las facilidades otorgadas para trabajar en la zona de Chichen Itzá. Agradecemos también a la Gerencia del *Hotel Mayaland* por su apoyo durante el trabajo de campo. Esta investigación se realizó a través del proyecto PAPIIT IN-103614 DGAPA-UNAM y de una ayuda excepcional de la Coordinación de la Investigación Científica, UNAM .