



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Los Métodos Geofísicos en la
Exploración Arqueológica.

FALLA DE ORIGEN

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO GEOFISICO

P R E S E N T A :
MA. FRANCISCA ANTUNEZ SOLIS



Cd. Universitaria

1989



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 está 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.

LOS METODOS GEOFISICOS EN LA EXPLORACION ARQUEOLOGICA

I.- Introducción.

II.- Breve Historia de los Métodos Geofísicos en la Arqueología.

III.- Métodos Potenciales (Gravimétrico y Magnetométrico).

III.1 Bases teóricas de la Gravimetría.

III.2 Justificación del uso del Método Gravimétrico a la Arqueología.

III.3 Ejemplos de aplicación de la Gravimetría en Arqueología.

III.4 Bases teóricas de la Magnetometría.

III.5 Justificación del uso del Método Magnetométrico a la Arqueología.

III.6 Ejemplos de aplicación de la Magnetometría en Arqueología.

IV.- Métodos Eléctricos.

IV.1 Bases teóricas del Método Eléctrico.

IV.2 Justificación del uso del Método Eléctrico a la Arqueología.

IV.3 Ejemplos de Aplicación del Método Eléctrico en Arqueología.

V.- Método Sísmico.

V.1 Bases Teóricas del Método Sísmico.

V.2 Justificación del Método Sísmico a la Arqueología.

V.3 Ejemplos de Aplicación del Método Sísmico en la Arqueología.

VI.- Aplicación para México.

VII.- Conclusiones y Recomendaciones.

I.- INTRODUCCION.

La Arqueología puede ser expresada como el estudio de los orígenes y desarrollo del hombre sobre la tierra, en términos de sus restos fósiles.

Aunque muchos sitios arqueológicos pueden estar fijos y se reconocen como tales, en muchas áreas del mundo debido a las alteraciones en la superficie del terreno, especialmente los cambios del nivel de ésta por la agricultura, hacen confusas u ocultan zonas arqueológicas, y aún cuando existen algunas indicaciones como son pequeños vestigios de construcciones o edificaciones antiguas que no están totalmente cubiertas, éstas no son lo suficientemente claras para revelar su exacta dimensión y naturaleza.

Las posibilidades de aplicación de Métodos Geofísicos a la prospección arqueológica son numerosas, de hecho, la prospección Geofísica permite localizar - formaciones sepultadas sin tener que recurrir a excavaciones, ya que permite delimitar el área de trabajo cuando no hay rasgos observables a simple vista. se deriva, por lo tanto, que es esencial para poder individualizar y delimitar rápidamente zonas arqueológicas, de tal manera que pueden conservarse - cuando se encuentran amenazadas por factores que caracterizan la vida moderna: expansión urbana, planificación agrícola, industrial, turística, construcción de edificios públicos entre otros factores.

Actualmente, se revisan muchos conceptos tradicionales en lo que toca a la - cultura humanística y la cultura científica. Ambas han presentado, durante - muchos siglos, posturas de pensamiento diferente y bajo muchos aspectos opuestos, demostrando aquí, que aplicaciones científicas y técnicas pueden colaborar en una disciplina humanística, entre las más tradicionales y conservadoras, como es la investigación arqueológica.

Hoy la arqueología, aunque se encuentra en una posición difícil, debido al incremento de destrucción de sitios arqueológicos, no sólo representa un hecho histórico y cultural, sino también un hecho económico, unido tanto a intereses turísticos como editoriales de enorme alcance.

II.- BREVE HISTORIA DE LOS MÉTODOS GEOFÍSICOS APLICADOS A LA ARQUEOLOGÍA.

La aplicación de los Métodos de exploración Geofísica a la Investigación Arqueológica tuvo sus orígenes en Europa, alrededor de la década de los 40's. Sin embargo, fué a partir de 1955 cuando se utilizan en gran escala.

El primer Método Geofísico que fué adaptado a la arqueología fué el de Resistividad, como lo muestran los trabajos de R. I. Atkinson en el año de 1946, quien logró identificar por medio de un común potenciómetro, un antiguo asentamiento neolítico en Bournemouth, cerca de Oxford.

A ésta primera experiencia de Atkinson, le siguieron otras del mismo tipo: - en Hans Hill, Berkshire, para localizar un campo de la edad de hierro; en - Northleigh, cerca de Oxford, para localizar los muros exteriores de una villa romana, en Cricklade (Wiltshire), para localizar los restos de una muralla - de época remota y en el cementerio de Farthing Down en Croydon nel Surrey, - para comprobar la presencia de tumbas más allá del cerco actual.

Otro Método Eléctrico, llamado el de las Líneas Equipotenciales, ha sido aplicado por el canadiense Hans Lundberg, por parte de la Fundación Wenner, - de Nueva York. Durante esas exploraciones que tenían como fin determinar los límites de una formación sedimentaria, se descubrió un fósil humano que vivió hace 12,000 años, conocido con el nombre del Hombre de Tepexpan, nombre de la localidad del hallazgo.

A partir de 1955, la Fundación C. M. Letrici, por parte del Politécnico de Milán, en Italia, incrementó la aplicación del Método Eléctrico; lo que dió origen a un nuevo ciclo en la prospección Arqueológica con un alto nivel operativo llevado a cabo en campañas de campo.

El primer modelo que se tuvo del potenciómetro usado para el Método Eléctrico, pesaba alrededor de 30 kg., ahora el potenciómetro que actualmente se utiliza es portátil con un peso no mayor a 3 kg.

El segundo Método Geofísico que se aplicó a la arqueología fué el Magnético. Con los últimos avances de la física nuclear en 1958, hubo la posibilidad de construir el magnetómetro de protones, superando así la dificultad de opera-

ción de campo del magnetómetro construido a finales del siglo XIX, usado para la investigación minera. Desde 1968, este método se ha utilizado enormemente en sitios arqueológicos, ya que por su facilidad de operación de campo y rapidez en la toma de lecturas de mediciones, el Método Magnético se ha convertido en una herramienta de gran utilidad para el arqueológico.

Actualmente, el campo de aplicación de los métodos Geofísicos a la Arqueología no son muy conocidos. El Politécnico de Milano, como pionera en esta área humanística, ha dado muestras contundentes en campañas realizadas en campo, así como también realiza ensayos y pruebas de los métodos geofísicos más utilizados para tal fin, y hacer frente a nuevos problemas de investigación.

Los Métodos: Electromagnéticos, Gravimétricos y Sísmicos, aún se encuentran en una fase experimental, ya que por las restricciones que presentan cada uno de ellos, no se ha podido incrementar su uso en Arqueología.

En América, sólo a partir de la presente década se han llevado a cabo varias campañas en sitios arqueológicos, en 1984 un grupo de investigadores con antecedentes de geotecnia y con escasos conocimientos de arqueología, utilizaron técnicas de Prospección Geofísica con esta finalidad en sitios norteamericanos como se discutirá en los capítulos subsiguientes.

III.- METODOS POTENCIALES: GRAVIMETRICO Y MAGNETOMETRICO

Dentro de los Métodos Potenciales de Explotación Geofísica, con mayor aplicación en las dos últimas décadas a la investigación arqueológica, como se mencionaba al inicio, es el Método Magnetométrico, por lo que se dará una mayor atención en lo que concierne a la teoría del mismo, no siendo de igual forma para el Método Gravimétrico, en el cual su teoría será expuesta más brevemente, por las restricciones que presenta en la utilización práctica en esta área.

III.1 BASES TEORICAS DE LA GRAVIMETRIA.

El Potencial Gravitacional. La Ley Universal de Gravitación de Newton establece lo siguiente: La atracción gravitacional mutua entre dos partículas de masa m_1 y m_2 , las cuales están separadas una distancia r es

$$F(r) = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \dots\dots\dots (III.1)$$

actuando en la dirección \vec{r} . La fuerza por unidad de masa de una partícula en cualquier punto P a una distancia r de m_1 , se define como el campo gravitacional de la partícula m_1 , el cuál es

$$F(\vec{r}) = - G \frac{m_1}{r^2} \vec{r} \dots\dots\dots (III.2)$$

Tal campo es conservativo, y por lo tanto derivable de una función potencial escalar U(r) de la siguiente forma:

$$\vec{F}(\vec{r}) = - \nabla U(\vec{r}) \dots\dots\dots (III.3)$$

donde $U(r) = G m_1/r$ es el potencial gravitacional de la masa m_1 . Cualquier otra cantidad del campo puede ser expuesta en términos de U.

Puesto que el Potencial en un espacio libre se suma al potencial gravitacional debido a la distribución continua de materia puede calcularse en puntos externos por integración. De este modo, si la suma se distribuye continuamente con la densidad $\rho(\vec{r}_0)$ a través del volumen V , el Potencial Gravitacional en un punto exterior P es: (Ver fig. III.1).

$$U_P = - \int_V \frac{G \, dm}{|\vec{r} - \vec{r}_0|}$$

$$= -G \int_V \frac{\rho(\vec{r}_0) \, d^3 \tau}{|\vec{r} - \vec{r}_0|} \dots\dots\dots (III.4)$$

donde: $|\vec{r} - \vec{r}_0| = \sqrt{r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos \theta}$

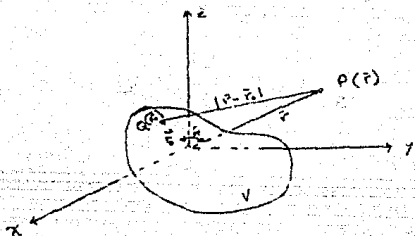


Fig. III.1

Si la integral de volumen se calcula para un campo total, se obtiene el potencial gravitacional terrestre en un espacio libre, del cuál el campo gravitacional se establece por diferenciación. Si P está en la superficie terrestre, el campo gravitacional se denota por el símbolo g . Generalmente g se toma con signo positivo, pero realmente es un campo de intensidad negativo, $g = | -\mathcal{F}(r) | = | \nabla U_P |$. Aunque de hecho se mide una fuerza por unidad de masa, y no una aceleración. La unidad de g es el gal ($= 1 \text{ cm/seg}^2$), y la dirección es por definición en todas partes vertical.

El peso de una masa m en reposo en el Campo Gravitacional es el vector fuerza cuya magnitud es mg y cuya dirección es vertical hacia abajo.

El valor de g depende de la distribución del volumen de la masa de la tierra, como lo expresa la función densidad $\rho(\vec{r}_s)$, y de la actual forma de la tierra, como lo especifican los límites de la integral. Las variaciones en $\rho(\vec{r}_s)$ cerca de P causarán un mayor efecto cerca de g que las que están a mayor distancia, de acuerdo a la ley del cuadrado inverso, y de hecho aparecerá en toda integral que se vuelve singular cerca de $|\vec{r} - \vec{r}_s| = 0$. Así todo cambio de densidad menor causa variaciones en g las cuales pueden ser medidas.

Las Ecuaciones de Campo. En un punto fuera del volumen V , la integral de volumen representa la función potencial $U(\vec{r})$ que es no singular y claramente satisface la ecuación de Laplace $\nabla^2 U = 0$.

Por otro lado, dentro de V , la integral se vuelve singular en $\vec{r} = \vec{r}_s$. Para aislar ésta singularidad, la encerramos en una pequeña esfera de radio ϵ y volumen V' . El potencial U puede definirse entonces como:

$$U(\vec{r}) = -G \int_{V-V'} \frac{\rho(\vec{r}_s) d^3 r_s}{|\vec{r} - \vec{r}_s|} - G \int_{V'} \frac{\rho(\vec{r}_s) d^3 r_s}{|\vec{r} - \vec{r}_s|} \quad (\text{III.5})$$

el primer término es ahora no singular, y así en todas partes es armónica. El segundo término, se hace ϵ suficientemente pequeño, considerándose $\rho(\vec{r}_s)$ como constante, llegando a la siguiente expresión:

$$\nabla^2 U(\vec{r}_s) = -G \rho(\vec{r}_s) \int_{V'} \nabla \cdot \nabla \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}_s|} d^3 r_s \dots (\text{III.6})$$

que de acuerdo al teorema de Gauss es

$$\nabla^2 U(\bar{r}_0) = -G \rho(\bar{r}_0) \int_S n \cdot \nabla \frac{1}{|\bar{r} - \bar{r}_0|} d^3 r_0 \dots (III.7)$$

Ahora S es la superficie de la esfera pequeña, cuyo radio es ϵ y por lo tanto en la integral $|\bar{r} - \bar{r}_0| = \epsilon$ y $n \cdot \nabla = \frac{\partial}{\partial \epsilon}$. Así, en el límite cuando $\epsilon \rightarrow 0$, será:

$$\begin{aligned} \nabla^2 U(\bar{r}_0) &= -G \rho(\bar{r}_0) \left(\frac{d}{d\epsilon} \frac{1}{\epsilon} \right) 4\pi \epsilon^2 \\ &= 4\pi G \rho(\bar{r}_0) \dots \dots \dots (III.8) \end{aligned}$$

Esta ecuación, conocida como ecuación de Poisson, satisface al potencial en todas las regiones ocupadas por cuerpos masivos.

Correcciones en las mediciones Gravimétricas. Las pequeñas variaciones en g registradas por un gravímetro sobre la superficie del terreno generalmente incluye algunos efectos sin relación con la geología, por ejemplo, efectos debido al achatamiento de la tierra, por cambios en elevación, por compensación isostática y por varias otras causas. Por lo que primeramente se eliminan de los datos, lo más cuidadosamente posible, todas éstas perturbancias extrañas. Sólo después de esto se puede llevar a cabo la interpretación geofísica en forma más seria.

El Efecto de Latitud. En mediciones geodesicas, la forma de la tierra se asemeja a un esferoide. Esta superficie esferoidal, la cual se ajusta al nivel del mar, es llamada esferoide de referencia. Tan sólo la corteza de la tierra, la cual constituye menos del 2% del total de masa de la tierra, es significativamente heterogénea. De acuerdo a la fórmula del Campo Gravitacional, la superficie de un cuerpo puede expresarse como:

$$G(\varphi) = \sum_{n=0}^{\infty} C_n \text{Sen}^2 n \varphi \dots\dots\dots (III.9)$$

donde φ es la latitud geocéntrica. Los coeficientes a_n se eligen por ajustes de mediciones de gravedad a lo ancho del mundo, los cuales se reducen al nivel del mar, mediante el método de los mínimos cuadrados, mediante la fórmula III.9. Así la distribución del campo gravitacional principal en el esferoide de referencia se describe por la fórmula:

$$g(\varphi) = 978.0490 (1 + 0.0052884 \text{ Sen}^2 \varphi - 0.0000055 \text{ Sen}^2 2 \varphi) \text{ gales} \dots\dots\dots (III.10)$$

El gradiente horizontal norte - sur de g pueden computarse de III.10 de la siguiente forma:

$$\frac{dg}{ds} = \frac{1}{R(\varphi)} \frac{dg}{d\varphi} = \frac{1}{R_e} \frac{dg}{d\varphi} = 13.07 \text{ Sen} 2 \varphi [\text{u.g.}] \dots\dots\dots (III.11)$$

donde R_e es el radio ecuatorial. La corrección de cada estación de gravedad se calcula al establecer líneas en una rejilla este - oeste en el plano con incrementos equivalentes al u.g. En las latitudes medias, ésta será alrededor de 400 - pies, y si se necesita el más elevado, se reduce el intervalo de la rejilla. Puesto que la tendencia de g se incrementa - del ecuador a los polos, la corrección de latitud se suma a - las mediciones cuando nos movemos hacia el ecuador.

Corrección por Elevación: Efecto de Aire Libre. Las correcciones se basan en la fórmula III.10, son estrictamente aplicables para observaciones tomadas en la superficie esferoidal - de referencia. Si un punto de observación está arriba o abajo del esferoide de referencia, se hace la corrección para la

desviación de la vertical. Si el radio del esferoide de referencia es R (φ) y la desviación vertical $H \ll R$, el Campo Gravitacional principal en una estación es:

$$g(R+H) = g(R) + H \frac{dg}{dR} \dots\dots\dots (III.12)$$

El primer término de la derecha, es dado en III.11, por lo que la corrección necesariamente es $H \frac{dg}{dR}$, y será restado. Para calcular este término, se utiliza la fórmula de Mr. Cullagh para la potencial gravitacional en cualquier punto fuera del esferoide con pequeña rotación excentrica de velocidad angular ω .

$$\frac{dg}{dR} = -0.9416 - 0.0090 \cos^2 \varphi [u - u/pic] \dots\dots (III.13)$$

Multiplicando ésta expresión por la desviación H de la referencia esferoidal, se obtiene la corrección de Aire-Libre, compensada por variaciones en la distancia del punto de observación en el centro de atracción de la tierra. Esta corrección tiene el mismo signo que H .

Corrección por elevación: La corrección de Bouguer. La corrección de aire-libre ignora la masa total que está entre el nivel del terreno y la referencia esferoidal. El efecto de gravedad de ésta masa se incluye en las mediciones de g y su magnitud dependerá del espesor de H . Porque es positivo, es opuesto al gradiente de aire-libre y por lo tanto tenderá a disminuir. Si la asignación debida no es hecha para este efecto en la reducción del valor de g , éste sufrirá una fuerte correlación negativa con H . El perfil de gravedad de aire libre a través de la sección topográfica se muestra en la fig. III.2, ilustrando éste punto.

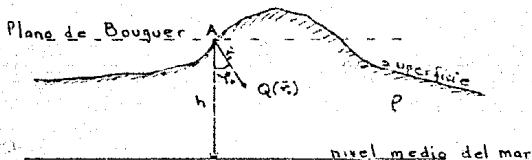


Fig III. 2

El resultado de esta correlación negativa enfatiza los rasgos topográficos con la pérdida de cambios en la densidad superficial. El cálculo del efecto del terreno en el punto A se obtiene a través de la integral de volumen total contenida entre la superficie del terreno y la referencia esférica, de la sig. forma:

$$\alpha = \frac{\partial}{\partial z} \int_V \frac{\rho(\bar{r}_0) d^3 r_0}{|\bar{r} - \bar{r}_0|} \dots \dots \dots \text{(III.14)}$$

en los límites de las áreas ignora la curvatura de la tierra y considera la referencia esférica como una superficie plana. Por conveniencia se reemplaza el esferoide con el nivel medio del mar al colocar $H = h$, donde h es la elevación del nivel del mar a la superficie del terreno, haciendo pasar un plano horizontal a través de A. La contribución de la placa contenida entre las dos superficies horizontales es el efecto de Bouguer, mientras al resto se le denomina Efecto Topográfico, y éstas se evalúan separadamente.

Si la densidad fuera constante en V , el efecto de Bouguer se

ria = $2 \pi G \rho h$. La densidad de Bouguer se define como sigue:

$$\rho_B = \frac{1}{2\pi h} \int_{\text{placa}} \frac{\rho(r_0) \cos \psi_0}{r_0^2} d^3 r_0$$

y el efecto de Bouguer entonces es:

$$2 \pi G \rho_{\text{placa}} h$$

Como la posición de A es arbitraria, la densidad de Bouguer - generalmente varía con el lugar, y así su corrección será - $0.127 \rho_{\text{placa}} h$ [U.G.]

Corrección Topográfica. Para completar el cálculo de el efecto gravimétrico de el terreno, se determina la contribución - para g de la topografía en el plano de Bouguer. En la Fig. - III.2 éste residuo está representado por el material arriba - del nivel superficial en A, y el material que falta por debajo del mismo. Las cimas y los valles reducen la gravedad en A, y la corrección es positiva.

La corrección topográfica está dada por la integral:

$$T(A) = G \int_V \frac{(\rho_0) \cos \psi_0}{r_0^2} d^3 r_0 \dots \dots \dots (III.15)$$

en la que el volumen v está contenido entre la superficie del terreno y el plano de Bouguer. Para evaluar ésta integral, - es necesario conocer la distribución de la densidad de los materiales en la superficie y la forma de la superficie del terreno, pero también se contemplan cartas de corrección topográfica.

Cuando a sido aplicada la corrección por elevación, latitud y topográfica, al residual se le denomina Gravedad de Bouguer. Esta es la pequeña componente de g la cual se supone tiene su origen a pocos cientos o miles de pies de profundidad, lo cual constituye la materia prima para la interpretación geofísica.

III-2 JUSTIFICACION DEL USO DEL METODO GRAVIMETRICO A LA ARQUEOLOGIA.

Aunque el método de gravedad es de poco uso en la prospección arqueológica, debido al alto costo y delicada naturaleza del gravímetro, además de la lenta velocidad de operación de campo, lo que lo hace un método impráctico algunas veces.

La densidad es una propiedad física de los materiales, y si se tiene conocimiento de la distribución de esta propiedad en un determinado sitio arqueológico, la información obtenida es de gran valor para los trabajos de excavación posteriores a una inspección gravimétrica, sin embargo, son poco, o escasos los trabajos reportados en la literatura que emplea dicho método.

La aplicación del método gravimétrico para exploración arqueológica se ve poco alentadora, sobre todo por su alto costo de operación y resultados no muy satisfactorios.

III.3 EJEMPLO DE APLICACION DE LA GRAVIMETRIA A LA ARQUEOLOGIA.

Trabajo de Prueba en Cerveteri, Italia.

Se realizó en septiembre y octubre de 1964, y se limitó a una serie de líneas de prueba, sobre las cámaras de tumbas en la zona arqueológica de Cerveteri. Las lecturas se tomaron en una rejilla estrechamente espaciada.

El objetivo del uso del método Gravimétrico fue el de verificar la anomalía encontrada con otros métodos de inspección, para lo cual se eligieron áreas conocidas, esto para evitar confusión en el trazo de las diferentes anomalías.

Desafortunadamente, gran parte del área conocida en Cerveteri ha sufrido alteración en el nivel del terreno debido a restauración moderna.

El instrumento usado en la inspección fue un Atlas F20 modificado, similar en construcción que el gravímetro Worden, que bajo condiciones óptimas los cambios en medición más pequeños fueron del orden de 10 microgales, el error promedio en las lecturas fue de 20 a 30 microgales. En común con todos los instrumentos semejantes, las lecturas observadas, no dan el total del valor absoluto de la atracción gravitacional, pero mejora en series de valores relativos entre los puntos inspeccionados. Para trabajos arqueológicos, esto no es muy importante. Para cada lectura el instrumento tuvo que ser correctamente nivelado, lo que requirió una considerable cantidad de tiempo, cada lectura fue chequeada hasta obtener 3 valores consistentes. Para corregir por variación de tiempo se tomaron lecturas referidas a puntos fijos, el instrumento fue muy sensible a las variaciones de la horizontal. Se tomaron algunas precauciones para evitar disturbios mecánicos o de temperatura, en particular de los rayos so-

lares directos, que podrían producir un marcado efecto de calentamiento y consecuentemente cambios en las lecturas, no obstante a la cubierta circular del instrumento.

Para la corrección por elevación, se midió la superficie del terreno usando instrumentos de inspección para éstos fines.

Los resultados obtenidos de las líneas de prueba no fueron muy concluyentes, esto en parte fue debido a un gran esparcimiento en las lecturas con diferencias de arriba de los 100 microgales ocurridos en valores adyacentes en distancias de un metro. Estos cambios fueron más grandes que los esperados de los rasgos arqueológicos, presumiblemente debido a varias fuentes de error. Los cambios entre el valor promedio de las series de lecturas en los puntos fijos fue normalmente del orden de arriba de 30 microgales, esto en gran parte debido a variaciones del tiempo.

El trabajo de prueba mostró que las cámaras de las tumbas podrían dar anomalías observables dentro de un rango, en la práctica, otros efectos, junto con inevitables errores fueron responsables de los resultados confusos, por lo que al parecer, el Método Gravimétrico es de poco uso en sitios arqueológicos.

III.4 BASES TEÓRICAS DE LA MAGNETOMETRÍA

III.4.1 El Campo Magnético Terrestre.

Las causas del Campo Magnético de la Tierra, hasta la fecha son desconocidas, sin embargo, se han elaborado varias teorías para dar una explicación a éste fenómeno natural de la tierra. De entre éstas teorías, la más aceptada es la de W. M. Elsasser (1946) y E. C. Bullard (1948), ambos propusieron la hipótesis para atribuir el origen del Campo Magnético de la tierra a las corrientes eléctricas generadas en el interior de la misma (en el núcleo fluido de hierro y níquel). Elsasser propuso que la termoelectricidad era la fuerza electromotriz, en tanto que Bullard consideró un generador electrodinámico, que recibe energía de una rotación y una conversión del movimiento de rotación en electricidad. Con respecto a los diversos modelos propuestos sobre el mecanismo que genera el Campo Magnético Terrestre, se apoya fuertemente en la idea de Bullard, la fig. III.3 muestra un modelo sencillo para ilustrar la idea básica de la dinamo autoexcitable de Bullard. Un disco circular D gira sobre su eje CC' en dirección contraria a las manecillas del reloj, en presencia de un pequeño campo magnético H paralelo a CC'. De acuerdo con la Ley de Inducción Electromagnética de Faraday, se induce una fuerza electromotriz E que circula radialmente en el disco. La fuerza electromotriz en cualquier punto del disco está dada por $E = V \times H$, donde V denota la velocidad lateral del punto. En la figura III.3, el borde del disco circular está en contacto con un cepillo eléctrico que conduce a un solenoide circular S que también gira en torno CC'; la otra terminal del solenoide está conectada con el eje de rotación CC' mediante otro cepillo. Supóngase ahora, que todos éstos dispositivos estén hechos de metales de alta conductividad eléctrica. Debido a la fuerza electromotriz inducida E, circulan corrientes eléctricas a través de D, S, CC' y D formando un círculo eléctrico cerrado. La corriente eléctrica que fluye en el solenoide S,

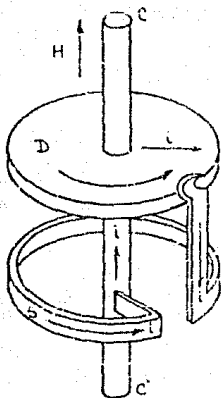


Fig. III.3

produce un campo magnético paralelo al campo inicial H , lo que significa que el campo magnético ha sido incrementado. Éste induce una fuerza electrotrix mayor. Si el par de fuerzas que mueve el disco D , en conjunto con el CC' , es lo suficientemente grande, el campo magnético a lo largo de CC' se irá incrementando mientras continúa la rotación. De éste modo, un campo magnético pequeño que pudiera ser generado inicialmente por casualidad, sería mantenido e incrementado mediante un sistema de dinamo con autoexcitación. Sin embargo el campo magnético no puede crecer indefinidamente debido a las pérdidas de corriente por la resistencia eléctrica del material; llega a un nivel estacionario final en el que las pérdidas se compensan con el incremento. Si existiera éste tipo de dinamo en el núcleo terrestre, el campo magnético se mantendría a pesar de las inevitables pérdidas de corriente eléctrica.

Para dar una idea de la distribución del campo magnético terrestre, la fig. III.4, representa una forma esquemática de las líneas de fuerza.

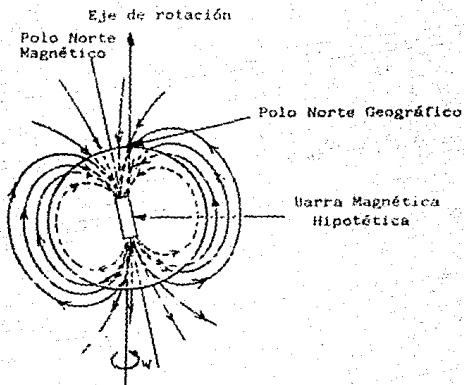


Fig. III.4

Las líneas de fuerza entran en el norte magnético y salen en el sur magnético, esto implica realmente que el norte magnético corresponde al polo sur geográfico, y el sur magnético al polo norte geográfico.

Para caracterizar el campo magnético terrestre en un punto sobre la superficie de la tierra, es necesario definir los siguientes parámetros, de la fig. III.5; tenemos que:

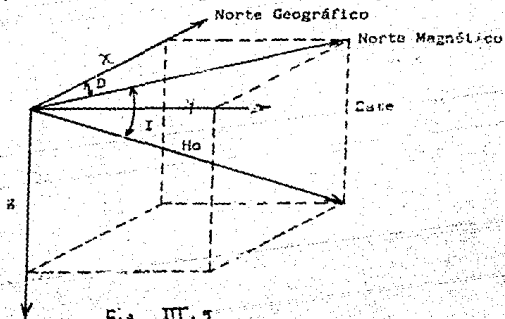


Fig. III.5

D.- Declinación Magnética: es el ángulo formado por la componente horizontal contenida en el plano XY, con respecto al eje X, dirigido en la dirección del Norte Geográfico.

I.- Inclinación Magnética: es el ángulo formado por la dirección del campo magnético y el plano XY.

Z.- Componente Vertical del campo Magnético.

X.- Componente Horizontal del campo magnético en la dirección del Norte Magnético.

Y.- Componente Horizontal del campo magnético en la dirección este-oeste.

H_o.- Campo Magnético Terrestre ó Intensidad del Campo Magnético Terrestre, también denominada F.

H_{xy} Componente del Campo Magnético Terrestre contenida en el plano XY.

En la actualidad, se realizan en todo el mundo determinaciones de la intensidad y dirección del campo Magnético de la Tierra en el pasado. de los estudios paleomagnéticos se han registrado variaciones del mismo, siendo de mayor importancia los que a continuación se mencionan.

a) Variaciones Seculares: Los registros hechos han dado evidencia, y establecer que la posición de los polos magnéticos están cambiando, por ejemplo, las lecturas de la inclinación y declinación magnética en los últimos 400 años hechos en los observatorios de Londres y París varían en 75° a 65° en inclinación y alrededor de 35° (de 10°E hacia 25°W) y regresa a 10°W en declinación. Estas variaciones no diferentes en otros lugares de la tierra, es decir, en otros sitios del plano-

ta. Las causas que probablemente dan lugar a éste tipo de variaciones, son de origen interno, posiblemente debido a cambios en las corrientes de convección, acoplamiento manto-núcleo, etc.

- b) Variaciones diurnas solares: tienen un período de duración de 24 horas, y un rango de variación de $30 \mu\text{T}$ (γ), varían con la latitud y las estaciones del año, por lo que probablemente están relacionadas con el sol mediante las corrientes ionosféricas, por lo que pudiera creer, que las causas que originan estas variaciones son de origen externo.
- c) Variaciones diurnas lunares; tienen un período de duración de 25 horas del orden de $2 \mu\text{T}$, varía cíclicamente en el mes por lo que se considera tiene un origen externo, debido a la iteración luna-ionosfera.
- d) Tormentas Magnéticas: disturbios con amplitudes tan grandes del orden de hasta $1000 \mu\text{T}$ en la mayoría de las latitudes, y aún más grandes en las regiones polares. Estas variaciones están asociadas a las aureolas boreales, aunque erráticas, ocurren cada 27 días, correlacionadas con las manchas solares.
- e) Variaciones Magnéticas locales: se da en rocas superficiales, susceptibles al cambio de minerales magnéticos. Generalmente estas anomalías decaen rápidamente en distancia y, son estas de importancia de la prospección magnética.

III.4.2 Elementos de Teoría Electromagnética.

Considerando que el campo magnético \vec{B} se origina a partir de corrientes, es necesario conocer las ecuaciones que rigen tal fenómeno, apoyándonos en conceptos de electromagnetismo.

Campo de Inducción Magnética B en el vacío

Considerando corrientes estacionarias de conducción, el Campo Magnético \vec{B} queda expresado, de acuerdo a las Ecuaciones de Maxwell como:

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad \text{..... (III.18)}$$

$$\nabla \times \vec{B} = 4\pi \mu_0 \vec{J}_c \quad \text{... (III.19)}$$

donde:

\vec{J}_c = Vector densidad de corriente de conducción.

μ_0 = Permeabilidad Magnética del vacío, e igual a 1.

4π = Constante que se expresa en las ecuaciones de campo y define el carácter de B.

La ecuación III.18 es una consecuencia de la Ley de Ampere de la fuerza entre corrientes, y también refleja el hecho de que no se sabe que existan cargas magnéticas aisladas, - por lo que \vec{B} debe de ser de carácter dipolar. De ésta misma se deduce que existe una función vectorial \vec{A} que define a \vec{B} como:

$$\nabla \times \vec{A} = \vec{B} \quad \text{..... (III.20)}$$

Del teorema de Helmholtz, del cálculo vectorial, se puede encontrar una solución integral para \vec{A} , la cual se expresa como:

$$\vec{A} = \int_{V'} \frac{\vec{J}_c dV'}{R} \quad \text{(III.21)}$$

donde V' es el volumen donde se encuentra la fuente.

El campo magnético debe su existencia a corrientes y éstas deben ser de carácter dipolar. El dipolo magnético más -

elemental que se puede pensar es el de una bobina de radio a , por donde se hace circular una corriente I , tal como lo indica la fig. III.6

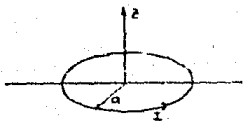


Fig. III.6

para el eje z , el campo magnético B está dado, de acuerdo a Gauss por:

$$\vec{B}_z = \frac{I a^2 \pi}{(\pi^2 + z^2)^{3/2}} \dots \dots \dots \text{(III.22)}$$

donde $m = \pi a^2 I$, es conocido como momento magnético y es igual a la corriente que circula por el área de la bobina, en general para cualquier bobina, el momento magnético $m = \text{Area} \times \text{Corriente}$. La dirección en la que se considera que el momento dipolar actúa, es en dirección perpendicular al plano de la bobina. Si consideramos que el radio $a \ll z$, el campo magnético queda expresado como:

$$\vec{B}_z = \frac{m}{z^3} \vec{R} \dots \dots \dots \text{(III.23)}$$

este campo puede ser determinado a través de un potencial vectorial dipolar A , expresado como:

$$A = \frac{\vec{m} \times \vec{r}_u}{r^2} \dots \dots \dots \text{(III.24)}$$

donde \vec{m} es el momento vectorial, \vec{r}_u es un vector unitario en la dirección del punto, y r es la distancia entre el vector momento dipolar y el punto de observación. En coordena

das esféricas se expresa de la siguiente forma:

$$\vec{A}_D = \frac{m \sin \theta}{r^2} \vec{I}_\perp \quad \dots \dots \dots \quad (\text{III.25})$$

en la fig. III.7, se ilustran los parámetros de la eq. (III.25).

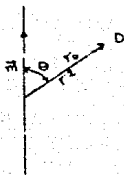


Fig. III.7

Magnetización

Los átomos y las moléculas están formados por partículas - cargadas positivas y negativamente y que, en conjunto, son electricamente neutros. Ahora supongamos que por lo menos algunas de éstas cargas no se encuentran en reposo, sino en movimiento continuo. Se supone también que éstos movimientos se efectúan en trayectorias cerradas cuya naturaleza - queda determinada por la estructura resultante de los sistemas atómicos y molecular. Visitas desde una gran distancia, éstas cargas en movimiento aparecerán como circuitos de corriente o dipolos magnéticos. A tales corrientes que circulan permanentemente se les da el nombre de corrientes de Ampere, ya que fué precisamente Ampere quien postuló su existencia para explicar las propiedades magnéticas de la materia. Se deben considerar las posibilidades siguientes:

Si $B = 0$, es posible que las cargas esten circuiando de manera tal que la circulación neta de corriente sea igual a -

cero, es decir, que los momentos dipolares de las cargas - individuales se combinen para dar cero cuando se suman vec torialmente.

Si $B \neq 0$, debido a las corrientes externas, se sabe que de éstos resultan ciertos momentos de torsión sobre los dipolos, que tenderán a alinearse en la dirección de la inducción. Puede muy bien suceder que bajo la influencia de - estos momentos de torsión las trayectorias de las cargas - en movimiento se modifiquen lo suficiente para que en la nueva configuración resultante el momento dipolar neto sea ahora diferentes de cero, por lo que se puede decir que un momento tal fué inducido por el campo \vec{B} y que la materia - fué magnetizada.

Pudiera ser que en ausencia de una inducción externa el - átomo o la molécula tuviera ya una estructura tal que el - momento dipolar asociado con ella fuera diferente de cero, de modo que tuviera un momento dipolar magnético permanente.

La materia neutra es equivalente a un conjunto de dipolos - magnéticos, para ello se define la magnetización \vec{M} , como el momento dipolar magnético por unidad de volumen (ya que los átomos son estructuras microscópicas, es difícil de tomarse en cuenta una escala macroscópica, es por eso que se ha definido un vector con esta naturaleza) de la siguiente forma:

$$\vec{M} = \frac{d\vec{m}}{dv} \dots \dots \dots \quad (\text{III.26})$$

que es momento magnético por unidad de volumen. Así, el momento dipolar total de un volumen V de material será:

$$\vec{m} = \int \vec{M} dv \dots \dots \dots \quad (\text{III.27})$$

Se distinguen dos tipos de magnetización.

- i) Magnetización por inducción: que existe debido a la

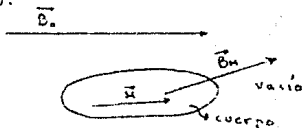
presencia de un campo externo, y es cero cuando la fuente exterior deja de actuar.

- ii) Magnetización permanente: existe sin causa externa y está relacionado a los dipolos magnéticos permanentes que presentan una orientación preferencial.

En general, un cuerpo puede presentar ambos tipos de magnetización en mayor ó menor grado.

El vector de intensidad magnética \vec{H} :

El campo que existe en la naturaleza realmente es \vec{B} , ahora supongamos que se tiene un punto en el espacio en donde existen dos campos, uno en el vacío y otro debido a la magnetización que un determinado cuerpo tiene (sea permanente o de inducción).



por lo que el campo magnético total es: $\vec{B}_T = \vec{B}_0 + \vec{B}_M$ en un punto P. Lo que sabemos es que \vec{B}_0 puede deberse a una fuente donde existen corrientes

$$\nabla \cdot \vec{B}_T = 0 \quad \text{.....} \quad (\text{III.28})$$

$$\nabla \times \vec{B}_T = 4 \pi \vec{J}_c + \nabla \times \vec{H}_M \quad \text{.....} \quad (\text{III.29})$$

se sabe que \vec{H}_M existe debido al vector de magnetización \vec{M} , se puede probar que:

$$4 \pi \nabla \times \vec{M} = \nabla \times \vec{B}_M \quad \text{.....} \quad (\text{III.30})$$

por lo tanto

$$\nabla \cdot \vec{B}_c = 0 \dots\dots\dots (III.31)$$

$$\nabla \times \vec{B}_c = 4\pi \vec{J}_c + 4\pi \nabla \times \vec{M} \dots\dots\dots (III.32)$$

para resolver \vec{B}_c es necesario conocer \vec{M} , para lo cual se define un vector auxiliar.

$$\nabla \times (\vec{B}_c - 4\pi \vec{M}) = 4\pi \vec{J}_c \dots\dots\dots (III.33)$$

pero: $\vec{H} = \vec{B}_c - 4\pi \vec{M}$

$$\therefore \nabla \times \vec{H} = \vec{J}_c \dots\dots\dots (III.34)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = \nabla \cdot \vec{B}_c - 4\pi \nabla \cdot \vec{M} \dots\dots\dots (III.35)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_c \dots\dots\dots (III.36)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = -4\pi \nabla \cdot \vec{M} \dots\dots\dots (III.37)$$

Si ahora consideramos que en la región donde se aplican dichas ecuaciones no existen corrientes libres \vec{J}_f , entonces las ecuaciones que rigen el campo son:

$$\nabla \times \vec{H} = 0 \dots\dots\dots (III.38)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = -4\pi \nabla \cdot \vec{M} \dots\dots\dots (III.39)$$

De acuerdo al cálculo vectorial, si $\nabla \times \vec{H} = 0$, entonces existe una función escalar denominado potencial magnético escalar, es decir;

$$\vec{H} = -\nabla \varphi_m \dots\dots\dots (III.40)$$

Se puede demostrar que φ_m se expresa en forma integral como:

$$\varphi_m = - \int_{V'} \frac{\vec{M} \cdot \nabla}{R} \left(\frac{1}{R} \right) dV' \dots\dots\dots (III.41)$$

donde V' es el volumen ocupado por la materia.

Potencial magnético escalar.

Para que la expresión dada para Ψ_m sea de mayor utilidad la transformaremos mediante cálculo vectorial de la siguiente forma:

$$\Psi_m = \int_{V'} \frac{-\nabla \cdot \vec{M}}{R} dV' + \int_{S'} \frac{M' \cdot \vec{n}}{R} d\sigma \quad (III.42)$$

donde V' es el volumen que encierra al cuerpo
 S' es la superficie que limita el cuerpo

De aquí se desprenden dos hechos que se utilizan ampliamente en geofísica:

- $\Psi_m = -\nabla \cdot \vec{m}$; densidad de cargas magnéticas volumétricas.
 $m \cdot n = \sigma_m$; densidad superficial de cargas magnéticas.
 \vec{n} = vector unitario perpendicular a la superficie S' hacia afuera.
 σ_m en general puede ser positiva ó negativa.

Aplicación a Medios Lineales Homogéneos e Isótropos.

Ahora se considerará el problema de magnetización por inducción. Cuando existe un campo externo, un cuerpo se magnetiza creando un campo externo e interno dentro del cuerpo, - como se observa de la siguiente expresión de magnetización.

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H} \dots \dots \dots (III.43)$$

Donde \vec{H} es el campo de intensidad magnética que existe dentro del cuerpo

χ_m es la susceptibilidad magnética determinada cuando el espacio que rodea al cuerpo es el vacío.

Sabiendo que

$$\vec{H} = \vec{Bt} - 4\pi \vec{M} \dots\dots\dots (III.44)$$

$$\vec{Bt} = \vec{H} + 4\pi \chi \vec{H} \dots\dots\dots (III.45)$$

$$\vec{Bt} = (1 + 4\pi \chi_m) \vec{H} \dots\dots\dots (III.46)$$

el término:

$$1 + 4\pi \chi_m = \mu$$

donde μ es la permeabilidad magnética, por lo que se tiene:

$$\vec{Bt} = \mu \vec{H} \dots\dots\dots (III.47)$$

La expresión anterior enuncia la relación lineal que existe dentro del cuerpo entre los campos magnéticos y además toma en cuenta la magnetización por inducción, no así la magnetización permanente.

De acuerdo al valor que toma χ_m , los materiales magnéticos se pueden clasificar en:

- Materiales Diamagnéticos; $\chi_m < 0$
- Materiales Paramagnéticos; $\chi_m > 0$
- Materiales Ferromagnéticos; $\chi_m \gg 0$

Todos los materiales tienen una contribución diamagnética a su susceptibilidad, que resulta del movimiento orbital alterado de los electrones que la forman, producido al aplicar un campo externo. Sin embargo, en los materiales paramagnéticos esta contribución es fuertemente superada por la susceptibilidad Paramagnética por los momentos dipolares magnéticos permanentes.

III.4.3 BASES TEORICAS EN LA INTERPRETACION DE ANOMALIAS MAGNETICAS.

Solución de una esfera magnética en presencia de un Campo externo H_0 .

La idea de tomar una esfera básicamente es por la sencillez en su solución. De acuerdo a la Teoría Electromagnética, la solución de una esfera que presenta una magnetización por inducción, debido a la presencia de un cuerpo magnético exterior H_0 , se expresa como :

Para el campo exterior:

$$\vec{H} = \frac{M a^3}{3} \left[\frac{2ZX \text{Sen } I + 2X^2 \text{Cos } I}{r^4} - \frac{\text{Cos } I}{r^2} \right] \vec{i} +$$

$$\frac{M a^3}{3} \left[\frac{2ZY \text{Sen } I + 2XY \text{Cos } I}{r^4} \right] \vec{j} + \frac{M a^3}{3} \left[\frac{2Z^2 \text{Sen } I + 2XZ \text{Cos } I}{r^4} - \frac{\text{Sen } I}{r^2} \right] \vec{k}$$

..... III.48

Para el campo interior:

$$\vec{H} = \frac{3}{\mu+2} H_0 \text{Cos } I \vec{i} + \frac{3}{\mu+2} H_0 \text{Sen } I \vec{k} \quad \text{.....III.49}$$

Es costumbre, sin embargo, expresar el campo exterior en función del módulo del vector de magnetización como:

$$H = \frac{\mu-1}{\mu+2} H_0 a^3 \left[\frac{2X \text{ Sen } I + 2X^2 \text{Cos } I}{r^4} - \frac{\text{Cos } I}{r^2} \right] \vec{i} +$$

$$\frac{\mu_0 \mu_r}{\mu_0 + 2\mu_0} H_0 \alpha^3 \left[\frac{2ZY \text{Sen} I + 2XY \text{Cos} I}{r^4} \right] + \frac{\mu_0 \mu_r}{\mu_0 + 2\mu_0} H_0 \alpha^3 \left[\frac{2Z^2 \text{Sen} I - 2XZ \text{Cos} I}{r^4} - \frac{\text{Sen} I}{r^2} \right] \vec{k}$$

III.50

La Demagnetización Magnética.

La magnetización debido a procesos de inducción, de acuerdo a la teoría Electromagnética, se expresa como

$$\vec{M} = 4 \pi \chi_m \vec{H} \dots \dots \dots \text{III.51}$$

Donde χ_m es la susceptibilidad magnética y \vec{H} es el campo en el interior del cuerpo. Sin embargo el campo \vec{H} es la suma del campo magnético exterior \vec{H}_0 más el campo magnético \vec{H}_m debida a la magnetización \vec{M} , es decir:

$$M = 4 \pi \chi_m \vec{H}_0 + 4 \pi \chi_m \vec{H}_m \dots \dots \dots \text{III.52}$$

Por otro lado, se sabe que el vector

$$\vec{H}_m = - \frac{\vec{M}}{N} \dots \dots \dots \text{III.53}$$

donde N es el factor de Demagnetización que depende de la geometría del cuerpo. Substituyendo la ecuación (III.53) en la ecuación (III.52)

$$\vec{M} = \frac{4 \pi \chi_m \vec{H}_0}{1 + \frac{4 \pi \chi_m}{N}} \dots \dots \dots \text{III.54}$$

Cuando $\chi_m \ll 1$, el término $\frac{\chi_m}{N} \approx 0$, por lo que esta última expresión se reduce a

$$\vec{M} = 4 \pi \chi_m \vec{H}_0 \dots \dots \dots \text{III.55}$$

La ecuación (111.55) es la más empleada en geofísica para la estimación del valor del vector de magnetización, que implica que los fenómenos de demagnetización son despreciables.

III.5 Justificación del Uso del Método Magnetométrico a la Arqueología.

El método magnético, se funda en la medición del magnetismo del terreno y las variaciones que éste experimenta en la exploración de las formaciones arqueológicas sepultadas. La presencia prolongada de seres humanos en una localidad, da lugar siempre a movimientos artificiales del terreno, originando así, las correspondientes variaciones en la distribución del magnetismo local, variaciones que pueden aun hoy, a distancia de millares de años delatar dicha presencia. El calentamiento originado por la acción del saneamiento del terreno para los procesos agrícolas y por la elaboración de los materiales de arcilla usados como primeros utensilios domésticos, han originado el llamado "magnetismo permanente", que queda fijo en los materiales para siempre a consecuencia de un calentamiento artificial. Los mismos cultivos efectuados sobre el terreno han hecho variar sus características magnéticas, debido a los procesos biológicos originados en los mismos, modificando la composición química de las sales de hierro que se encuentran en todos los terrenos, y que por consiguiente, modifican sus propiedades magnéticas.

Por los resultados notables que ha dado éste método, es el más comúnmente usado en sitios arqueológicos.

III.6 EJEMPLOS DE APLICACION DE LA MAGNETOMETRIA EN ARQUEOLOGIA

A) PROSPECCION MAGNETICA, CERCA DEL ECUADOR GEOMAGNETICO

Una inspección magnética extensiva se realizó en Toruga, cerca de Abuja, al Norte, de Nigeria, en enero de 1960, usando un magnetómetro de protones. Al seguir el descubrimiento de fragmentos de figurines Nok de tierra cocida durante la operación de extracción en la excavación primaria que se realizó en el sitio en 1961. Esta excavación reveló una cantidad considerable de escombros de hierro sugiriendo que el sitio fue usado para fundirlo.

El objetivo de la inspección magnética fue localizar los hornos de fundición de hierro y establecer la extensión de la ocupación.

El magnetómetro de protones se ha utilizado más frecuentemente para localizar rasgos arqueológicos enterrados en Europa y Norte América (hornos chimeneas, fosas, zanja, etc.) donde el ángulo de inclinación para el campo magnético de la tierra se ubica en un rango de 50° a 70°. Sin embargo en Nigeria el ángulo de inclinación es aproximadamente cero por lo tanto la forma de la anomalía magnética producida por rasgos arqueológicos enterrados es muy diferente de la observada en Europa y Norte América.

Resultados de la Inspección Magnética en Toruga:

Un área de aproximadamente 5 acres fue inspeccionada en Toruga usando el magnetómetro de protones. El área inspeccionada incluye la porción central relativamente plana (250 pies X 400 pies de área) de el sitio y se extendió al norte en un terreno inclinado bajo el río y al sur oeste en un plano ascendente. La lectura de intensidad de campo magnético se tomaron a intervalos de 5 pies en una malla cuadrada de 50 X 50 pies en la que se tomaron 100 lecturas. El detector se mantuvo a 1 pie arriba de la superficie del terreno.

Aproximadamente se detectaron 50 anomalías inversas aisladas variada en intensidad de 5 a 130 gammas. La excavación de 56 de estas anomalías - mostraron que 9 fueron causadas por hornos (8 - 90 gammas) (lámina 3) y 10 por áreas de cacombros quemados y desechos de hierro (20 - 180 gammas). También de interés arqueológico fueron 3 anomalías producidas - por objetos de hierro incluyendo un hacha (10 - 25 gammas) y 3 anomalías asociadas a roca triturada en bruto (10 - 25 gammas). La excavación de otras 36 anomalías revelaron rasgos no arqueológicos pero un número de casos se estableció que las anomalías fueron causadas por 3 raíces quemadas fuera (5 - 15 gammas) o fragmentos de roca fuertemente magnéticas, (10 - 60 gammas).

Los rasgos arqueológicos fueron localizados todos en una porción central relativamente plana de el sitio.

La fig. III.8 muestra los perfiles magnéticos obtenidos al tomar medición en 15 intervalos transversales, recorridos norte - sur y este - oeste, a través de la máxima anomalía inversa asociada con hogueras y - en una área de desechos de hierro.

Las máximas intensidades y el ancho medio máximo (W) de la anomalía inversa asociada con hogueras estan dadas en la tabla II junto con la profundidad y dimensiones de las hogueras establecidas por excavación. Se puede ver la forma de los perfiles magnéticos con su cúspide de fuerza "invertida" y cúspide normal pequeña para el norte y sur, similar a la mostrada en la fig. III.8, para un rasgo idealizado arqueológico en el ecuador geomagnético ($I = 0^\circ$). La máxima intensidad de la anomalía inversa fue comparada con el valor estimado para la hoguera idealizada - (ver fig. III.9).

Por lo tanto la comparación cuantitativa precisa no fue posible porque la dimensión total de la hoguera no fue establecida durante la inspección magnética, la excavación se detuvo tan pronto como la causa de la anomalía fue verificada a través de la apariencia de la cumbre de la - pared de la hoguera.

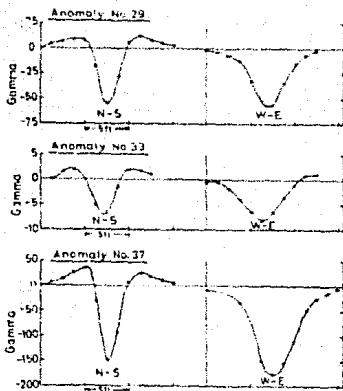


Fig. III.8. Perfiles Magnéticos a través de las 3 anomalías típicas en Toruga. Las excavaciones establecieron que la 33 y la 29 se produjeron por hornos y la N° 37 por un área de desechos de hierro.



Fig. III.9. Anomalías N° 35. Superficie de la Pared de un horno de fundición en Toruga.

El espesor máximo medio de la anomalía fue mayor en la dirección este - oeste que en la dirección norte - sur (tabla III). en el caso de la anomalía No. 35 la presencia de desechos de hierro probablemente distorsionan la anomalía magnética asociada con el horno. No fue posible comparar de nuevo la profundidad observada en el centro del horno bajo el detector con la obtenida de la anchura media - máxima de la anomalía debido a la excavación incompleta durante la conducción de la inspección magnética.

La anomalía producida por los desechos de hierro fue más fuerte que la asociada con el horno, y a excepción de la anomalía Nº 37 (Ver fig. III. B), esta no se aproximó a la forma teórica encontrada dentro de los desechos de hierro, normalmente no fueron concentraciones de masas pero fueron dispersadas en un área larga (4 - 5 pies de diámetro).

La presencia de fragmentos aislados de roca altamente magnética produjeron anomalías invertidas arriba de 60 gammas.

Los análisis químicos de dos especímenes tipo mostraron que estos contienen aproximadamente 10% de óxido de hierro y mediante medición de difracción de rayos X ésta mostraron forma de hematita y magnetita.

La mayoría de estas rocas se localizaron en la pendiente abrupta suroeste y en el sitio del área central plana de fuerte magnetismo, asociada con ésta roca para la localización de los 3 sitios de roca triturada.

CONCLUSIONES- La inspección magnética en Toruga fue extremadamente fructífera con nueve hornos de función de hierro, los hornos fueron exactamente localizados y se obtuvo una aproximación de la extensión de la ocupación. Los rasgos solo se distinguieron de la anomalía asociada con hornos que fueron perfiles generalmente aproximados con los perfiles teóricos a través de rasgos arqueológicos idealizados. Esta dificultad se compensó con la gran labor en el sitio que permitió la excavación de 56 de las anomalías detectadas.

TABLE II
 FURNACES AND ASSOCIATED MAGNETIC ANOMALIES LOCATED AT TARUGA

Anomaly No.	Magnetic anomaly ¹		Furnace		Depth ² below ground surface (in.)
	Maximum intensity (gamma)	Half maximum width (in) N-S E-W	Length (in)	Breadth	
13	15	42 70	24	24	6
24*	90	30 45	30	30	2
29	55	30 48	36	24	5
30	15	30 54	36	24	10
31	17	27 54	36	24	12
33	8	30 60	24	24	24
34	40	27 45	24	18	2
35*	20	60 54	48	36	12
48	20	45 60	30	30	18

Tabla II

* Desechos de hierro asociado con hornos.

- 1 Las dimensiones fueron medidas a través de la superficie de la pared del horno.
- 2 La profundidad fué medida de la superficie de la pared del horno. Para obtener la profundidad bajo el detector, se sumaron 12 pulgadas.

Por lo tanto se concluye que la interpretación se basa en la anomalía - "invertida", que es la anomalía normal como es el caso en Europa. Y el magnetómetro de protones se usa fácilmente para la localización de rasgos arqueológicos enterrados en sitios cerca del ecuador geomagnético.

B) EXPLORACION ARQUEOLOGICA CON EL MAGNETOMETRO DE RUBIDIO EN SYBARIS

El centro de la aplicación de la ciencia para la Arqueología del Museo de Pensilvania y varias asociaciones, desarrollaron un proyecto de exploración arqueológica con el magnetómetro de Rubidio. Este ensayo - fue realizado en el fuerte Lenox en el Ileaux-Noix del Río Richelieu, de la provincia de Quebec, en conjunto con el Departamento de Asuntos del Norte de Canada.

La Isla de Aluvión relativamente llana, contiene estructuras de interés histórico, se esperó encontrar gran cantidad de diferentes concentraciones de fierro, sin embargo, las diferentes configuraciones probadas - no justificaron un proyecto más realista.

En 1964, se seleccionó un sitio para los mismos fines, y se eligió Sybaris, en la provincia de Calabria al Sur de Italia (Fig. III.10). En alguna parte de éste llano puede descansar la Ciudad Griega de Sybaris fundada en 720 A. C., uno de los mayores establecimientos de la Magna Grecia. Sybaris ha sido famosa por su gran riqueza y lujo, y a pesar de ésto, sus restos se encuentran sepultados a 3 y 6 mts. de profundidad de arcillas y aluvión, del plano de los Ríos Crati y Coscile.

La determinación y localización exacta de la Ciudad es extremadamente difícil porque ésta región es un plano costero lentamente hundido por depósitos de lodo, el cual elimina la evidencia que de otro modo sería visible en la superficie. El hundimiento del lodo el cual originó un pantano palúdico, probablemente originó el eventual abandono del área por los Griegos. La excavación resulto ser muy difícil porque el nivel del agua es muy alto, alrededor de 1 a 2 metros bajo la superficie.

La dificultad de localización de Sybaris se vuelve más evidente cuando se analizó que los restos de la Ciudad ocuparon alrededor de 3 km. en una región de 250 km, también la alfarería Griega es contemporánea a la de Sybaris. Las mediciones eléctricas de resistividad han sido pro

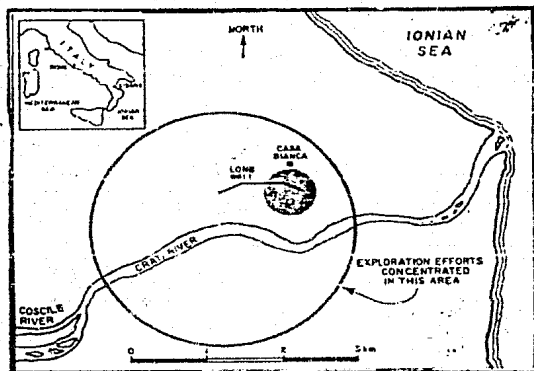


Fig. III.10 Posible localización del puerto de Sybaris. La región achurada indica el área en la cual se hizo la inspección con el magnetómetro de Rubidio.



Fig. III-11 Operación del magnetómetro de rubidio en la rejilla.

badas, pero con resultados pobres debido a lo complicado de operar en el nivel de agua superficial.

También se hicieron pruebas experimentales con el magnetómetro de protones localizando unas paredes masivas enterradas dentro de 1 100 mts. de largo con superficie superior de 1 a 3 mts., y su base de 5 mts. (Ver fig. III.12) por lo que fue necesario detectar el interior de las paredes y las estructuras.

En octubre de 1964, bajo la guía general de Frolich Rainey Director del Museo de la Universidad y Elizabeth Ralph, Directora Asociada del Centro de la Ciencia para la Arqueología, condujeron la inspección con el magnetómetro de Rubidio, en la porción en donde se localizaron las paredes. Se seleccionó un área de 90 X 120 m. estableciendo en ésta una rejilla, en donde hicieron las mediciones. Los resultados de la inspección se muestran en la fig. III.13. Estos datos fueron compilados en forma de mapas de contorno, mostrando líneas de igual intensidad magnética (ver fig. III.14). Los barrenos geofísicos se hicieron, posteriormente, para confirmar la existencia de estructuras inferidas de los datos, taladraron ladrillos, tejas, huesos y alfarería decorada, localizada a 3.5 y 5.5 m. (Ver fig. III.14) de profundidad, en donde la anomalía fue mayor que la de los sedimentos. La susceptibilidad de los sedimentos se estableció aproximadamente en 4×10^{-4} unidades electromagnéticas, y la de los ladrillos y tejas alrededor de 40×10^{-4} unidades electromagnéticas. La anomalía más prominente fue probablemente causada por el calentamiento de arcilla en forma de tejas, ladrillos y desechos de éstos. La misma pared fue construida con arenisca de débil magnetismo y se cubrió de capas fuertemente magnéticas. Éste tipo de disturbio se registró como una débil anomalía negativa.

Se realizó una segunda inspección con el magnetómetro a un nivel diferente del primero, trazándose la diferencia de los resultados a través de dos registros que se obtuvieron simultáneamente, una porción de éste mapa aparece a la derecha de la (fig. III.14) para obtener la resolución de la altura, se obtuvo un mapa de segunda derivada vertical a partir del mapa de intensidad de campo total (Fig. III.14).

Con éste ensayo se demostró la eficiencia del magnetómetro de rubidio en la exploración arqueológica.

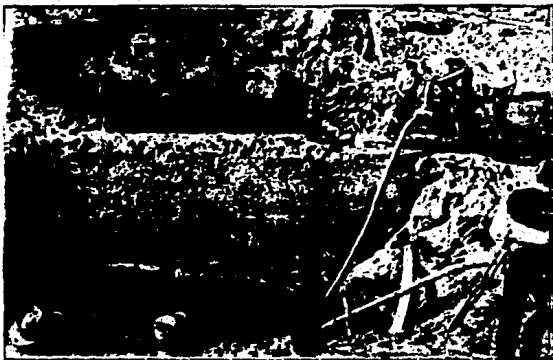


Fig. III-12. Excavación de la pared localizada con el magnetómetro de protones. Una pared Romana fué construída sobre la pared Griega, la cuál aparece justo arriba del nivel de agua.

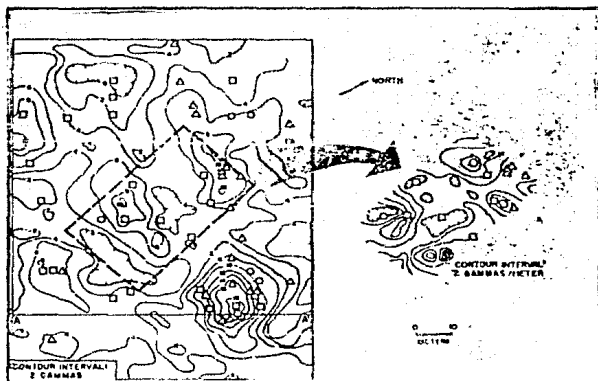


Fig. III-13 Mapa magnético y resultados de la perforación. A la izquierda está la intensidad total, a la derecha; la diferencia entre las dos inspecciones hechas a 0.5 mts. y a 1.5 mts. sobre la superficie del terreno respectivamente, en el rectángulo marcado con línea discontinua.

Los círculos no dan resultados, los cuadros son perforaciones estancadas y los triángulos es resistencia por material fríasico.

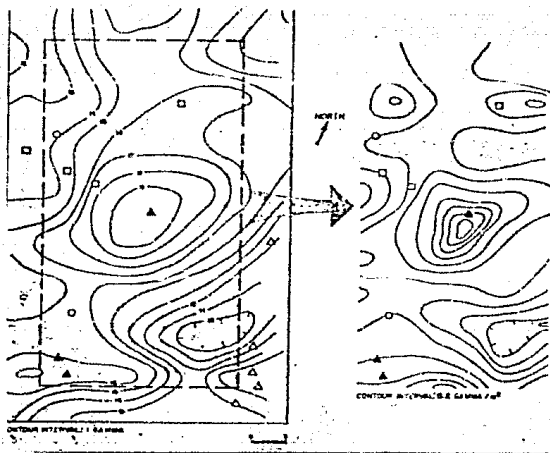


Fig. III.14 Izquierda, mapa de intensidad magnética total - dentro de las ruinas enterradas a profundidades de 3.5 a 6 mts. y resultados de la perforación. Derecha: segunda derivada vertical del área - rectangular de líneas discontinuas. Los círculos no dan resultados, los cuadros; perforaciones estancadas por la pared, los triángulos rellenos representan resistencia de material frágil (potshers); y los triángulos huecos son perforaciones estancadas por muchos potshers.

IV.- METODO ELECTRICO

IV.1 BASES TEORICAS DEL METODO ELECTRICO

IV.1.1 Resistividad y Conductividad Eléctrica.

Consideremos un cilindro de área de sección transversal A (m^2) y de longitud L (m), a través del cual circula una corriente de I (Amperes) paralelo al eje. Si V es la caída de potencial del cilindro, la resistencia está dada de acuerdo a la Ley de Ohm.

$$I = \frac{V}{R} \quad \dots\dots\dots (IV.1)$$

si ρ es la resistencia específica tenemos:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad [\Omega \cdot m] \quad \dots\dots\dots (IV.2)$$

Por lo que la resistencia eléctrica depende del tamaño del conductor y de la Resistividad del material en cuestión, L es la longitud del área de sección transversal. De la expresión de la resistencia tenemos:

$$\rho = R \frac{L}{A} \quad [\Omega \cdot m] \quad \dots\dots\dots (IV.3)$$

La resistividad es una característica del material conductor. La conductividad es el inverso de la resistividad, y se define de la siguiente forma:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad \dots\dots\dots (IV.4)$$

La resistividad de los suelos y rocas varía dentro de un amplio rango y está relacionada con el contenido de salinidad que existe en estos, la resistividad eléctrica disminuirá en el agua con salinidad alta. La conductividad de los suelos y rocas es principalmente de tipo iónico o electrolítico, ya sea del flu-

jo de corriente debido al movimiento de los iones o en soluciones saturadas. Existen tablas de clasificación de rocas y suelos de acuerdo a sus resistividades que más comúnmente presentan.

IV.1.2 Medición de la Resistividad.

A continuación se mencionan algunas de las formas de medición de resistividad más utilizadas:

- i) Por medio de mediciones geolétricas realizadas en la superficie del terreno.
- ii) Por mediciones efectuadas en el interior de sondeos mecánicos.
- iii) Por medio de determinaciones de laboratorio sobre muestras extraídas del sitio de interés.

La forma (i), es la que se emplea en los trabajos arqueológicos, mediante la inyección de corrientes eléctricas al terreno creándose un campo eléctrico, para ello se considere un espacio infinito dividido en dos subespacios de resistividad infinita, una representa la atmósfera y la otra representa el subsuelo con resistividad, ρ .

En la figura IV.1 y IV.2, se presenta una forma esquemática de la distribución del campo eléctrico para un semiespacio homogéneo e isotrópico. La línea de corriente se representan como líneas de discontinuas y son tangentes a cualquier punto en la dirección de la corriente eléctrica en ese punto. Las superficies equipotenciales, son aquellas en las que el valor del potencial eléctrico es constante, siendo perpendiculares a las líneas de corriente.

La corriente con intensidad I_A penetrará por A en el

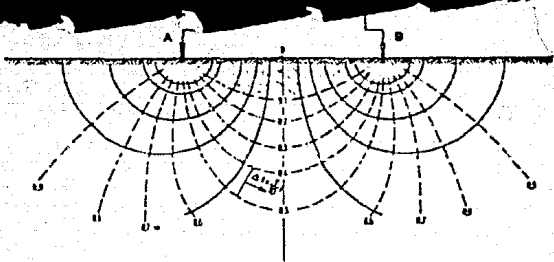


FIG. IV.1

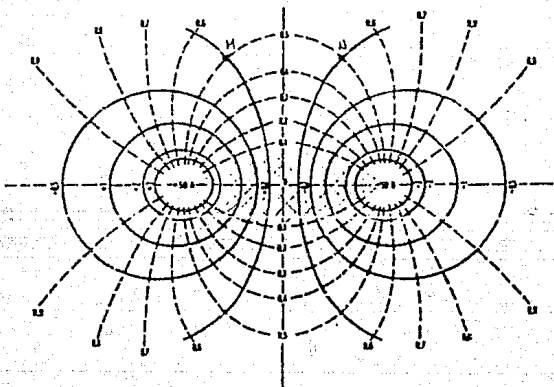


FIG. IV.2

$$+MV \quad \epsilon = \frac{1}{25} AB$$

$$-10V \quad \epsilon = \frac{1}{100} AB$$

subsuelo y después de recorrerlo saldrá por B con intensidad I_B volviendo al generador de pilas para cerrar el circuito, por lo que

$$I_A + I_B = 0 \quad \text{.....} \quad (\text{IV.5})$$

para establecer las leyes de este fenómeno, se parte de las ecuaciones de Maxwell

$$\nabla \times \mathbf{K} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad \text{.....} \quad (\text{IV.6})$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \vec{\mathbf{J}} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad \text{.....} \quad (\text{IV.7})$$

donde, por tratarse de un campo estacionario, habrán de anularse las derivadas temporales, obteniendo

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0 \quad \text{.....} \quad (\text{IV.8})$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \vec{\mathbf{J}} \quad \text{.....} \quad (\text{IV.9})$$

La ecuación (8), nos dice que el campo eléctrico \mathbf{E} es conservativo o irrotacional, por lo que deriva de un potencial escalar U

$$\mathbf{E} = - \nabla U \quad \text{.....} \quad (\text{IV.10})$$

asimismo, habrá de cumplirse la ley de Ohm para medios isótropos en su forma diferencial que es:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad \text{.....} \quad (\text{IV.11})$$

lo que indica que la intensidad de corriente $\vec{\mathbf{J}}$ en un punto, tiene la misma dirección y sentido que el campo $\vec{\mathbf{E}}$ en el mismo punto, siendo proporcionales dichos campos. Dado que en ningún punto del espacio conductor puede haber aparición o desaparición de cargas, -

salvo en los electrodos A y B, ocurrirá que:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad \text{..... (IV.12)}$$

combinando estas ecuaciones y desarrollándolas tenemos:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = \nabla \cdot (\sigma \mathbf{E}) = 0$$

$$\nabla \cdot (\sigma \mathbf{E}) = \sigma \nabla \cdot \mathbf{E} + \mathbf{E} \cdot \nabla \sigma$$

$$= -\sigma \nabla \cdot \nabla U + \mathbf{E} \cdot \nabla \sigma$$

$$\Rightarrow -\sigma \nabla^2 U + \mathbf{E} \cdot \nabla \sigma = 0$$

dentro de cada zona de conductividad uniforme será $\nabla \sigma = 0$, y por lo tanto

$$\nabla^2 U = 0 \quad \text{..... (IV.13)}$$

que es la ecuación de Laplace, la cuál será válida en todo el semiespacio conductor, pero no en los electrodos.

IV.1.3 Campo Eléctrico debido a un Electrodo Puntual

Si se tiene un electrodo insertado parcialmente en el terreno del semiespacio de resistividad uniforme, y se mantiene un potencial V por medio de una batería, el flujo de corriente será constante y en forma radial al electrodo. La integral de \vec{J} (densidad de corriente) sobre una superficie semiesférica (equipotencial) será igual a I , por lo que si el radio es r se tendrá:

$$2 \pi r^2 \vec{J} = I \quad \text{..... (IV.14)}$$

despejando \vec{J} y substituyendo en IV.11, tenemos

$$J = \sigma E = \frac{I}{2 \pi r^2} \quad \dots \quad (IV.15)$$

de donde

$$|E| = \frac{I}{\sigma 2 \pi r^2} = \frac{I \rho}{2 \pi r^2} \quad (IV.16)$$

El campo \vec{E} de un electrodo puntual es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia r .

De aquí por integración, el potencial en un punto de radio r está dado por

$$U = \frac{\rho I}{2 \pi r} \quad \dots \dots \dots \quad (IV.17)$$

Ahora si r_1 y r_2 son las distancias de los electrodos M y N al electrodo A , tenemos:

$$U_{MN}^A = \frac{\rho I}{2 \pi} \int_{r_2}^{r_1} \frac{dr}{r^2} = \frac{\rho I}{2 \pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (IV.18)$$

IV.1.4 Resistividad Aparente como Anomalia.

Supongamos que en un semiespacio de resistividad se hacen determinaciones de la caída de potencial V para un arreglo entre electrodos de corriente (A y B) y de recepción (M y N), como el mostrado en la fig. IV.3, mediante la siguiente relación

$$\Delta V = \frac{\rho I}{K} \dots\dots\dots (IV.19)$$

donde K es un factor geométrico

De la ecuación IV.19, la variable que se desconoce es ρ , pero si despejamos ésta de dicha ecuación, se define

$$\hat{\rho} = K \frac{\Delta V}{I} \dots\dots\dots (IV.20)$$

La ecuación anterior, expresa que la resistividad se puede determinar a partir de mediciones hechas en superficie, al menos para un semiespacio.

Sin embargo, si el medio es heterogéneo y si aplicamos el mismo arreglo se puede llegar a la ecuación IV.20, pero es obvio que ésta no refleja la resistividad verdadera del medio heterogéneo, como en el caso anterior, por lo que ahora se define como:

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \dots\dots\dots (IV.21)$$

donde ρ_a recibe el nombre de resistividad aparente. Es éste el parámetro fundamental en exploración eléctrica, por ser la variable experimental que se observa en la naturaleza.

IV.2 JUSTIFICACION DEL USO DEL METODO ELECTRICO A LA ANQUEOLOGIA

La prospección de la superficie de un sitio arqueológico sin la necesidad de excavaciones, pueden ser llevadas a cabo por métodos basados en las propiedades eléctricas de la misma. En general cualquier construcción enterrada tiene características físicas diferentes del terreno que la circunda, y por consiguiente, una diferente resistividad. Los métodos de prospección eléctrica hacen posible delimitar áreas del terreno con diferente contraste de resistividad que permiten localizar formaciones arqueológicas. La electricidad se conduce a través del terreno por el proceso de electrólisis, y la facilidad con la cuál ocurre, depende la cantidad de agua retenida en los poros de las construcciones sólidas y rocas, en éstas últimas se considera que tienen una alta resistividad comparadas con arcillas y barro, y éstas variaciones se fundan de acuerdo al contenido de agua.

El origen del contraste de resistividades en una área de inspección arqueológica se debe principalmente a algunos rasgos terrenos tales como poros de almacenamiento, relleno de zanjas o montículos, fundaciones o casas de lodo, paredes de roca, etc. En las dos últimas décadas, éste método se ha venido utilizando con buenos resultados en la investigación arqueológica.

IV.3 EJEMPLOS DE APLICACION DEL METODO ELECTRICO A LA ARQUEOLOGIA.

A) RESULTADOS GEOFISICOS-ARQUEOLOGICOS EN HUNGRIA.

En años recientes, se aplicó la técnica de medición de resistividad de un sitio arqueológico de Hungría. La edad de éste sitio comprende un rango de la era paleolítica hasta principios de la historia de Hungría.

Los restos de paredes de piedra y construcciones, datan de la edad Romana (en el primer siglo D. C.) son objetos arqueológicos que generalmente tienen mayor resistividad que el ambiente circundante.

Las mediciones geoelectricas fueron hechas usando un D-10R (ELGI) portable, de medición de resistividad digital. Durante las mediciones de prueba, se utilizó el arreglo Schlumberger, pero al tomar las mediciones finales se reemplazó por un arreglo dipolo-dipolo, el cual es más conveniente para medición de perfiles. El espacio entre electrodos del dipolo fue de 1 a 2 mts., se usó con separación transmisor-receptor (N) de 2 a 5 mts. para espacio de electrodos de 1 m. y de 4 a 10 mts. para espacio de electrodos de 1 m. y de 4 a 10 mts. para espacio de electrodos de 2 mts.

Los restos Húngaros, en establecimientos militares datan de la edad Romana. Históricamente, la parte oeste de Hungría (Transdanubia) fue una provincia Romana llamada Pannonia, ésta provincia fue el borde poniente del Imperio Romano a principios del primer siglo de la era cristiana, hasta mediados del siglo V.

Los establecimientos militares (fuertes, campos militares y torres de vigilancia), fueron construídos durante éste período para defenderse del imperio Romano. En tiempos de paz, comenzó el establecimiento de la civilización (construyendo desde villas hasta ciudades), en excavaciones de éstas áreas se han descubierto muchos objetos sofisticados relacionados con el arte y la cultura.

Un fuerte Romano tiene dimensiones de 500 X 500 m y la excavación arqueo-

lógica completa es generalmente imposible, por lo que la prospección geofísica juega un importante papel en áreas de excavación definitiva. Las causas de las anomalías son: paredes exteriores de las fortalezas (Frecuentemente de 2 a 5 mts. de ancho) barbaccanas (terres defencivas exteriores) éstas están situadas en las esquinas y a distancias regulares a lo largo de las paredes.

Las paredes en los perfiles se distinguen por una resistividad del 50 al 100% el cual facilitó el mapeo de una torrecilla en la esquina y dos barbaccanas próximas al fuerte. La determinación geofísica de la posición de las paredes y las barbaccanas de los fuertes fue espacialmente importante en lugares en los que la excavación arqueológica fue imposible por el alto nivel del agua superficial, en consecuencia, fuera de la inspección una parte considerable del área habría permanecido desconocida.

Las mediciones de resistividad también fueron hechas en una hacienda de la misma edad Romana, el área de la hacienda fue de 16 hectáreas, en la superficie arqueológica examinada se han localizado 12 construcciones y en dos de ellas se excavó. El perfil de resistividad con un arreglo dipolo-dipolo usando espacio entre electrodos de 1 m. y en N de 3 mts. fue realizado dentro de una de las construcciones la cual no fue excavada. Los resultados se ilustran en el mapa de resistividad de la fig. IV.4 - Las isoclinas cerradas indican alta resistividad cerca de la superficie donde las ruinas se acumieron.

La fig. IV.5 (curva a) muestra un perfil típico de resistividad cruzando las líneas de la construcción. El mapa de anomalía de la fig. IV.4 fue construido en base al perfil longitudinal y transversal localizado a partir de 1 a 10 mts., se construyó otro perfil similar usando un filtro matemático (fig. IV.5 curva b) por lo tanto el efecto de la pared cruzada por el perfil se distinguió claramente de los escombros. Para la construcción del filtro matemático se utilizaron curvas teóricas y resultados de modelos físicos usando datos conocidos de las excavaciones de otras construcciones de la hacienda (espesor de las paredes, profundidad, etc.). El arreglo interior de las construcciones se hizo por correlación de los perfiles que indican los perfiles paralelos y horizontales - (fig. IV.6).

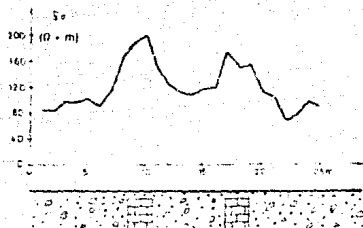


Fig. IV.3 Perfil de resistividad aparente en las ruinas de una barbacana Romana (torre defensiva), la resistividad máxima indica la pared. (de un Fuerte Romano en Sagvar, Hungría).

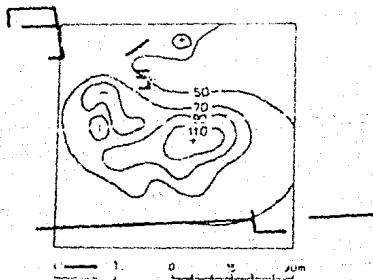


Fig. IV.4 Mapa de resistividad aparente en los restos de una construcción enterrada (isolíneas en $\Omega \cdot m$), construido del perfil de resistividad similar a la curva a en la fig. 5 (de una Hacienda Romana en Dalácapusza, Hungría)

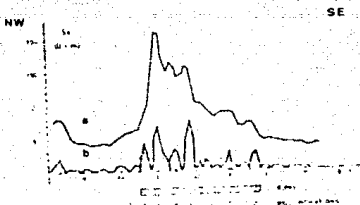


Fig. IV.5 Perfil de resistividades (B-12 en la fig. IV.6) en los restos de una construcción enterrada. - (a) medición y filtrado pasa-baja del perfil de resistividades mostrando la extensión de las ruínas; (b) perfil filtrado con un detector de señales que indica la pared. (de una Hacienda Romana en Blácapussta, Hungría).

En 1984, un utensilio altamente sofisticado hecha con cuernos de venado fue donado al Museo histórico de Budapest, localizado en los alrededores de Budapest, el sitio pudo estar fundado en una meseta dolomítica - mostrado en la fig. IV.7; durante la examinación del área se descubrieron indicaciones de trabajo humano, como el área es relativamente larga, la inspección eléctrica se uso para determinar más aproximadamente la - localización de la mina de pedernal, presumiblemente prehistórica.

Las dimensiones de la meseta es de 80 X 15m. La primera inspección geoelectrica fue hecha a lo largo del perfil mostrado en la fig. IV.7 (perfil A B) como mediciones de resistividad aparente con un arreglo dipolo -dipolo a diferentes espacios N, el espacio entre electrodos usado fue de 1 m, con un máximo N igual a 3.5 mts. Para el trazo de los datos se utilizó la introducida por Hallor (Edwards, 1977), cada valor medio se trazó en la intersección de dos líneas de 45° por el centro del dipolo, los resultados de las mediciones se ilustran en las seudosecciones de - resistividad de la fig. IV.8.

La fig. IV.9 tridimensional muestra la extensión y forma de la trinchera hecha para minería, se elaboró con valores de resistividad aparente a diferentes profundidades de penetración. La sección achurada en la fig. - IV.9, aproximadamente reunió 60 utensilios mineros de cuerno de venado. Los arqueólogos han dado un dato preliminar para la mina de pedernal de aproximadamente 50,000 años A.C. (a mediados de la era paleolítica de la cultura Mosterian).

Para concluir, se tiene que a pesar de las excavaciones exitosas, la interpretación de las mediciones geofísicas no son muy completas. También se realizó un levantamiento magnético en los mismos sitios de inspección geoelectrica para comparar ámbos datos y las excavaciones llevadas a cabo fueran lo más exactas posible.

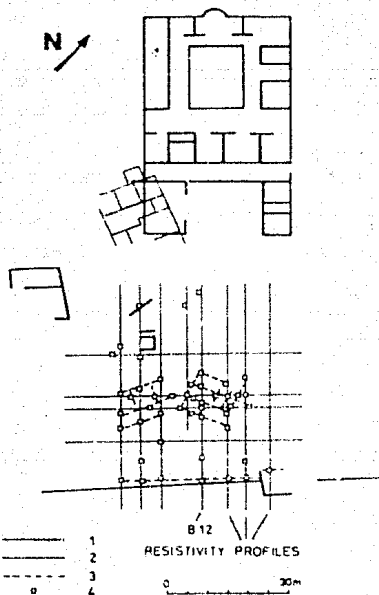


Fig. IV.6

Mapa esquemático construido por correlación del perfil de resistividades de las paredes (similar a la curva (b) en la fig. IV.5). (1) pared excavada en el primer siglo D.C.; (2) excavación de las paredes en el tercer siglo D.C.; (3) paredes sugeridas de la de la interpretación del perfil de resistividades; - (4) indicación de paredes.



Fig. IV.7 Investigación geofísica : sitios de excavación arqueológica en la mina de pedernal, en las cercanías de Budapest, A-B es el perfil geofísico de prueba (alrededor de 60 mts. de longitud); las dimensiones del área de inspección geofísica es alrededor de 20 X 30 m.

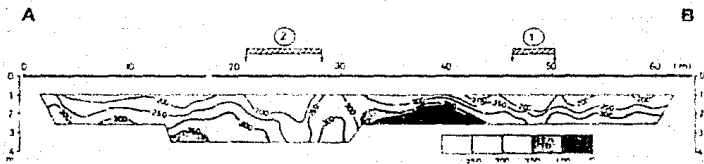


Fig. IV.8 Pseudosección de resistividad (A-B en la fig. 7.7) con el que se propuso la excavación arqueológica (1) no asociada a un terpilion; (2) sitio de la mina de pedernal paleolítica.

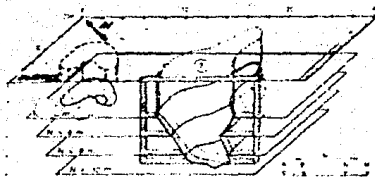


Fig. IV.9 Figura tridimensional de los datos geofísicos mostrando la forma de la mina de pedernal. El sitio de la excavación realizada en 1984 se achuró (2).

V.- METODO SISMICO.

Dentro de las Técnicas de campo se encuentran el de Refracción y el de Reflexión. Debido a que en la investigación arqueológica el objetivo se localiza a poca profundidad, se dará una breve teoría del Método Sísmico de Refracción.

V.1 BASES TEORICAS DEL METODO SISMICO DE REFRACCION.

Para el Método Sísmico de Refracción, de un frente de ondas - las que se utilizan son las ondas refractadas, tal como lo - ilustra la fig. V.1, en la que se observa que la onda incidente se refracta en un horizonte con un ángulo crítico θ_c , después de que ésta se refracta, ésta viaja a lo largo de la interfase de el medio inferior, produciendo un movimiento oscilatorio paralelo a la misma. El disturbio en el medio superior viaja en la interfase con velocidad v_2 , tal como lo indica la fig. V.2, y llega a un tiempo t .

De acuerdo al principio de Huygens, P es el centro en el cuál la onda tiende a salir al medio superior. Después de un intervalo de tiempo mayor Δt , ésta onda tiene un radio $v_1 \Delta t$, mientras tanto la onda se mueve a lo largo del refractor que ha llegado a Q, PQ, siendo igual para $v_2 \Delta t$. Obteniendo la tangente de Q para el arco de radio $v_1 \Delta t$. Obtenemos el frente de ondas RQ.

Aquí el paso de la onda refractada a lo largo de la interfase en el medio inferior genera una onda plana que viaja hacia arriba con un ángulo θ , donde

$$\text{Sen } \theta = \frac{v_1 \Delta t}{v_2 \Delta t} = \frac{v_1}{v_2} \dots\dots\dots V.1$$

Se observa que $\theta = \theta_c$, así las trayectorias están dispuestas simétricamente con respecto a la normal del refractor.

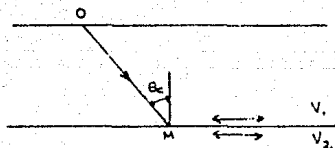


Fig. V.1

Normalmente el frente de ondas no se observará en offsets menores que ON , de la fig. V.2 se tiene que:

$$X' = ON = Z \tan \theta_c = Z \tan \left\{ \text{Sen}^{-1} \left(\frac{v_1}{v_2} \right) \right\} = 2Z \left\{ \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 - 1 \right\}^{-\frac{1}{2}} \quad \text{..V.2}$$

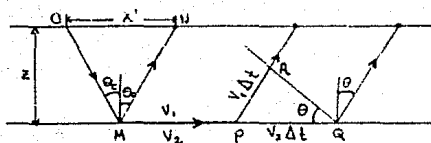


Fig. V.2

Como una regla empírica, las refracciones sólo son observadas en offsets mayores que el doble de la profundidad de el refractor.

Refractor en un horizonte. La fórmula se puede obtener a partir del tiempo de arribo, del offset, la profundidad y las velocidades. La fig. V.3, muestra la trayectoria inferior en un refractor horizontal separado por dos medios de velocidades v_1 y v_2 - donde $v_2 > v_1$. Para un geófono en R, la trayectoria de una onda refractada es $OMPR$, θ es el ángulo crítico. El tiempo de viaje es:

$$t = \frac{OM}{V_1} + \frac{MP}{V_2} + \frac{PR}{V_1} = \frac{MP}{V_2} + 2 \frac{OM}{V_1}$$

$$t = \frac{x - 2z \tan \theta}{V_2} + \frac{2z}{V_1 \cos \theta} = \frac{x}{V_2} + \frac{2z}{V_1 \cos \theta} \left(1 - \frac{V_1}{V_2} \operatorname{Sen} \theta \right)$$

$$t = \frac{x}{V_2} + \frac{2z \cos \theta}{V_1} \dots \dots \dots V.3$$

Se usó la relación $\operatorname{Sen} \theta = V_1/V_2$. La ecuación V.3 también se puede escribir como:

$$t = \frac{x}{V_2} + t_1 \dots \dots \dots V.4$$

donde: $t_1 = (2z \cos \theta) / V_1$ ó $z = \frac{1}{2} V_1 t_1 / \cos \theta \dots \dots V.5$

Las ecuaciones V.3 y V.4 representan una línea recta con pendiente $-1/V_2$ y tiempo de intercepción t . Esta se ilustra en la fig. V.3 donde OMQ, OMP'R', y OMP''R'' son una serie de trayectorias de refracción y DWS es la correspondiente curva de tiempo-distancia. Nótese que éstas ecuaciones de la línea recta no tienen un significado físico para offsets menores que x' , puesto que la onda refractada no existe para tales valores de x ; no obstante se proyecta la línea atrás hacia el eje de tiempo hasta encontrar t_1 .

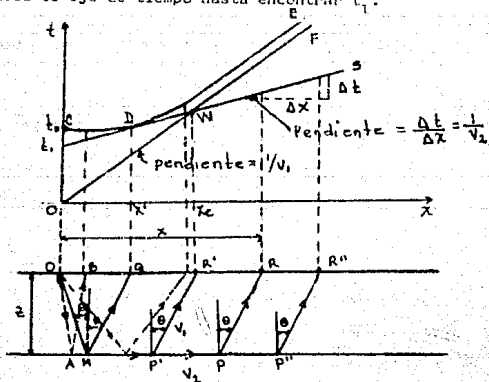


Fig. V.3.

El problema es encontrar la profundidad z y dos velocidades V_1 y V_2 . La pendiente de la onda-directa de la curva tiempo-distancia es el recíproco de V_1 , y así simultáneamente se localiza V_2 . Se calcula el ángulo crítico θ de la relación $\theta = \text{Sen}^{-1}(V_2/V_1)$ y se utiliza el tiempo de intercepción t_1 para calcular z de la ecuación V.5

Diversos horizontes refractados. Para un medio estratificado horizontal, las ecuaciones V.3, V.4 y V.5, pueden generalizarse para cubrir el caso de más de un horizonte refractado. Consideremos un medio como el mostrado en la fig. V.4 en donde se tienen 3 medios de velocidades V_1 , V_2 y V_3 , (siempre $V_2 > V_1$), en éste la trayectoria refractada OMPR corresponde a la curva tiempo-distancia WS, si $V_3 > V_2 > V_1$, el viaje de la trayectoria de refracción en V_3 alcanzará eventualmente a la refracción en V_2 .

Las trayectorias de refracción tales como OM' M' P' P' R' se establecen por la ley de Snell

$$\frac{\text{Sen}\theta}{V_1} = \frac{\text{Sen}\theta}{V_2} = \frac{1}{V_3} \dots\dots\dots V.6$$

donde θ_2 es el ángulo crítico para el horizonte inferior, a la vez que θ_1 , es menor que el ángulo crítico para el horizonte superior. La expresión para la curva de tiempo de viaje ST se obtiene como sigue:

$$t = \frac{OM' + M'P'}{V_1} + \frac{M'P' + P'R'}{V_2} + \frac{M'P'R'}{V_3}$$

$$t = \frac{2z_1}{V_1 \text{Cos}\theta} + \frac{2z_2}{V_2 \text{Cos}\theta_2} + \frac{X - 2z_1 \tan \theta_1 - 2z_2 \tan \theta_2}{V_3}$$

$$t = \frac{X}{V_3} + \frac{2z_2}{V_2 \text{Cos}\theta_2} \left(1 - \frac{V_2}{V_3} \text{sen}\theta_2 \right) + \frac{2z_1}{V_1 \text{Cos}\theta_1} \left(1 - \frac{V_1}{V_2} \text{sen}\theta_1 \right)$$

$$t = \frac{X}{V_3} + \frac{2z_2}{V_2} \text{Cos}\theta_2 + \frac{2z_1}{V_1} \text{Cos}\theta_1 = \frac{X}{V_3} + t_2 + t_1 \dots\dots\dots V.7$$

Así la curva de tiempo-distancia para ésta refracción es también una línea recta cuya pendiente es el recíproco de la velocidad justo abajo del horizonte de refracción y cuya intercepción es la suma de términos de la forma $(2z_i / V_i \cos \theta_i)$ cada medio sobre el horizonte refractado - contribuye con un término, generalizado para n medios se tiene

$$t = \frac{x}{V_n} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{2z_i}{V_i} \cos \theta_i \dots\dots\dots \text{V.B}$$

donde $\theta_i = \text{Sen}^{-1}(V_i / V_n)$. Estas ecuaciones pueden ser utilizadas para encontrar las velocidades y espesores de cada uno de los horizontes refractados en un medio estratificado, a la vez que se pueden encontrar todas las velocidades (de aquí también los ángulos θ_i) por medición de pendientes de las varias secciones de la curva de tiempo-distancia, obteniendo, finalmente, los espesores de cada capa.

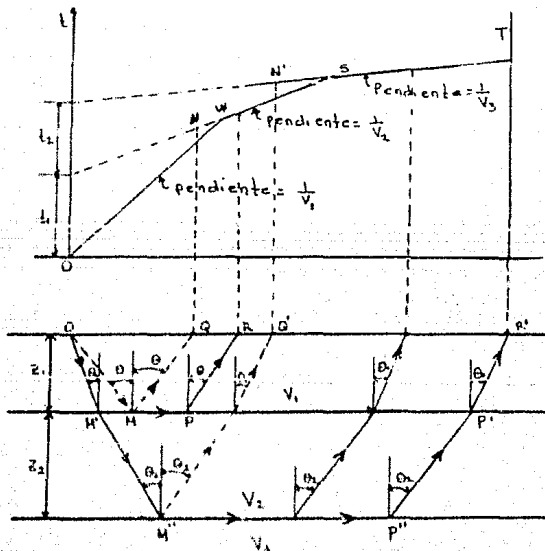


Fig. 4.1

7.2 JUSTIFICACION DEL USO DEL METODO SISMICO A LA ARQUEOLOGIA

El analisis presentado en las bases teoricas del Metodo Sismico de Refraccion, se hace respecto a un medio estratificado, que no es el caso que se tendria en un sitio arqueológico, ya que el objeto que se desea localizar por este Metodo, no se encuentra ordenada en forma de capas, sino que se encuentra en forma dispersa y a poca profundidad.

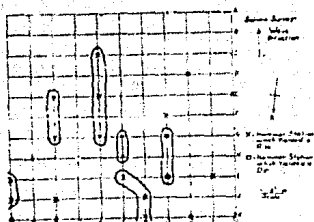
Sin embargo, se puede obtener una muy buena aproximación de la profundidad del objeto, mediante el cambio de velocidades, obtenidas de los tiempos de arribos.

V.3 EJEMPLO DE APLICACIÓN DEL METODO SISMICO A LA ANQUEOLOGIA

Inspección Sísmica en el embarcadero Harpers.

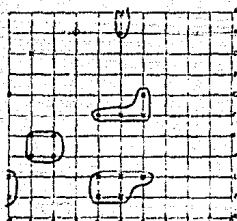
La inspección arqueológica de prueba fue conducida en un sitio en desuso (desde 1860) en el Embarcadero Harpers, al oeste de Virginia, en el verano de 1962. En el sitio también se realizó un levantamiento eléctrico, coincidiendo los puntos de medición en ambos métodos, trazadas en dos direcciones; una en dirección norte-sur, y otra en dirección este-oeste.

Los resultados de la inspección sísmica dieron la profundidad del material de alta velocidad (roca compacta) de alrededor de 15 a 17 pies. Las anomalías se notaron en ambas inspecciones (sísmica y eléctrica). Estas anomalías se interpretaron como altos y bajos muestreados en dos rejillas, una representando la inspección norte-sur (Fig. V.10) y la otra representando la inspección este-oeste (Fig. V.12) incluyendo la fuente de energía (martilleo), algunas de las cuáles mostraron anomalías originadas por estructuras (Fig. V.13), que en áreas conocidas, éstas fueron excavadas. El 70% de las anomalías correspondieron a estructuras. Con este hecho se concluye que el método sísmico da buena estimación de la profundidad de los rasgos arqueológicos, comprobándose en la excavación.



Tendido en dirección Sur

Fig. V.11



Tendido en dirección Oeste

Fig. V.12

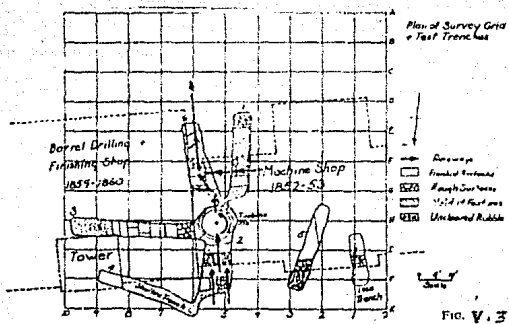


Fig. V.3. Resultados de la Inspección

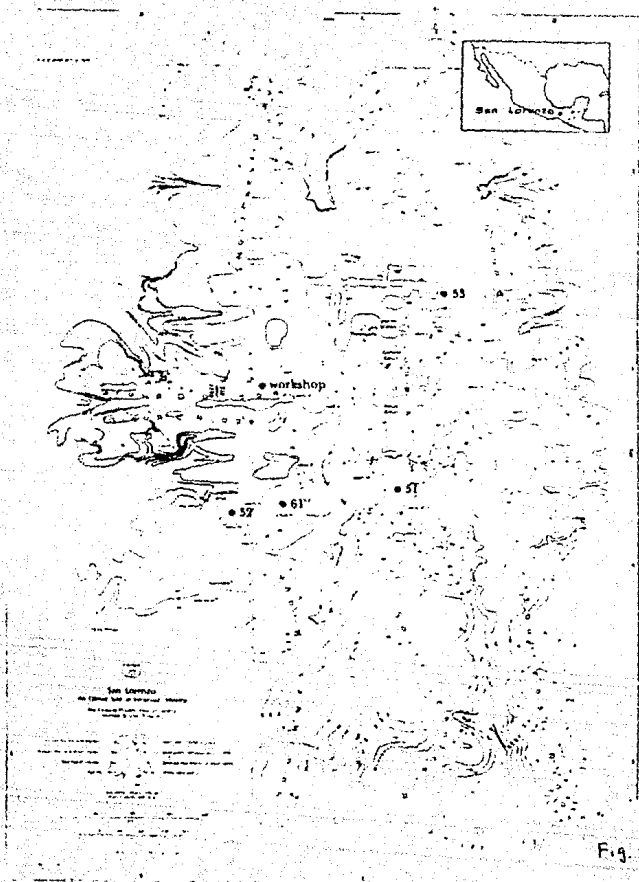
VI. APLICACIONES PARA MEXICO.

A continuación se mencionan algunos ejemplos de aplicación de Explotación Geofísica llevadas a cabo en sitios arqueológicos mexicanos. Se consideró mencionar aquellos de mayor relevancia, aunque también representan la mayoría de las exploraciones arqueológicas utilizando métodos geofísicos, esto no quiere decir que representan todas las inspecciones, ya que se omitieron algunos de ellos.

A) EXPLORACION MAGNETICA DE LA CIVILIZACION OLMECA.

Marco Histórico: La Civilización Olmeca, se desarrolló aproximadamente de 1200 años A.C. a 400 años A.C., fue la primera de las culturas indígenas. Muchos sitios Olmecas se concentraron en una área relativamente pequeña: en la parte central a lo largo de las tierras bajas del litoral sur de Veracruz y Tabasco, pero también algunos Centros Olmecas se establecieron en las tierras altas del Centro de México y en el Estado de Guerrero. El primer sitio es conocido por sus magníficos monumentos grabados hechos en basalto, con un peso superior a 40 toneladas. El más relevante es la cabeza colosal gigante de piedra que representa un soberano, de labios gruesos, rostro seco, dando la apariencia de usar casco. En los grabados monumentales y los objetos trabajados finamente de jade y serpentina, los temas dominantes parecen ser religiosos, dioses representados por una combinación de jaguares e infantes humanos.

Localización: De los 4 principales sitios Olmecas, el más antiguo parece ser el de San Lorenzo, localizado a un lado de un afluente del Río Coatzacoalcos, al sur de Veracruz. Este sitio fue descubierto en 1945 por Matthew Stirling, del Instituto Smithsonian, quien rápidamente probó la extensión total de todos los monumentos Olmecas, durante los dos años que duró su exploración en éste sitio, los grabados fueron descubiertos ya sea en el fondo de las barrancos o en las pendientes de las mismas, por lo que concluyó que ninguna se encontraría en el lugar original, sino que fueron empujadas al sitio.





Inspección con el termómetro de Celsio, en la Planicie de San Lorenzo.

por invaciones no Olmecas.

Proyecto San Lorenzo: En 1966, Coe hace una investigación en San Lorenzo bajo los auspicios de la Universidad de Yale y el Instituto Nacional de Antropología e Historia de México, en San Lorenzo descubrió una meseta plana de alrededor de 1 km. por 1/4 de km. en dirección norte-sur, en donde se extiende una cañada en el lado sur y noroeste, más bien. la primera fue el resultado de la erosión y la cañada fue el resultado del trabajo del hombre para la construcción de montes cercados.

Muchos de los monumentos en San Lorenzo fueron grabados en basalto, el cual no es originario del área, pero fue traído por arrastre de las montañas de Tuxtla, situado a 70 km. al noreste del sitio. Se determinó si sería usado el método magnetométrico en el lugar, y en febrero de 1968, se fijaron las condiciones de San Lorenzo. Se obtuvieron muestras de monumentos y aluvión (principalmente enterrado), dando el magnetismo de inducción y remanente de los monumentos fue de 2×10^{-4} a 4×10^{-4} e.m.u. respectivamente, contrastando con una magnetización total del aluvión de 3×10^{-5} e.m.u., por lo que se consideró un sitio ideal para el uso efectivo de la inspección magnética, a la vez que la zona está desprovista de implementos recientes tales como: líneas eléctricas, tráfico vehicular, objetos de fierro y acero, etc.

Inspección Magnética: El levantamiento magnético en San Lorenzo se realizó con un magnetómetro portable del Celsio, que tiene una sensibilidad de 0.1 gammas (10^{-6} oersted). Se hicieron pruebas de campo tomándose lecturas ocasionales, con el objeto de tener una idea de las condiciones del sitio para localizar zonas anómalas aproximadas, de ésta forma, se localizó una escultura Olmeca (fig. VI.3), que representa a un Dios de la Lluvia, el cual tiene rasgos típicos de mitad humano y mitad jaguar.

Por lo tanto, fue necesario hacer una inspección sistemática, en orden para obtener convergencia completa del área.



Ello requirió producir un mapa magnético de la planicie completa de San Lorenzo. Por lo que las mediciones se hicieron en una rejilla regular, cuyas dimensiones se determinaron por el tamaño y profundidad probable máxima de anomalía de interés, deduciendo buscar un monumento Olmeca con un tamaño mínimo de 1 m^3 de volumen, bastante larga para producir una anomalía detectable a una distancia máxima de alrededor de 2 a 3 mts. Esto indicó un intervalo en la rejilla de 2 mts.

Las partes más accesibles en San Lorenzo se dividieron en 31 rejillas, midiendo 100 mts. de lado, para lo cual se utilizaron cuerdas marcadas previamente cada 2 mts. Las lecturas se tomaron en cada marca con el magnetómetro colocado a medio metro de altura sobre el terreno, de ésta forma, se tomaron un total de 80 000 mediciones. Desafortunadamente debido al terreno irregular y densidad de la selva, no se levantaron varias zonas de la planicie.

Los resultados de la inspección mostraron los efectos de pequeñas depósitos fijos, anomalías causadas por artefactos de escombros de piedras utilizadas para esculpir los monumentos, también el efecto de esculturas pequeñas que sólo apareció en un punto de la rejilla, en ambos casos fueron dudas de las que se podría prescindir.

Para todas las rejillas se computó el campo magnético terrestre a un metro de altura, así, el menor peso supuesto da un efecto débil en los puntos adyacentes, estableciéndose gran confianza en la localización y existencia de objetos de tamaño significativo, en el que el efecto es poco profundo. A los datos se les aplicó el proceso de continuación ascendente, 400 000 puntos se procesaron con tal técnica de interpolación de bajo orden (traslape).

Se utilizó derivada total de intensidad de campo magnético en aproximadamente $300\ 000 \text{ m}^2$ de la planicie de San Lorenzo.

Los mapas fueron interpretados para una localización precisa, estimando el tamaño del rasgo con la anomalía magnética. La perspectiva tridimensional mostrada de los datos de las curvas, fueron derivados de la gráfica representativa de la variación del campo magnético causada por las formas geométricas de los monumentos, tal como se muestra en la fig. VI.4.

Resultados de la Inspección: Las excavaciones se hicieron basándose en el mapa de Anomalías Magnéticas. 17 monumentos Olmecas fueron descubiertos, que de otra forma hubiesen pasado desapercibidas por el más sagaz y paciente arqueólogo.

La mayoría se localizó en la parte central de la planicie (ya que en la cima, la inspección magnética fue incompleta). Entre los monumentos más impresionantes fueron 2 cabezas colosales (monumento 53, fig. VI.1), una de las cuales se representa en la fig. VI.7. El monumento 61 (de la fig. VI.1) es sin duda, una de las piezas maestras del arte precolombino (se encontró sin mutilación alguna, en una fosa de 5 mts. de profundidad), fig. VI.5 y VI.6.

En lo que respecta a estelas y columnas, una de ellas muestra una escena en bajo relieve de un nombre y un jaguar, fragmentos de altares rectangulares y altares redondeados. Otra de las estelas lleva motivos completamente nuevos a la iconografía Olmeca, un extraordinario pescado con la cabeza de jaguar, de significancia desconocida.

El monumento 52, fig. VI.1, muestra la estatua del Dios de la Lluvia. El centro de la meseta de San Lorenzo es ocupada por una "piramide" y un sitio rectangular de cimas extendidas en dirección norte-sur. Las cimas exhiben una anomalía magnética similar a la topografía, sugiriendo que el suelo está compuesto de un material magnético uniforme.

Después de la inspección magnética en San Lorenzo, el magnetómetro fue llevado a una piramide similar en el sitio Olmeca de la Venta, por Morrison, de la Universidad de California.

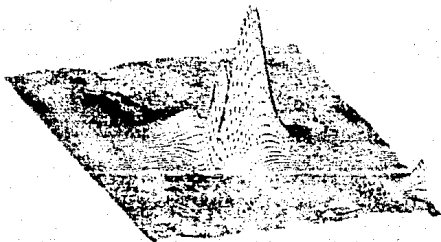
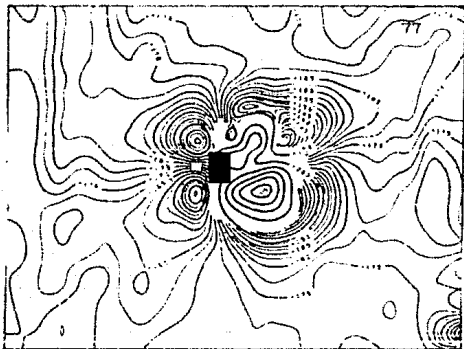


Fig. IV.4.- Arriba: Mapa de Intensidad Magnética Total. Centro: Una perspectiva de los datos del mapa, dentro de un altar Olmeca enterrado (monumento 51), el altar causó la anomalía prominente en el centro, el mapa presenta aproximadamente 50 mts. de lado.

Abajo: Después de la excavación, en el sitio de la anomalía.



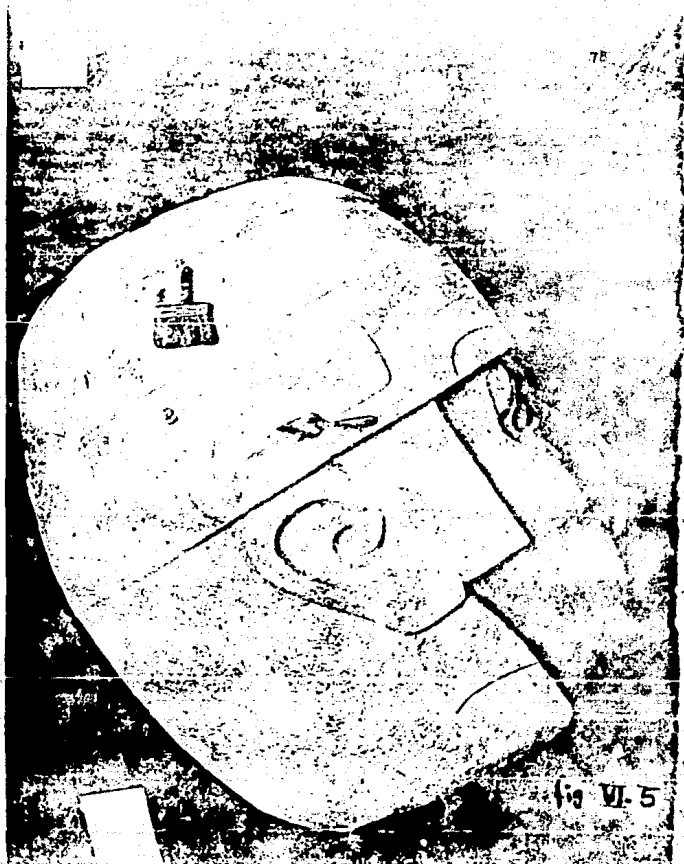


fig VI. 5

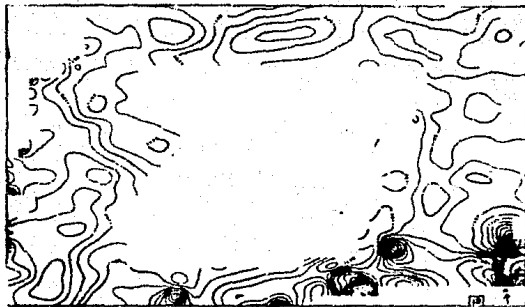


Fig. VI.6: Mapa de Intensidad Magnética en el monumento 61 (mostrado en la fig. (VI.5). la cabeza se localizó en la anomalía en la esquina derecha inferior del mapa. La parte central del mapa fue cubierta con puntos artificiales, donde no se hicieron mediciones.

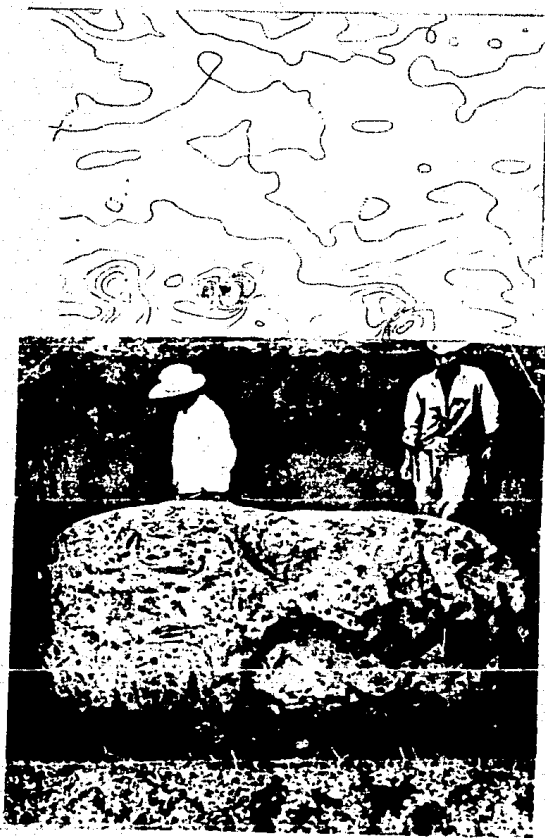


Fig. VI.7. Mapa de Intensidad Magnética total en una rejilla conteniendo la colossal Cabeza Olmeca (monumento 53). Y Anomalia Magnética.

Abajo: Causa de la Anomalia Magnética.

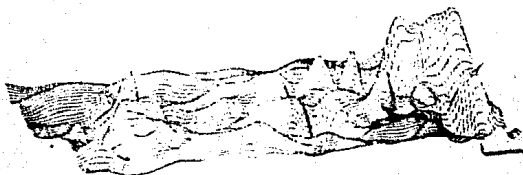
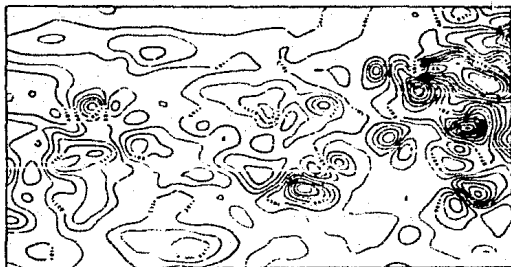


Fig. VI.8. Arriba: Mapa de Intensidad Magnética Total.

Abajo: una perspectiva del mapa dentro del área descrita como "workshop" (Taller), llamado así por los numerosos fragmentos pequeños de rocas, posiblemente derivados de los monumentos.

B) EXPLORACION MAGNETICA DE LA PIRAMIDE DE LA VENTA, DE LA CIVILIZACION OLMECA.

Proyecto La Venta, Tabasco: La pirámide de la Venta, es una de las mayores estructuras del centro ceremonial Olmeca, en Tabasco. Las primeras investigaciones hechas por Mathew Stirling (1943) y Phillip Drucker (1952), se concentraron en el estilo artístico y estratigráfico. En 1967, Ducker y Heizer, emprendieron las exploraciones a gran escala y levantaron un plano de toda el área que comprende a la pirámide y sus alrededores. En 1968, Heizer volvió a la Venta con una expedición de la Universidad de California y, entre otras cosas, levantó un detallado mapa topográfico de la pirámide.

Esta información además de suministrar nuevas perspectivas de la Historia de la Cultura Olmeca, despertó un cierto interés en la propia estructura, el cual giró alrededor de la colina y de las posibilidades de que pudiese contener estructuras más pequeñas.

Con la esperanza de poder dar alguna respuesta a éstos problemas, se hizo la exploración magnetométrica en la Venta, en 1969.

Se sabía que la mayor parte de las tallas Olmecas, así como las columnas usadas en el recinto y tumba, fueron hechas en basalto altamente magnético traído de los montes Tuxtla, a unos 70 km. al oeste del sitio, se probaron en el laboratorio muestras de arcilla del lugar que mostraron ser efectivamente no magnéticas. Por lo tanto se concluyó que en el caso de que los Olmecas hubiesen enterrado algún monumento o construido algunas estructuras dentro de la pirámide, podría detectarse su presencia por medio de un magnetómetro de alta sensibilidad.

Esta suposición se reafirmó en vista del éxito obtenido por el profesor Michael Coe, en San Lorenzo.

Levantamiento Magnetométrico: El equipo usado en la exploración de la Venta, se muestra en la foto 14. Fue necesario usar dos

sensores, uno fijo y un móvil. Durante la inspección, el sensor fijo se colocó lejos del área de lectura, y ambos sensores se conectaron por medio de cables coaxiales a una unidad de lectura.

Se trazaron las alineaciones para la exploración usando cordón - marcado cada tres metros, en los cuales se tomaron las lecturas, así hasta completar 2500 estaciones, en forma de rejilla. Periódicamente se tomaron lecturas de azimut y se anotaron características topográficas, de modo que los datos pudiesen ser dibujados sobre el mapa con la precisión requerida.

Los datos obtenidos se pasaron al mapa con intervalos entre líneas de 5.00 gammas. El mapa Magnético, se redujo a la misma escala que el topográfico. La fig. VI.9, muestra el mapa final.

Resultados de la inspección: El aspecto general es de una distribución radial de anomalías magnéticas en la parte sur de la pirámide, de forma aproximadamente circular en el lado norte cerca de la cima, y en el sur hay una anomalía muy notable que muestra un valor positivo grande, que pasa bruscamente al negativo con la forma de un arco unido al lóbulo positivo.

El área de la cima de la pirámide no se exploró debido a la presencia de algunos bloques de cemento conteniendo tornillos y pernos de hierro. Algunas lecturas tomadas a unos 6 metros del centro, mostraron fuertes gradientes con anomalías tan grandes como 100 gammas. No es verosímil, sin embargo, que éstos pernos de hierro sean responsables de esos valores extremos de la anomalía negativa encontrada a unos 6 metros al sur del centro, y es evidente que el acentuamiento de la anomalía negativa en ese punto es debido a materiales magnéticos cercanos a la superficie, posiblemente a tubos de hierro enterrados.

La anomalía negativa al NW es causada por el tejado de hierro de una casa cercana. El aspecto radial de las anomalías está causada por la topografía de la pirámide, con crestas y valles radiales. El aspecto general descrito se ajusta tan bien a la reali-

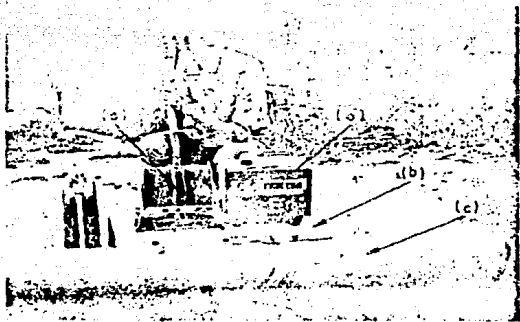


Foto 14.—Equipo para la explosión, empaquetado. a) Generador portátil, 350 watts, (40 lbs); b) caja conteniendo contador, acopladores, sensor fijo, unidad de alimentación y cable (50 lbs); c) sensor móvil, y d) carrete del cable coaxial para conectar los sensores a la unidad de alimentación y contador (24 lbs).

dad y es tan claro en el mapa magnético, que poco se duda de que los efectos se deben a la topografía.

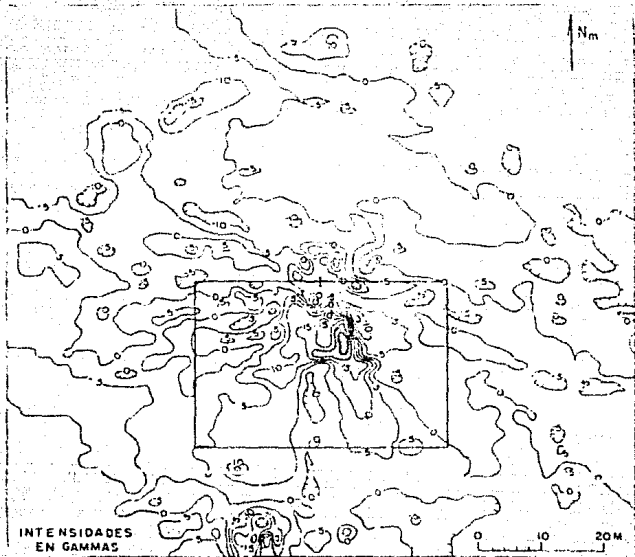
Los valores negativos que se observan casi sobre el meridiano magnético del centro y al extremo sur del mapa coinciden con una excavación hecha con bulldozer y posiblemente están causados por remoción de parte de la capa superficial magnética. La anomalía magnética en el centro y en el sur ha sido reeplanteada con mayor detalle en el mapa de la fig. VI.10. El aspecto de ésta anomalía es complejo, parece sugerir un cuerpo grande y profundo. Los abruptos que se observan a lo largo de los margenes Norte y Este, sugieren un origen cerca de la superficie.

Con el fin de efectuar una interpretación cuantitativa de la anomalía mayor, se hizo un programa para calcular la anomalía debida a un bloque paralelepípedo de dimensiones arbitrarias tal como se observaría sobre una superficie cónica, aproximadamente equivalente a la de la pirámide. El método de cálculo es el indicado por Bhattacharyya (1964). La interpretación que resulta de éstos modelos se resume como sigue:

- a) La zona general de altos valores dentro del contorno de 16 gammas en la fig. VI.10, puede explicarse por medio de una subestructura contenida en la pirámide. El centro de masa de este cuerpo está desplazado al sur del centro de la pirámide aproximadamente 30 metros. Un cuerpo en forma de lámina, posiblemente paralelo a la superficie de la pirámide podría ser una explicación para ésta característica.
- b) La anomalía cerca de la cima puede representarse por medio de una plataforma horizontal con paredes en los bordes Norte y Este.

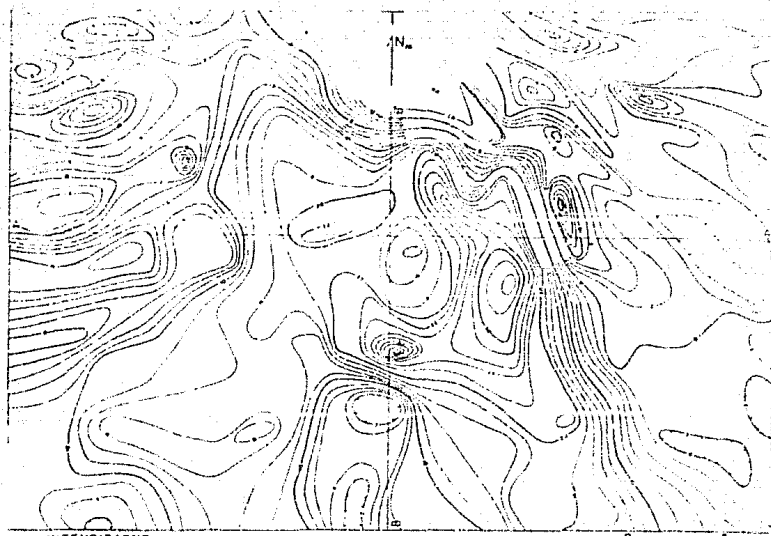
Estas paredes pueden muy bien ser filas de columnas y la plataforma un pavimento de pequeños bloques basálticos.

La localización precisa de la estructura enterrada se podría hacer



--Exploración magnetométrica de la Venus

Fig. 71.5



INTENSIDADES
EN GAMMAS

0 5
METROS

—Exploracion magnetometrica de La Venta. Detalle.

Fig. VI.10

con una perforación con costo moderado por un taladro movido por gasolina para extraer muestras del subsuelo. Estos sondeos deberán hacerse en la vecindad de las zonas altas de las anomalías. Para excavar la pirámide, la mejor técnica será probablemente cavar una zanja norte-sur yendo desde un punto cuatro metros al este y 5 metros al sur del centro, hasta 4 metros al este y 13 metros al sur. Desde el extremo sur de la zanja se deberá excavar otra hacia el este, penetrando en el valle de unos 6 mtu. de largo. Estas zanjas deberán tener al menos 3 metros de profundidad.

ESTUDIO GEOFISICO DE LAS CUEVAS Y TUNELES DE TEOTIHUACAN.

Los objetivos generales del presente trabajo están enmarcados dentro de la localización y definición de túneles y cuevas naturales que tengan interés arqueológico por el uso ritual y habitacional al que fueron destinados. A su vez se pretende demostrar la factibilidad de los métodos geofísicos en esta clase de estudios. El objetivo particular es, entonces, detectar y elaborar un mapa del sistema de túneles relacionados con la Pirámide de la Luna, y eventualmente excavar una porción de éstos.

Este estudio está encaminado al análisis de hoquedades en dos sectores de la antigua ciudad de Teotihuacán: el Oztoyohualco (zona 1), y en las inmediaciones de la Pirámide. A pesar de que algunos accesos a las hoquedades son visibles en ciertos puntos de la antigua ciudad, en general se supone que pasan por debajo de las construcciones del Horizonte Clásico, en el sector norte del valle en el que el sustrato es una lengua de material piroclástico que baja entre el Cerro Gordo y el Cerro Malinalco (Monser 1968).

Levantamiento Geofísico.

- i) Magnetometría. Las mediciones del Campo magnético total fueron realizadas con un magnetómetro de protones Geometrics G-819. El sensor estuvo montado en una barra de dos metros de altura con el fin de reducir las distorsiones del campo magnético causadas por estructuras superficiales.

El reconocimiento magnético incluyó un total de 600 lecturas, de las cuales 162 se llevaron a cabo en la zona de Oztoyohualco y 438 en la parte oriental de la Pirámide de la Luna. Estuvieron distribuidos en 9 perfiles magnéticos de aproximadamente 120 metros de largo, de los cuales dos se localizaron en Oztoyohualco y el resto en las cercanías de la Pirámide de la Luna. La orientación de los perfiles se determinó con base en el posible acceso a una posible cueva debajo de la pirámide.

- ii) Gravimetría. Las 125 estaciones de gravimetría, separadas 4 metros una

de otra, forman los 5 perfiles gravimétricos realizados. Una línea se ubicó en Oztoyohualco y el resto en la vecindad de la Pirámide de la Luna. La localización de los perfiles gravimétricos coincidió con algunos de los perfiles magnéticos. Paralelamente se realizaron perfiles topográficos.

- iii) Perfiles Eléctricos. Para confirmar los resultados magnéticos y precisar la localización de los túneles, se realizaron 5 perfiles eléctricos sobre las líneas trazadas por los perfiles magnéticos.

Se utilizó el arreglo Wenner con una distancia entre electrodos de 5 metros, realizando lecturas cada 7.5 metros y orientando el arreglo en forma paralela a la línea del perfil. Uno de los perfiles se hizo en Oztoyohualco, en donde se llevó a cabo un refinamiento densificando el número de estaciones para obtener mayor detalle del tipo de anomalía producida por una cavidad.

Resultado de los Estudios en Oztoyohualco.

Dado que la presencia de los túneles en esta área es evidente y se pueden tomar medidas de las dimensiones físicas de ellos, los estudios en esta zona se realizaron con el objeto de calibrar las técnicas geofísicas empleadas y facilitar la interpretación. En total se hicieron dos perfiles magnéticos, uno gravimétrico y uno eléctrico.

La localización de los perfiles se muestra en la Figura VIII. En ella se muestran las anomalías observadas, así como el relieve topográfico y la localización exacta de las entradas a los túneles. Se observa que el perfil magnético No. 1 fue graficado junto con los perfiles gravimétrico y de resistividad, éste último usando una separación $AB/3 = 3 \text{ m.}$ Los perfiles eléctrico y gravimétrico sólo cubren parcialmente la zona explorada con magnetometría; sin embargo, el interés principal está precisamente en el lado sur del perfil en donde los túneles están expuestos.

Con el objeto de determinar un valor representativo para el contraste de la -

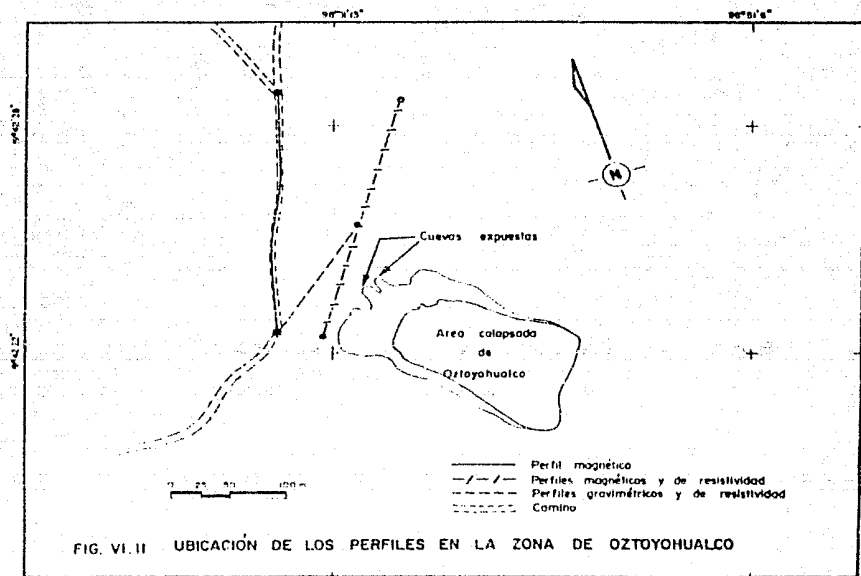


FIG. VI.12 CÁLCULOS INVERSOS DE LAS CUEVAS OBSERVADAS, BASADOS EN EL CONTRASTE DE SUSCEPTIBILIDAD.

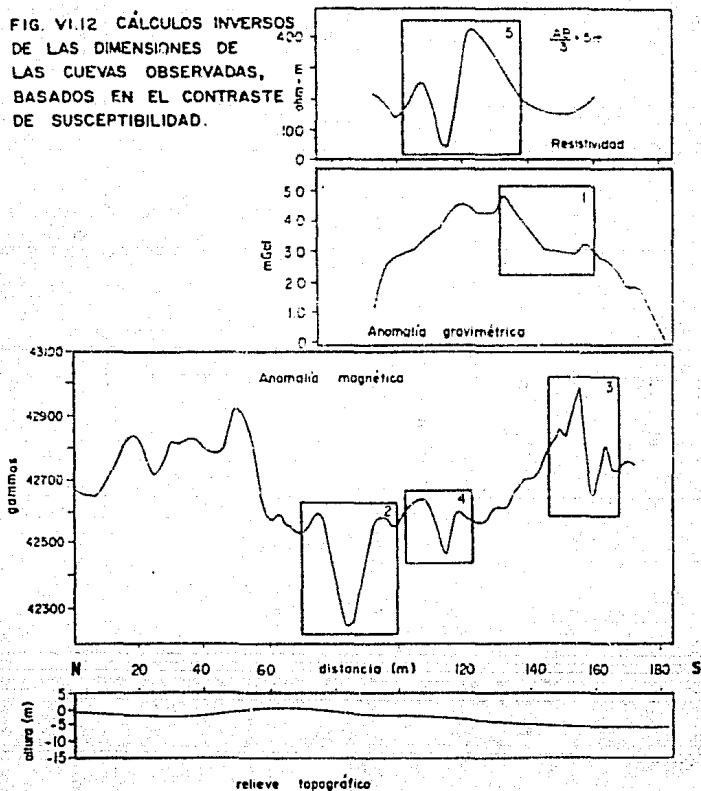


FIG. VI.13. CALCULOS INVERTIDOS DE LAS DIMENSIONES DE LAS CUEVAS OBSERVADAS EN OZTOYOHUALCO POR CONTRASTES DE SUSCEPTIBILIDAD

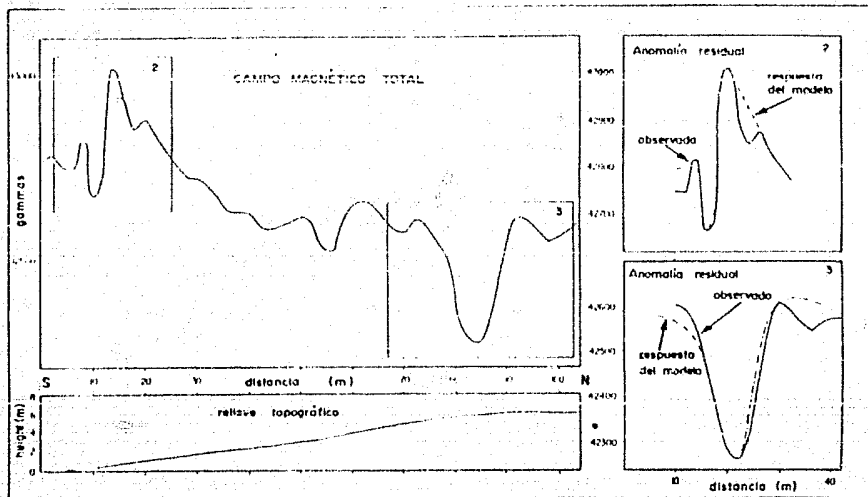


FIG. VI.14 INVERSIÓN DE LA ÚNICA ANOMALÍA GRAVIMÉTRICA EN OZTOYOHUALCO

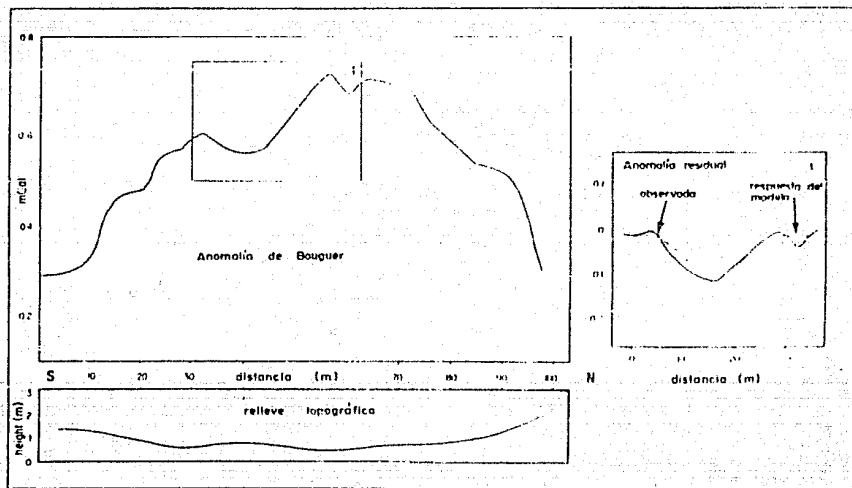
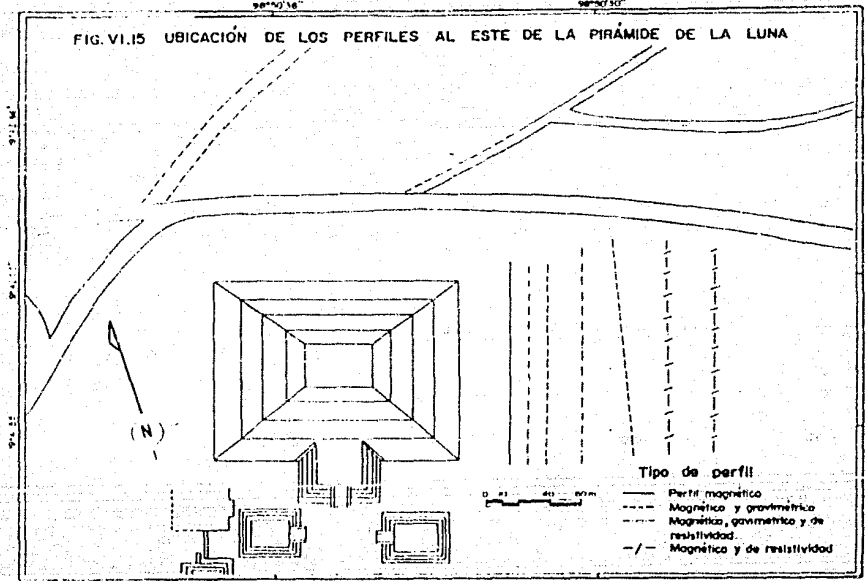


FIG. VI.15 UBICACIÓN DE LOS PERFILES AL ESTE DE LA PIRÁMIDE DE LA LUNA



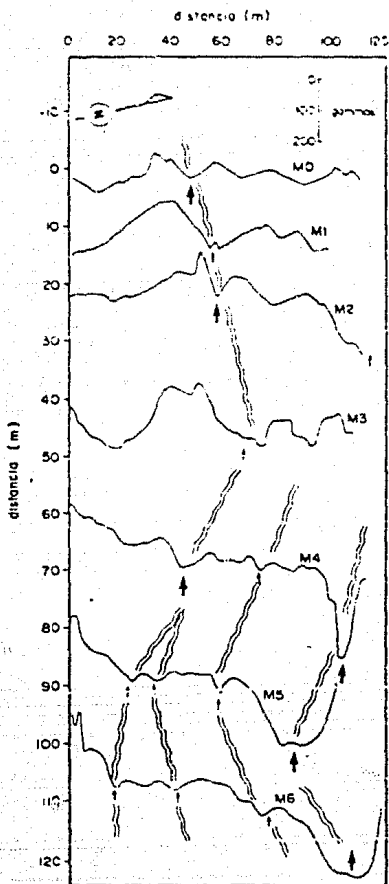
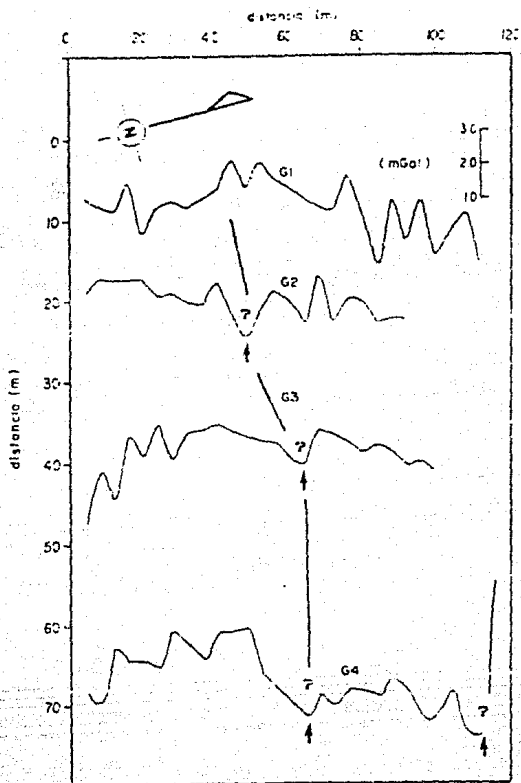


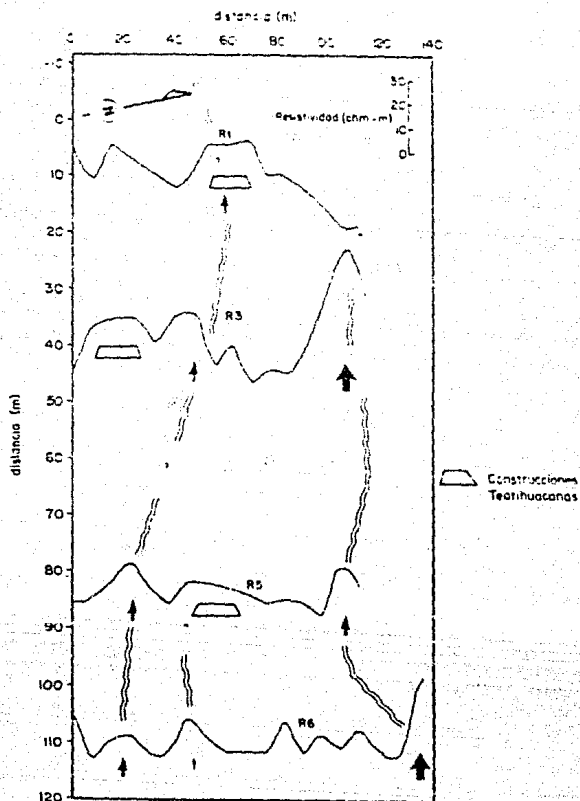
FIG. VI.16 MAPA DE PERFILES
MAGNETICOS MOSTRANDO LA
CORRELACION DE BAJOS
VALORES MAGNETICOS
SE SUGIEREN DOS TUNELES
PRINCIPALES

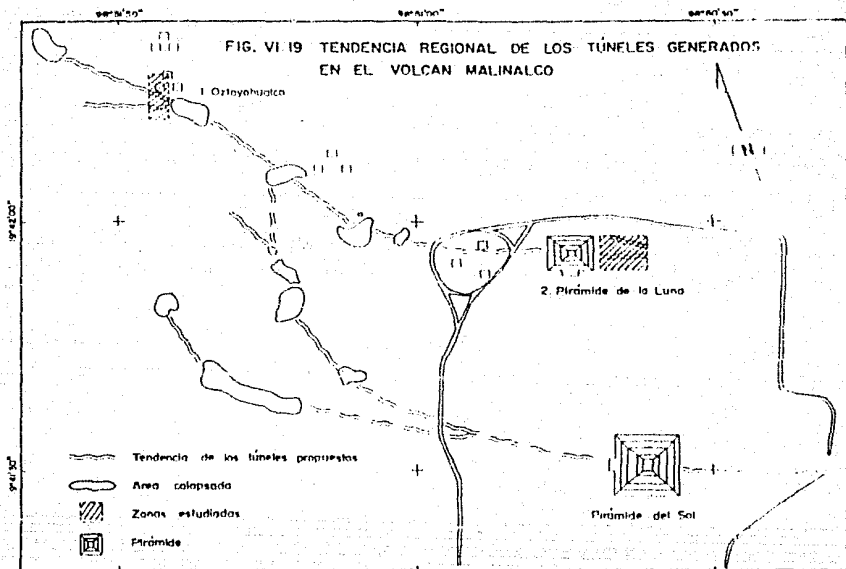
FIG. VI.17 CORRELACIÓN DE ANOMALÍAS GRAVIMÉTRICAS



Sólo se consideraron mínimos gravimétricos definidos por más de un punto

FIG. VI.18 MAPA DE PERFILES DE RESISTIVIDAD MOSTRANDO LA CORRELACION DE ALTOS VALORES





susceptibilidad magnética entre los piroclastos y las hoquedades, se midieron las dimensiones reales de las cuevas a la altura a que fueron cortadas por lo perfiles geofísicos (véase figura VI.13 y VI.14). Con el diámetro y la profundidad conocidos y dejando variar libremente la susceptibilidad, fue calculada la anomalía que reproduce de manera más fiel la curva de campo (anomalía marcada con el número 3 en la figura VI.13). El mejor ajuste fue obtenido para un valor de $\mu = -6 \times 10^{-3}$ esu.

Usando el valor encontrado para la susceptibilidad en el área de estudio, fue calculado el diámetro y la profundidad de un túnel que es responsable de una anomalía de 300 gammas en el centro del perfil magnético (marcada con el número 2 en la figura VI.13) y cuyo acceso no fue localizado. La profundidad al centro del túnel y el diámetro calculados fueron: $Z = 7.7$ m. y $D = 9$ m. respectivamente.

El perfil gravimétrico graficado en la figura VI.14 sugiere de manera menos evidente la presencia de los túneles observados con magnetometría. Una de las probables razones por las cuales los mínimos magnéticos no coinciden exactamente con los mínimos gravimétricos es que, como se puede observar en la figura VI.14, el perfil gravimétrico corta el túnel en una posición diferente. Lo que es claro son los valores mínimos que se tienen al inicio y al final de este perfil que coinciden, según la misma figura, con la posición de los túneles más importantes de este lugar.

Aunque las correcciones hechas a los datos redujeron la amplitud de la anomalía alrededor de solamente 1 mGal, se realizó un cálculo de las dimensiones de la cueva medida con anterioridad usando procedimientos de inversión. A la altura que el perfil gravimétrico corta el túnel se estimó una profundidad a su centro de $Z = 5.9$ m. y un diámetro de aproximadamente $D = 3$ m. En la figura VI.14 se muestra el ajuste de la anomalía gravimétrica marcada con el número 1 y que aparentemente corresponde a la anomalía magnética que lleva el No. 3 en la figura VI.13.

El perfil eléctrico realizado en Oztoyohualco sigue la misma dirección que el perfil magnético. Tanto su localización como la curva de campo obtenida

se pueden observar en las figuras 1 y 3 respectivamente.

A diferencia de la magnetometría y la gravimetría, la interpretación de las anomalías eléctricas es puramente cualitativa por no existir referencias en la literatura del efecto producido por un cilindro horizontal; sin embargo, los autores realizan actualmente esfuerzos para el desarrollo de los elementos que lo permitan hacer.

La respuesta eléctrica de los túneles es clara y correlacionable con magnetometría. El perfil eléctrico, sin embargo, detecta la presencia de un muro cubierto en el límite de la plaza de un complejo de tres templos (véase VI.11). Es muy probable que no haya sido detectado claramente con magnetometría por ser una construcción que no presenta un importante contraste en la magnetización, por lo que es de suponerse que está construida con el mismo material que el medio que le circunda. La amplitud de las anomalías eléctricas no es, en general, una medida del tamaño de las cuevas puesto que, además de que la resistencia de contacto puede limitar el flujo de corriente en el terreno, la técnica de perfilaje sólo permite conocer, en teoría, la resistividad del suelo a la misma profundidad. Por esta razón, un túnel de dimensiones mayores que otro pero que se encuentra más profundo, puede generar una anomalía eléctrica de menor amplitud que otra de dimensiones más reducidas a menor profundidad. Esta es la explicación para el fenómeno que se observa en el perfil eléctrico de Oztoyohualco; según la interpretación magnética, el túnel detectado en la plaza es de dimensiones mucho mayores que el inmediatamente contiguo hacia el sur del perfil.

Resultado de los Estudios en la Pirámide de la Luna.

La mayor parte de los estudios geofísicos se realizaron en la parte oriental de la Pirámide de la Luna; fueron siete perfiles magnéticos de aproximadamente 120 metros de largo, orientados norte-sur y separados entre sí un promedio de 20 metros. También se incluyen en los trabajos realizados en esta zona cuatro perfiles eléctricos y cuatro gravimétricos, los que fueron determinados en parte por los datos magnéticos. En la figura VI.15 se ilustra la posición de las líneas mencionadas.

- a) **Magnetometría.** Los resultados magnéticos se corrigieron por variación diurna y se graficaron en la misma escala, siguiendo las trayectorias trazadas en el trabajo de campo. De acuerdo con la curva teórica de la anomalía magnética sobre las cuevas observadas en Otoyohualco, mínimos magnéticos muestran la posición del túnel en esta área (véase figura VI.16). La amplitud de los mínimos varía de 50 a más de 200 gammas y los cambios en la forma de las anomalías se atribuyen a túneles no cilíndricos o compuestos. Las variaciones en forma pueden estar relacionadas a cambios en la profundidad y diámetro.

En la figura VI.16 se muestran dos túneles principales: el primero en la parte central del área estudiada, y el otro hacia el noreste. Su tendencia general parece una continuación de la trayectoria propuesta a partir de las áreas colapsadas, produciéndose una desviación hacia el oriente (véase figura VI.19). Su ancho fue inferido de la longitud de onda de cada anomalía y no se hizo intento alguno para estimar su profundidad a lo largo de la trayectoria.

- b) **Gravimetría.** Un mapa similar fué construido para los perfiles de gravedad en este sector. Se esperaba que los bajos niveles gravimétricos fueran correlacionables de un perfil a otro. Sin embargo, el exceso de ruido producido por las estructuras arqueológicas circundantes en los perfiles de campo no permitió una manifestación clara de las anomalías deseadas. Los datos obtenidos muestran dispersión y un gran número de anomalías generadas con una sola lectura gravimétrica. Considerando sólo los mínimos gravimétricos definidos por más de un punto, se intentó hacer una correlación para definir la trayectoria del túnel principal en el área estudiada. La figura VI.17 muestra el resultado de dicha interpretación. La ubicación de la boquedad inferida coincide aproximadamente con aquella ubicada por magnetometría.

- c) **Resistividad.** Se construyó un mapa de perfiles de resistividad a semejanza de los que se hicieron para los datos magnéticos y gravimétricos, con el fin de correlacionar valores máximos que deberían ser producidos por cavidades vacías, como serían los túneles, rodeados por un medio homogéneo. El perfil de resistividad de Otoyohualco, aunque fué hecho con -

una separación menor entre electrodos, sugiere un valor alto de resistividad (de más de 300 ohm-m.), asociado con la presencia de una cueva a una profundidad de aproximadamente 3 metros de su centro geométrico. Si milares amplitudes se esperaron para condiciones equivalentes. Al igual que con el mapa de perfiles magnéticos, se intirieron las trayectorias a través de la correlación de los máximos resistivos. Su ubicación es aproximadamente la misma que en los casos anteriores (véase figura VI.18).

Las anomalías al noreste observadas en tres de los perfiles (números 4, 5 y 6) indican que el supuesto túnel es más ancho o más somero que el interpretado para el sector central del área, que va de acuerdo con la interpretación magnética. Se puede observar en la figura VI.18 que se detectaron varias anomalías casi rectangulares. Estas están probablemente relacionadas a estructuras constructivas sepultadas las cuales abundan en esta área.

Conclusiones:

La presencia de una importante anomalía magnética en la zona de Oztoyohualco bajo la plaza del complejo de tres templos apoya la hipótesis de que la localización de este tipo de edificación obedece a la posición de un túnel. Se proporcionan sus dimensiones y profundidad más probables.

Específicamente en el área comprendida entre Oztoyohualco y la Antigua Ciudad de Teotihuacan, se forma una lengua de flujo y curiosamente se puede apreciar que la mayor parte de las depresiones se alinean en el borde sur de ella. Esta lengua está fuertemente modificada por el asentamiento, pues se pueden apreciar grandes terrazas, rectas y paralelas que ocupan una parte de la superficie de la lengua.

Si tomamos en consideración que las depresiones que se encuentran en el área son porciones de cavernas colapsadas, seguramente porque las dimensiones de ellas en esos puntos excedieron la resistencia mecánica del techo de la caverna, entonces podemos trazar el curso aproximado de la caverna aprovechando esta evidencia y combinándolo con los datos geofísicos obtenidos en las cercanías de la Pirámide de la Luna y en Oztoyohualco. En ambos sitios, los datos

geofísicos conforman la presencia de huecos subterráneos. Los valores magnéticos, máximos eléctricos y mínimos gravimétricos en las áreas en donde la trayectoria de las áreas colapsadas sugieren la presencia de túneles y cavernas. El curso propuesto es de NW a SE desde la zona de Oztotychualco hasta la Pirámide de la Luna, recorriendo el borde sur de la lengua de flujo piroclástico (figura 9).

La correlación de los mínimos magnéticos y gravimétricos, así como los máximos de resistividad, procedentes de los perfiles geofísicos del este de la Pirámide de la Luna sugiere la presencia de por lo menos dos túneles principales y proporcionan su trayectoria más probable (véase figura VI.19).

Directamente asociadas a esta trayectoria, existen una serie de plazas con tres templos, que, según Milton (1970), corresponden a las primeras etapas del asentamiento y no aparecen en otras partes de la Ciudad de Teotihuacán. Se cuentan en este alineamiento 5 plazas sobre la trayectoria propuesta para las cavernas. El culto a las cuevas pudo haber sido muy importante en esas primeras fases de desarrollo de la cultura teotihuacana. Queda por establecer si el acceso a ellas se hacía desde la plaza de cada complejo de tres templos, y qué ceremonias pudieron haber estado relacionadas con ellas. Como se dijo en la introducción, hay también la posibilidad de que algunas de ellas sirvieran como observatorios astronómicos.

Sabiendo que en Oztotychualco los estudios geofísicos indicaron que uno de los túneles pasaba justo debajo de la plaza, se propone que existe una íntima relación entre la presencia de los túneles y cavernas, su trayectoria y la ubicación de las plazas con tres estructuras. De confirmarse lo anterior, existen grandes posibilidades de que uno de los principales factores que determinaron la fundación de la antigua ciudad de Teotihuacán en la porción norte del valle (y no en las inmediaciones de Puxtla, donde se encuentran los manantiales), fuesen las cuevas y túneles, en parte como aprovisionamiento de agua, pero además, cumpliendo con una función religiosa innegable. El hecho de que la trayectoria propuesta pase por debajo de la Pirámide de la Luna también podría implicar que la ubicación de la pirámide estuvo, al menos en parte, determinada por la presencia de la cueva, y si además, existe una conexión entre Oztotychualco y la Pirámide por medio de las cuevas y las plazas

de tres estructuras, se abre un campo muy prometedor de investigación.

La trayectoria recta del sistema septentrional de cuevas y túneles y la posibilidad de que hubieran servido para el aprovisionamiento de agua a la comunidad que fundó la antigua ciudad de Teotihuacan, soporta la hipótesis de que el origen de las cavernas fue consecuencia del efecto calor del flujo piroclástico sobre corrientes y depósitos de agua, que al evaporarse formaron el espacio dentro del flujo y que más tarde formarían las cavernas; sin embargo falta información para confirmarla plenamente.

Como ya se mencionó, existe otro sistema de cuevas que pasan por debajo de la Pirámide del Sol. Cabe también la posibilidad de una comunicación entre estos dos sistemas de cuevas a juzgar por una depresión entre los dos sectores. Si esto se confirma, entonces se estaría hablando de sistemas de túneles y cavernas que corren aproximadamente paralelos, que pasan debajo de las dos pirámides principales de Teotihuacan y que pudieran comunicarse entre sí por medio de túneles perpendiculares. Esto explicaría lo que a primera vista parecía exagerado por parte de nuestro informante que en 1936, ocasión en la que penetró en una hoquedad en las proximidades de la Pirámide de la Luna, se perdió en el interior y caminó durante ocho horas para encontrar la salida. Esto sólo sería posible en un sistema de cuevas interconectadas.

Etapas Futuras del Proyecto.

Las etapas por cubrir en el futuro próximo son:

1. Verificar la presencia de los túneles y cavernas a lo largo de la trayectoria propuesta.
2. Estudiar con detalle las plazas para encontrar los posibles accesos a las cavernas.
3. Estudiar el sistema de cavernas al oeste de la Pirámide del Sol.
4. Verificar la posible comunicación entre los sistemas de cavernas detectados.

5. Practicar perforaciones en los sitios propuestos por los estudios geofísicos.
6. Estudiar y tomar fotografías del interior de los túneles y cavernas por medio de sistemas ópticos tales como periscopios y cámaras pequeñas.

VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Una observación importante antes de hacer las conclusiones, es en lo que se refiere a los criterios usados para reportar los trabajos de inspección geofísica con fines arqueológicos. Los diferentes autores que estuvieron a cargo de la realización de las campañas de campo, generalmente fueron arqueólogos con escasos conocimientos de los fundamentos físicos y matemáticos de los métodos y técnicas empleadas, y aunque esto no es muy importante en lo que concierne al modo de operar determinado método de inspección geofísica en un sitio arqueológico, sí lo es en el procesamiento e interpretación de los datos de campo, para que éstos sean lo más correlacionable posible con la excavación posterior. Es por ello, que en algunos trabajos que se mencionan, surgen dudas en cuanto a la interpretación de mapas o perfiles geofísicos.

Las conclusiones más importantes del presente trabajo son las siguientes:

- 1) Los Métodos Geofísicos son una herramienta de gran utilidad - para localizar objetos arqueológicos, además de que cuentan - con la gran ventaja de ser Métodos no destructivos, lo que no son los métodos tradicionales usados en arqueología.
- 11) Los Métodos Geofísicos de mayor aplicación en sitios arqueológicos, debido al fácil manejo de operación de campo, son el Método Magnetométrico y el Método Eléctrico, como se demostró en la gran cantidad de literatura en la que se aplican ambos métodos.
- 111) Los Métodos Gravimétricos y Sísmicos solo se han aplicado en trabajos experimentales, debido a la complejidad de operación de campo y las restricciones que guardan en lo que se refiere a las propiedades físicas que miden.

- iv) A pesar de que en nuestro país no es muy conocida la aplicación de tales Métodos a sitios arqueológicos, se cuenta con algunos trabajos realizados por algunas instituciones donde se realizan investigaciones o trabajos arqueológicos, obteniendo resultados favorables, como lo ejemplifica el capítulo VI. Sin embargo lo ideal es inspeccionar con los Métodos Geofísicos en los sitios arqueológicos de que se tenga conocimiento.

Se recomienda antes de hacer una excavación, en donde no se conoce con certeza la profundidad y extensión del objeto, realizar una inspección geofísica utilizando dos métodos con el fin de - comparar ambas interpretaciones.

México es un país potencialmente rico en establecimientos arqueológicos, debido a las grandes civilizaciones prehispánicas que - florecieron antes de la conquista, por lo que sería benéfico impulsar esta área científica a una área humanística como lo es la Arqueología, ya que se protegerían intereses históricos y culturales de la nación.

BIBLIOGRAFIA

- Aitken, M. J.
1958 "Magnetic Prospecting, ARCHAEOOMETRY, 1, 24 - 29
- Aitken, M. J.
1961 "Physics and Archaeology", LONDON INTERSCIENCE, 181 pp.
- Aitken, M. J.
1961 "Magnetic Location in Britain". ARCHAEOOMETRY, 4,
83 - 84.
- Aitken, M. J.
1960 "Proton Magnetometer surveying on some British Hill
- Forts", ARCHAEOOMETRY, 3, 123 - 125.
- Brainer, S. y Koe, M. D.
1972 "Magnetic Exploration of the Olmec Civilization", -
AMERICAN SCIENTIST, 60, 5. 566 - 575.
- Brüggemann, J. y Harris M.
1966 "Aplicación del magnetómetro en San Lorenzo Tenochti
tlan", BOLETIN DEL INAH, MEXICO. 39, 26 - 29.
- Carson, H
1969 "A seismic survey at Harpers Ferry". ARCHAEOOMETRY,
3, 119 - 122.

- Chávez, R., Arzate, J., Flores, L., Manzanilla, L. y Barba, L.
1988 "Estudio geofísico de las cuevas y túneles de Teotihuacan", COMUNICACIONES TECNICAS DEL INSTITUTO DE GEOFISICA, U.N.A.M., Serie investigaciones, 78.
- Clark, A. J.
1986 "Archaeological geophysics in Britain", GEOPHYSICS, 51, 7, 1494 - 1413.
- Grant, F. J. and West, G. F.
1965 "Interpretation theory in applied geophysics".
Mc. Graw - Hill.
- Castillo, G. L.
1971 "Levantamientos geofísicos con fines arqueológicos",
REVISTA DE INGENIERIA, U.N.A.M., 41, 1 - 4.
- Hesse, A.
1960 "Geophysical prospecting for Archaeology in France",
ARCHAEOOMETRY, 3, 123 - 125.
- Hesse, A., Jolivet, A. and Tabbagh, A.
1986 "New prospects in shallow depth electrical surveying
for archaeological and pedological applications", -
GEOPHYSICS, 51, 3, 565 - 594.
- Johnston, R. B.
1961 "Archaeological application of the proton magnetometer

in Indiana (U.S.A.)", ARCHAEOOMETRY, 4, 71 - 72.

Lerice, C. M.

1961

"Archaeological survey with the proton magnetometer in Italy", ARCHAEOOMETRY, 4, 76 - 82.

Lerici, C. M.

1970

"Nuove applicazioni della scienza e della tecnica alla ricerca Archeologica", NOUVELLES ET DOCUMENTS, 1 - 2, 97 - 116.

Linington, R. E.

1963

"The application of geophysics to Archaeology" AMERICAN SCIENTIST, 51, 1, 48 - 70

Linington, R. E.

1966

"Test use of a gravimeter on etruscan chamber tombs - at Cerveteri", PROSPEZIONI ARCHEOLOGICHE, 1, 37 - 43.

Linington, R. E.

1967

"A short geophysical campaign carried out at Bolivia, Cádiz", PROSPEZIONI ARCHEOLOGICHE, 2, 49 - 71.

Morrison, F.

1969

"Exploración magnetométrica de la Pirámide de la Venta", BOLETIN DEL INAH, MEXICO 38,

- Nagata, T.
1982 "El campo magnético terrestre y sus variaciones", EL REDESCUBRIMIENTO DE LA TIERRA, CONACYT, 149 - 162.
- Pattantyus, A. M.
1986 "Geophysical results in archaeology in Hungary", - GEOPHYSICS, 51, 3, 561 - 567.
- Stright, M. J.
1986 "Evaluation of archaeological site potential on the Gulf of México Continental shelf using high - resolution seismic data", GEOPHYSICS, 51, 3, 605 - 622.
- Scollar, I.
1966 "Recent developments in magnetic prospecting in the Rhineland", PROSPEZIONI ARCHEOLOGICHE, 1, 43 - 50.
- Tarling, D. H., Hammo, N. B. and Downey, W. S.
1986 "The scatter of magnetic directions in archaeomagnetic studies", GEOPHYSICS 51, 3, 624 - 639.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E. and Keys, D. A.
1976 "Applied Geophysics", Cambridge University Press,
- Tite, M. S.
1966 "Magnetic prospecting near to the Geomagnetic Equator", ARCHAEOOMETRY, 9, 24 - 31.

Wangness, R. K.

1987

"Campos Electromagnéticos", Limusa, 681 pp.

Weymouth, J. W.

1986

"Archaeological site surveying program at the University of Nebraska". GEOPHYSICS, 51, 3, 536 - 552.

Wynn, C. J.

1986

"Archaeological prospection: An introduction to the Special Issue". GEOPHYSICS, 51, 3, 533 - 537.

Young, C. T. and Droege, D. R.

1986

"Archaeological applications of resistivity and magnetic methods at Fort Wilkins State Park, Michigan", -
GEOPHYSICS, 51, 3, 568 - 575.