

03060

3



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO
INSTITUTO DE GEOFÍSICA
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA DE SITIOS ARQUEOLÓGICOS:
MEDIO RURAL Y URBANO

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS
(EXPLORACIÓN)
PRESENTADA POR
DENISSE LORENIA ARGOTE ESPINO

DIRECTOR DE TESIS: DR. RENÉ E. CHÁVEZ SEGURA

Ciudad Universitaria, México D.F.

Octubre 2002

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

*Dedicada a mi esposo.
Gracias por darme, de principio a fin, todo el apoyo,
el esfuerzo, amor y la motivación que necesitaba
para conseguir este grado.*

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente al Dr. René Chávez, maestro y amigo, que tuvo la paciencia y dedicación de dirigir a una arqueóloga en el campo de la geofísica. Sus enseñanzas son y seguirán siendo muy valiosas para mí.

Al Dr. Luis Barba y la Dra. Leticia Flores, cuya experiencia y asesoría han sido invaluable para mi desarrollo académico y trabajo de tesis. A los Dres. Ma. Encarnación Cámara y Jaime Urrutia, por sus comentarios y tiempo dedicado en la revisión de este trabajo.

Un agradecimiento muy especial al Dr. Jorge Lira, por haber compartido desinteresadamente conmigo sus conocimientos y experiencia profesional; su asesoría fue esencial en el procesamiento digital de imágenes.

A la Dra. Yoko Sugiura y la Arqlga. Rocío Ponce, por brindarnos su apoyo y facilitarnos el trabajo en las zonas arqueológicas de Santa Cruz y Patzcuaro, respectivamente. Al Ing. Oscar Díaz por su apoyo en el aspecto técnico del uso de los instrumentos y software. A Jorge Blancas por su gran disposición para colaborar conmigo con conocimientos y software.

Al Departamento de Exploración y Geomagnetismo del Instituto de Geofísica, así como al Departamento de Geofísica de la Facultad de Ingeniería por asistirme con el uso de los equipos de prospección geofísica. A los geólogos Gustavo Tolson, José L. Sánchez y García Palomo, por su continua disposición a orientarme y proporcionarme información concerniente a su especialidad.

Agradezco el apoyo económico del CONACYT con no. de registro 159775, y a la beca parcial de la DGEP (of. DGEP/SAP/PBN/2291/2000) y la DGAPA (proyecto IN107400).

A mis compañeros y maestros del Posgrado, por brindarme su amistad y dirección. A mis padres, por estar pendientes de mí en todo momento. Finalmente pero no al último, a mi Chuckwallo, al cual adoro de todo corazón y que me apoyó en todo momento para que obtuviera este grado.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

RESUMEN

A través de distintas técnicas geofísicas, como los sensores remotos, la magnetometría, el radar de penetración terrestre y la tomografía eléctrica, se caracterizaron a macro y micro escala sitios de interés arqueológico ubicados en diferentes contextos geográficos. Se estudió el área de Santa Cruz Atizapan (La Campana-Tepozoco), estado de México, la cual se encuentra en un medio rural relativamente alejado de ruido ambiental. Este sitio está ubicado en los márgenes NE de la ciénega de Chiconahuapan, dentro de la Cuenca del Alto Lerma. Primeramente, se caracterizó geográficamente la región por medio del análisis de una imagen multiespectral Landsat 7 (octubre 2000) que abarca la Cuenca del Alto Lerma. Para ello, se obtuvo una composición RGB de las tres primeras componentes principales comparada con un mapa geológico de las mismas coordenadas; además, se construyó un modelo de texturas y uno de vegetación. A partir de estos modelos, se pudo inferir las zonas más adecuadas para el asentamiento humano en épocas prehispánicas, incluyendo las porciones más cercanas a los lagos. Se realizaron observaciones de gradiente vertical magnético de alta resolución, de radar de penetración terrestre y algunos perfiles de tomografía eléctrica. A partir de estos resultados, se caracterizó el sitio específico. Se detectaron varias estructuras arqueológicas conformando probables unidades habitacionales de configuración similar a la de los grupos agrícolas precolombinos.

Se investigó también un área dentro del casco urbano de la ciudad de Pátzcuaro, Michoacán. El sitio de interés se localiza a un costado de la basílica de Nuestra Señora de la Salud. El objetivo era comprobar la presencia de un antiguo cimiento del diseño original de Vasco de Quiroga para la primera catedral de Michoacán en el siglo XVI. Se procesó una imagen multiespectral Aster (noviembre 2001) de la Cuenca de Pátzcuaro, obteniendo los modelos de componentes principales, texturas y vegetación. De esta manera, se logró una vista sinóptica de la región con el fin de ubicar a la ciudad de Pátzcuaro dentro de su contexto natural, el cual influyó en la posición de los asentamientos antiguos. Por medio de observaciones realizadas en forma de perfiles de GPR y magnetometría, se logró obtener evidencia de la existencia de dicho cimiento a una profundidad menor a los 2 m.

ÍNDICE

Agradecimientos	3
Resumen	4
Indice	5
Introducción	6
I.- Los métodos geofísicos en la arqueología	9
II.- Medio rural: Santa Cruz Atizapan, Edo. de México	29
Descripción geológica de la región	
Arqueología e historia del sitio	
Procesamiento de la imagen de satélite multiespectral de la Cuenca del Alto Lerma, Valle de Toluca	
Estudio geofísico	
III.- Medio urbano: Pátzcuaro, Michoacán	72
Descripción geográfica de la región	
Arqueología e historia de Pátzcuaro	
Procesamiento de la imagen multiespectral de satélite de la Cuenca de Pátzcuaro, Michoacán	
Estudio geofísico en la Basílica de Ntra. Sra. de la Salud en la ciudad de Pátzcuaro, Michoacán	
Conclusiones	99
Bibliografía	104

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente, cuando un arqueólogo sospechaba que algún hallazgo importante podría encontrarse bajo la superficie, de alguna manera definía el lugar donde comenzaría a excavar guiado por la esperanza un posible gran descubrimiento. Con el tiempo y el avance tecnológico, han aparecido técnicas indirectas que permiten al especialista definir con anticipación sus áreas de excavación.

Prospección Arqueológica es el término que se le ha dado en Europa al uso de métodos físicos y geofísicos en la arqueología. El trabajo en el campo de la geofísica aplicada a la arqueología empezó en los años 40 en el Viejo Continente con la ayuda de los avances tecnológicos que el período de post-guerra trajo consigo, aunque la fotografía aérea de sitios arqueológicos ha sido utilizada desde hace ocho décadas. Posteriormente, se aplicaron métodos geofísicos para estudiar y evaluar estructuras antiguas enterradas. La mayor parte de las investigaciones geofísicas en arqueología se han concentrado principalmente en Europa y el Medio Oriente (Campbell, et al, 1992 y 1993; Scollar, et al, 1990; Wynn, 1986), aunque recientemente en Estados Unidos y Canadá se han promovido mucho (Bevan, 1991; Vaughan, 1986; Weymouth, 1986; entre otros).

A diferencia de las Ciencias de la Tierra, el rango de interés de la Arqueología se encuentra desde unos cuantos centímetros hasta algunas pocas decenas de metros bajo la superficie del terreno. Históricamente se han destinado grandes capitales hacia la exploración de los recursos naturales, en particular el petróleo y los minerales, debido al impacto económico en la sociedad. Desafortunadamente, el financiamiento para estudios de menor impacto económico, pero no menos importantes como el medio ambiente y los estudios arqueológicos, ha sido muy pequeño. Generalmente, la mayor parte del trabajo depende de estudiantes voluntarios y asistentes. Algún financiamiento puede obtenerse en ocasiones de los museos o de grandes instituciones como la National Geographic Society,

el Instituto Smithsonian en Estados Unidos, y el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) en México. Los estudios geofísicos aplicados a la arqueología mexicana son escasos. Se cuenta con un caso importante de su aplicación en Teotihuacan (Barba et al, 1990; Chávez et al, 1990; Chávez et al, 1994; Manzanilla et al, 1994; entre otros), aunque también se pueden mencionar otros casos como los de Cuicuilco (Linares et al, 1992), La Venta (Barba, 1988) y el Templo Mayor de Tenochtitlan (Barba et al, 1997; Barba et al, 1998).

El objetivo del proceso de excavación en la arqueología tradicional siempre ha sido la adquisición de material cultural y biológico para subsecuentes análisis estadísticos y de laboratorio. Además de poder documentar las relaciones entre los artefactos por medio un preciso procedimiento de registro de los avances del trabajo arqueológico en el sitio. Pero la excavación destruye irreversiblemente al sitio y sus interrelaciones espaciales; por otro lado, el tiempo requerido para excavar sitios completos en general es insuficiente, en muchos casos debido a la presión de liberar el terreno para el desarrollo urbano, por lo que los arqueólogos comúnmente se ven forzados a limitar la evaluación de los sitios por medio de la examinación de artefactos encontrados en superficie (*recorrido de superficie*) y/o por algunos pocos pozos de sondeo ubicados por procesos estadísticos. Por esto los arqueólogos necesitan de métodos de reconocimiento que ayuden a evaluar rápida y efectivamente las dimensiones ocultas del sitio sin destruirlas.

El término *Arqueología no destructiva* se refiere al uso de los métodos geofísicos para proveer información acerca del potencial arqueológico de los objetivos sin tener que modificarlos o destruirlos. Las ventajas que tienen los métodos geofísicos en su aplicación hacia arqueología sobre el uso de las técnicas clásicas son las siguientes:

1. La Arqueología es destructiva. Al ser el sitio excavado es sistemáticamente destruido, aunque cada paso de la excavación sea lento y cuidadosamente documentado en cada nivel. Por otro lado, el sondeo geofísico es rápido, no destructivo y no altera el sitio.

2. No todos los sitios pueden ser excavados. Por ejemplo, los edificios históricos, iglesias y edificios religiosos, pirámides, parques y áreas subyacentes al desarrollo urbano. Otra vez, los métodos geofísicos no son destructivos y son rápidamente empleados, aunque su aplicación sea rentable sólo a largo plazo. En ciertos sitios estos métodos pueden ser lo único que al arqueólogo se le permita usar.
3. Las investigaciones geofísicas pueden revelar, en múltiples casos, depósitos de materiales o terrenos estériles (ausencia de materiales arqueológicos), o exponer rasgos subterráneos como muros enterrados, huecos o túneles, antiguos caminos, entierros humanos, etc.
4. El trabajo de investigación geofísica en ciertos sitios puede tomar algunos días o semanas de esfuerzo, dando resultados que de otra manera tomaría años de subsecuentes excavaciones.

El objetivo de esta investigación es demostrar la viabilidad y el gran potencial que tiene la prospección geofísica para la caracterización de sitios arqueológicos. Se presenta el estudio de dos sitios, uno en un medio rural y el otro en un medio urbano. Estos ejemplos pretenden dar una visión de los problemas que podemos enfrentar en cada uno de estos ambientes diferentes y sus alternativas de estudio. El caso de Santa Cruz Atizapan es el de un sitio arqueológico ubicado en los márgenes nororientales del lago de Chignahuapan dentro de la Cuenca del Alto Lerma, Estado de México. Este sitio se encuentra relativamente alejado del ruido ambiental, por lo que se pueden aplicar casi todas las técnicas geofísicas con relativa facilidad ya que no tiene grandes obstáculos como construcciones o edificios o instalaciones eléctricas cercanas. El estudio realizado en la ciudad de Patzcuaro, Michoacán, fue el caso de estructuras de origen colonial temprano y posiblemente prehispánicas que se encontraban debajo de áreas de gran importancia histórica y religiosa. En este lugar, se estudió la parte sur del atrio de la Basílica de Nuestra Señora de la Salud, en el centro de la ciudad, abarcando un área de 15x20m. El objetivo principal de esta investigación fue localizar los posibles restos de los cimientos de una de las cinco naves que originalmente se diseñaron para la catedral primigenia por Don Vasco de Quiroga en el siglo XVI (Chanfón, 1994; Ramírez, 1986).

CAPITULO I:

LOS MÉTODOS GEOFÍSICOS EN LA ARQUEOLOGÍA

Los métodos geofísicos, como anteriormente se mencionó, pueden ayudarnos desde localizar objetos hasta delimitar y conocer la distribución de las estructuras en el subsuelo; esto nos puede servir, entre otras cosas, para salvar lugares que pudieran ser destruidos con las técnicas tradicionales de excavación. Es importante, para evitar confusiones, que los términos que se van a utilizar sean definidos primero, de manera que no sean interpretados erróneamente y su uso sea el mismo que le dan en otros países. Para eso se utilizarán las definiciones dadas por Wynn (1986). *Arqueogeofísica* es el término que él propone como apropiado para describir el uso de métodos geofísicos terrestres de alta resolución para medir muchas propiedades físicas útiles en aplicaciones del mapeo arqueológico. El término *arqueofísica* también es utilizado aunque incluye también el uso de métodos isotópicos y *arqueomagnetismo* para datar o sugerir la proveniencia (fuente) de los artefactos. Aunque el término *Prospección Arqueológica* es comúnmente usado en Europa para definir el uso de métodos geofísicos en la arqueología, el término empleado mayormente entre los arqueólogos de Norte América es el de *Sensores Remotos*; el problema con este último término es que, para los geofísicos, los sensores remotos conllevan la idea del uso de aeronaves o satélites para obtener imágenes de la superficie terrestre. Por lo tanto, el término aquí empleado será el de *prospección arqueológica*.

El *Salvamento* o *Rescate Arqueológico* (Martínez, 1988) son otros términos que deben ser definidos; los dos implican la investigación arqueológica de un área determinada antes de que esta sufra amplias modificaciones, y probablemente sea enterrada, por el desarrollo moderno. En el salvamento se puede disponer de cierto tiempo, aunque limitado,

para realizar las investigaciones antes de que la maquinaria de construcción empiece sus tareas; en cambio, el rescate arqueológico implica que los arqueólogos tengan que trabajar al mismo tiempo que las máquinas. Debido al corto periodo de tiempo permitido para estos trabajos arqueológicos, un proyecto grande no puede ser investigado efectivamente sin la asistencia de los métodos geofísicos.

A continuación se da un resumen de las técnicas geofísicas que han sido utilizadas en México y otros países como auxiliares en la investigación arqueológica, sus aplicaciones, resultados y limitaciones.

Fotografía aérea e imágenes de satélite

Los arqueólogos han utilizado la fotografía aérea (fig.1) desde principios de siglo y sigue siendo utilizada en la actualidad debido a que da una vista sinóptica del sitio (Binford, 1964). Esta técnica es útil para determinar diferencias en color de suelos, contenido de humedad, textura indicativa de estructuras enterradas como paredes, pirámides, actividad agrícola antigua, localización de áreas de asentamiento (antiguas o modernas), y otros rasgos. Estos sirven para ubicar a los arqueólogos en los lugares apropiados para iniciar una excavación. Un uso común de la fotografía aérea de un sitio, tomada desde un aeroplano o globo estático volando a baja altura, es construir mapas basados en contornos a pequeña escala que representen la topografía de la zona de interés y las estructuras presentes.

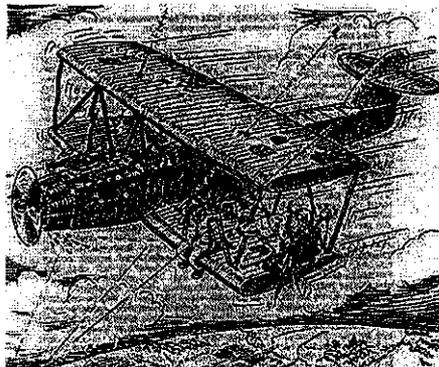


Fig. 1: Orígenes de la fotografía aérea

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Otros métodos de sensores remotos, incluyendo las imágenes de radar e infrarrojas entre otras, han sido desarrollados desde mediados de 1980, aunque han sido experimental-

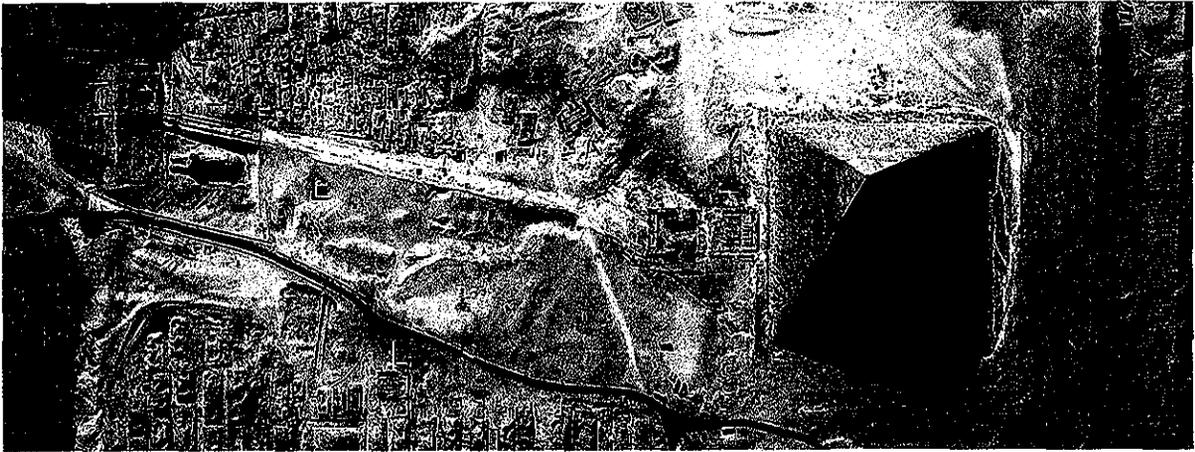


Fig. 2: Imagen de la Gran Pirámide y la Esfinge tomada por el satélite IKONOS con 1 m por píxel de resolución ([http://www. Spaceimage.com](http://www.Spaceimage.com))

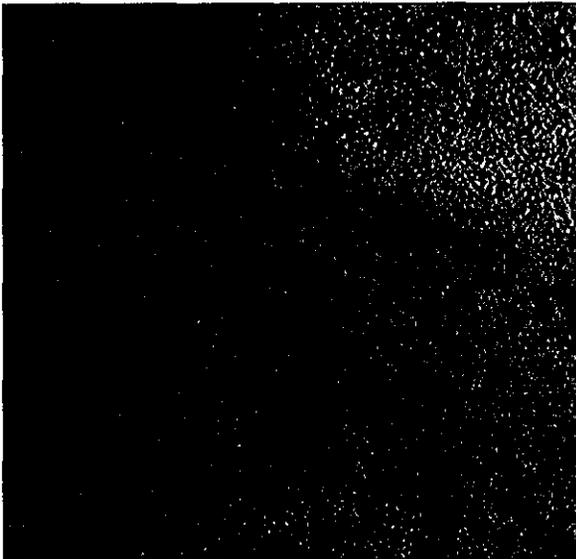


Fig. 3: Imagen CIR (en el infrarrojo cercano) que muestra una antiguo camino maya conocido como "sakbé", imagen cortesía de la NASA (southport.jpl.nasa.gov)

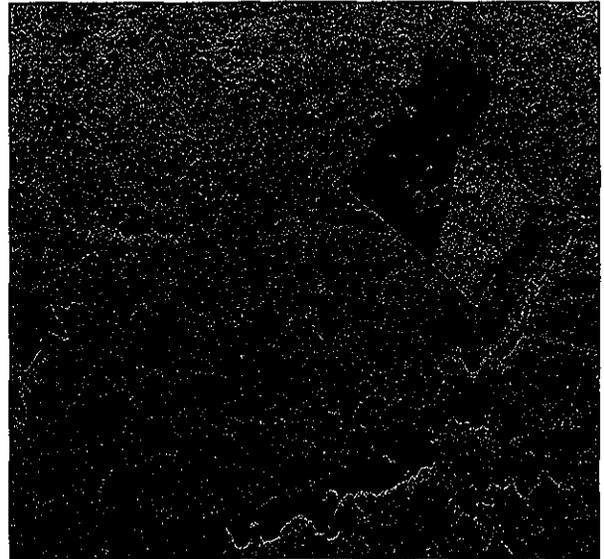


Fig. 4: Representación en falso color de las frecuencias altas, bajas y pasa-bandas en el dominio de las frecuencias de la imagen de un sitio arqueológico en Belice.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

mente usados desde 1960 (Lyons y Avery, 1977; Stringer y Cook, 1974); estos métodos no han sido universalmente aplicados, pero han proveído a los arqueólogos de información que no hubieran podido obtener de otra manera. Algunos arqueólogos se han resistido al cambio, insistiendo en que las imágenes tomadas desde el espacio no tienen la resolución espacial suficiente para los propósitos arqueológicos; pero esto ha cambiado con el tiempo gracias a las nuevas innovaciones y capacidades de los satélites y trasbordadores. Por ejemplo, los satélites estadounidenses Landsat 7 y ASTER tienen una resolución de 15m, mientras que el IKONOS (fig. 2) puede mostrar estructuras con dimensiones tan pequeñas como 1 m. Incluso, si esto no fuera suficiente para estudiar un sitio específico, las imágenes serían útiles para contextualizar un sitio, detectar y localizar elementos mayores como caminos o antiguos asentamientos (Sheets y Sever, 1988).

Las imágenes tomadas desde el aire o el espacio son atractivas desde el punto de vista de la rapidez con que recolectan grandes cantidades de información. Muchos satélites de imágenes multiespectrales han sido desarrollados recientemente y usados en la arqueología. Los escáners multiespectrales pueden aportar más información que la película fotográfica común. Los Sistemas de Información Geográfica (GIS) pueden proveernos de datos capaces de ser digitalizados, manipulados e integrados. Las imágenes sensadas en diferentes bandas espectrales y desplegadas en falso color pueden mostrar, por ejemplo, la ubicación de pantanos estacionalmente inundados en el norte de Guatemala (Sever, 1998). Desde el punto de vista arqueológico, ha sido debatido si estos pantanos fueron usados por los mayas para el cultivo. El escáner multiespectral de infrarrojo térmico (TIMS) mide la emisividad de los rasgos en la tierra, por lo que las imágenes diurnas o nocturnas muestran diferente información; aunque fue originalmente diseñado para la investigación geológica, también ha sido usado tanto para el estudio de suelos y la vegetación como para la arqueología.

El infrarrojo visible (IR) y las imágenes de microondas señalan caminos, canales, depósitos e incluso áreas con evidencia de habitación (Sever, *ibid*). El IR térmico puede detectar diferentes tipos de vegetación lo que podría indicar la presencia de suelos alterados debidos a muros enterrados, antiguos caminos u otros elementos arqueológicos, además de

que puede representar gráficamente las sutiles diferencias de temperatura en los suelos y superficies expuestas. Algunas aplicaciones de esta técnica podrían ser el mapeo de huecos y cimentaciones o estructuras, por ejemplo, en antiguas fortificaciones como las existentes en Perú, Egipto y Jerusalem. Perisset y Tabbagh (1981) han demostrado que las imágenes digitales en el infrarrojo pueden utilizarse en aplicaciones arqueológicas. Otro ejemplo del uso del IR fue el estudio de la radiación Infrarroja térmica reflejada de la tierra compactada de antiguos caminos en la húmeda Costa Rica como el mostrado en la figura 3 (Sheets y Sever, *ibid*). La accesibilidad de los diferentes escáners permiten a los investigadores examinar los sitios en las bandas espectrales más adecuadas para ellos.

El principal atractivo del radar es que minimiza los efectos causados por la atmósfera. Un ejemplo de la funcionalidad del radar espacial sobre otras plataformas que operan en el visible e infrarrojo cercano es la imagen de Seasat SAR de Belice (fig. 4), con una resolución de 25 metros (obtenido de la página del Jet Propulsion Laboratory o JPL de la NASA, <http://solar.rtd.utk.edu/~mwade/creft/seasat.htm>) que corresponde a una zona arqueológica de la cultura Maya de ese país.

Magnetometría

Los instrumentos de magnetometría se basan en las propiedades naturales fundamentales de la Tierra. Debido a su estructura, la Tierra se comporta como un dínamo; posee un núcleo metálico (una mezcla de hierro y níquel) que, en contacto con un manto interno viscoso en movimiento, genera un campo eléctrico que a su vez induce un campo magnético (Telford et al, 1990). De esta forma se comporta como un gran magneto con un polo norte y un polo sur y variando en intensidad de los polos al ecuador. Los suelos, estructuras y objetos varían en su capacidad de ser magnetizados, debido principalmente a la cantidad de elementos ferromagnéticos. El grado al cual un material es magnetizado por un campo magnético se le denomina *susceptibilidad magnética*; el *magnetismo remanente* es producto de la composición de un objeto y de su historia termal, deposicional y diagenética (Scollar et al, 1990).

Visto desde el punto de vista atómico, los electrones poseen momentos magnéticos producidos por su movimiento orbital, de manera que su desplazamiento produce una configuración dipolar neta en el átomo muy parecida a la de un imán (con un arreglo norte-sur), el cual es más grande en los materiales ferromagnéticos. En ausencia de un campo magnético intenso, el momento magnético neto tiene esencialmente una dirección aleatoria. Al presentarse un campo magnético, además del de la Tierra, se produce un alineamiento parcial de los electrones. Esta inducción magnética debida a la aplicación de un campo externo permite medir directamente la fuerza magnética con un magnetómetro (Telford et al, 1990). En las investigaciones arqueológicas, el magnetómetro mide la suma vectorial de los campos magnéticos local y terrestre, que está en función del contraste magnético entre un objeto y el contexto que lo encierra (Scollar et al, 1990). En suelos con alta susceptibilidad magnética, este contraste es bajo y la detección de rasgos arqueológicos es más difícil que en suelos donde una baja susceptibilidad realza el contraste entre los rasgos arqueológicos y el contexto de enterramiento.

A los valores magnéticos que divergen de los de la norma terrestre se les conoce como *anomalías* y son el fenómeno a observar con estos instrumentos (Telford et al, 1990). Las unidades de lectura están dadas en gamas (γ) o nanoteslas (nT). Una anomalía es producida por efecto de la combinación de diferentes factores físicos y geométricos, por lo que se debe tener un conocimiento previo del lugar de levantamiento para llegar a una solución correcta (Ángeles, 2001). Hay que tener muy presente que una interpretación directa sobre una sola lectura o un solo perfil no es evidencia de que un cuerpo anómalo este enterrado debajo del sensor o en una región aledaña. Esto debe deducirse a través del uso de modelos y algoritmos para la interpretación de datos magnéticos. Además, hay que tomar en cuenta el valor registrado es producto de múltiples factores físicos como la magnitud de campos locales y ambientales, la composición y forma de los rasgos, la profundidad a la que se encuentra y la naturaleza física del contexto de entierro entre otras variables. “Los problemas de convergencia y estabilidad de la solución del problema pueden disminuirse restringiendo la variación de algunos parámetros mediante el conocimiento a priori del terreno” (Ángeles, 2001).

El magnetómetro puede ser usado en modo diferencial, utilizando dos magnetómetros, o en modo gradiométrico, donde un solo instrumento toma medidas simultáneas usando dos sensores en una configuración vertical de manera que se mide el gradiente magnético entre los dos sensores. El objetivo de ambos modos es el de remover los efectos de fuertes gradientes locales y la variación diurna. El gradiente vertical ofrece una mejor manera de detectar fuentes magnéticas cercanas a la superficie a diferencia de las mediciones de campo total (Scollar et al, 1990). Esta metodología permite una rápida valoración inicial de grandes áreas y la identificación de zonas de potencial interés, para posteriormente ser investigadas con mayor detalle. Los resultados de la prospección pueden ser conocidos estando todavía en el campo con la ayuda de una computadora portátil. El gradiómetro puede utilizarse en cualquier área rural o semiurbana libre de excesivos materiales féreos superficiales.

Con el desarrollo del magnetómetro de protones portátil en la década de 1950 (Weymouth, 1986; Telford et al, 1990), los métodos magnéticos empezaron a ser usados en arqueología por un grupo de pioneros de la Universidad de Oxford liderados por Aitken. Dichos métodos se han convertido en la actualidad en un punto fundamental de la prospección arqueológica en muchas partes del mundo. Como se mencionó, el campo magnético terrestre es ligeramente perturbado por algunos tipos de anomalías relacionadas con la arqueología tales como la arcilla cocida o cerámica. Otro ejemplo son los suelos sobre los cuales ha habido hogares de campamentos humanos; éstos desarrollan un incremento en su susceptibilidad magnética resultado del ambiente de reducción. Este ambiente reductivo causa la formación de magnetita si es el caso de que cantidades de hierro se encuentren presentes.

La mayoría de los cuerpos sometidos al fuego (ladrillos, cerámica, hornos, etc.) producen fuertes anomalías como resultado de la conversión de los óxidos de hierro en un estado más magnético y del magnetismo termo-remanente (Weymouth, 1986). Los suelos compactados por la ocupación humana o alterados por algún enterramiento funerario también muestran cierta variación en los valores de fondo de la susceptibilidad magnética. Los entierros usualmente causan una oxidación local creando un vacío en el contenido de

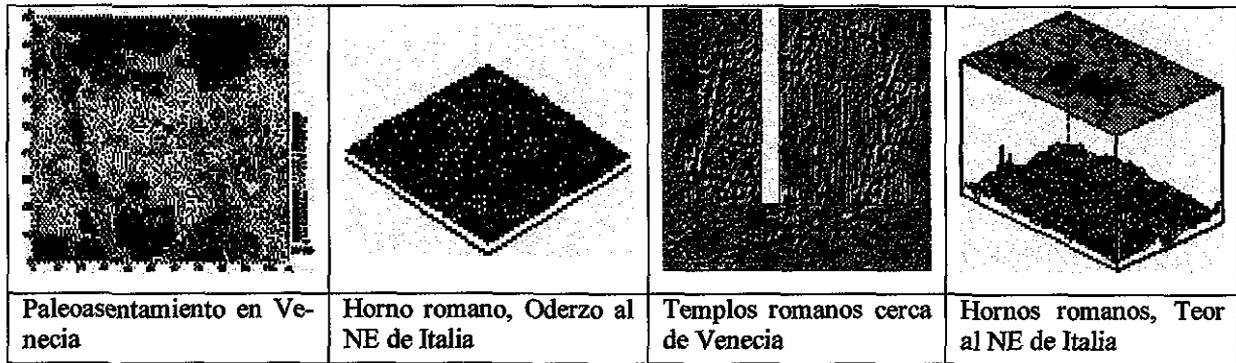


Fig. 6: Ejemplos de datos magnéticos procedentes de sitios arqueológicos representados como imágenes de computadora, encontrados en la página de internet <http://www.planetinternet.it/archaeosurvey>.

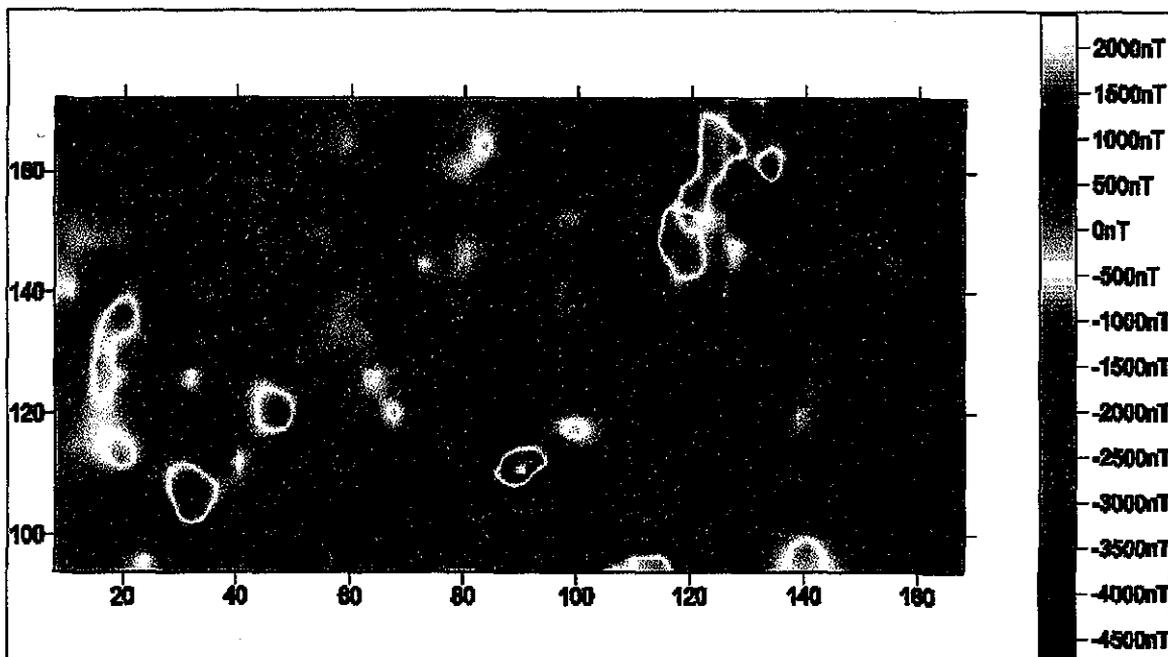


Fig. 7: Imagen obtenida a partir de datos magnéticos interpolados procedentes de la prospección magnética realizada al Este de la Pirámide del Sol en Teotihuacan (Arzate et al, 1990; Chávez et al, 1994).

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

magnetita. La respuesta de los cimientos y los pisos dependen del contraste magnético de los materiales de construcción con respecto al suelo que los rodea. Estos fenómenos han sido utilizados por los geofísicos y arqueólogos para producir mapas a escala regional de sitios de ocupación romana en Europa (Scollar et al, 1986).

Los magnetómetros pueden detectar fácilmente variaciones menores al 0.1 % de contenido de magnetita en el suelo; pero, debido a que las señales magnéticas asociadas a rasgos arqueológicos son muy pequeñas, fácilmente pueden ser enmascaradas por basura metálica, cables de corriente, líneas de alta tensión, automóviles cercanos, entre otras cosas similares. Por esto los magnetómetros son más adecuados para utilizarse en sitios aislados de construcciones y basura modernas. Los procedimientos de campo para la prospección magnética han sido refinados considerablemente en las últimas décadas.

Actualmente, los arqueólogos utilizan mayormente la técnica de gradiente magnético con la ayuda de los gradiómetros y microcomputadoras con sistemas de recolección de datos automatizados, con el fin de evitar los efectos temporales en el campo magnético (Clark, 1986; Scollar et al, 1986). Una de las principales ventajas que proporciona la magnetometría en general es su rapidez; una brigada de campo puede recoger datos en un área aproximada de 3500 m en un día (en modo continuo) con un espaciamiento entre cada estación de hasta 1 m. Algunos experimentos se han llevado a cabo para modelar físicamente los efectos de fogatas y ocupaciones humanas, lo que da como resultado una mejor interpretación de los datos adquiridos en campo (Weymouth, 1986; Gibson, 1986).

Anteriormente, la presentación de los datos magnéticos era en mapas de densidad variable, densidad de puntos (fig. 5) y contornos de líneas; actualmente ya se han mejorado estas técnicas interpolando los datos en forma de imágenes (fig. 6) a las cuáles se les puede aplicar diferentes filtros o realces que exalten los rasgos de nuestro interés. Weymouth (op cit) presenta diferentes casos de investigaciones realizadas en Dakota del Norte, Oklahoma, Colorado y Nebraska, en sitios principalmente de interés histórico. En internet también

podemos encontrar muchos ejemplos de proyectos arqueológicos donde se han aplicado métodos de prospección magnetométrica.

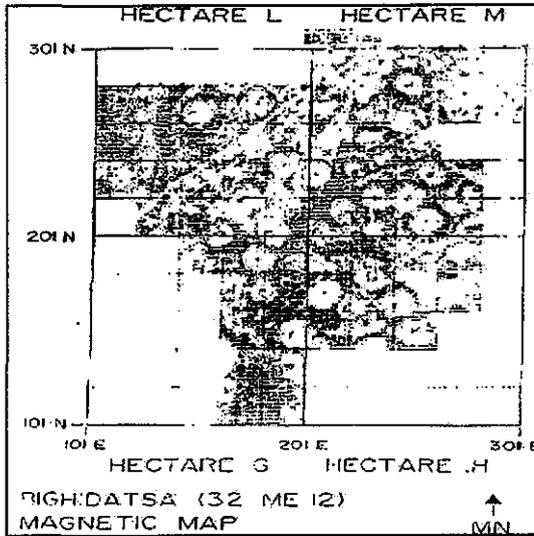


Fig. 5: Mapa magnético de los puntos de la retícula en partes de las cuatro hectáreas del sitio de Big Hidasa, Villas Indias del sitio histórico del Río Knife, cerca de Bismarck, Dakota del Norte.

Cada carácter impreso está en un punto de la retícula, y cada incremento en la densidad del carácter representa un incremento de 2 nT en el campo total (Weymouth, 1986).

Un ejemplo claro de la aplicación del método magnético en la localización de cuevas, túneles y abrigos rocosos ligados a la ideología prehispánica en el México antiguo son las investigaciones desarrolladas en Teotihuacan cerca de las pirámides del Sol y de la Luna y en la zona de Oztoyohualco (Barba et al, 1990). La orientación de los perfiles fue determinada por las posibles ubicaciones de las cuevas con base en sus accesos (Arzate et al, 1990; Barba et al, 1990;Chávez et al, 1988; Chávez et al, 1994). El resultado se puede observar en la figura 7, donde se muestran las anomalías de campo total corregido. El patrón de anomalía está asociado a la trayectoria del túnel; es decir, los bajos magnéticos revelan la presencia de estas cavidades u oquedades, y los altos a los pilares de basalto. Es importante hacer notar que por la forma de las anomalías la magnetización de la estructura es de signo negativo; sin embargo, al suponerse el túnel vacío o parcialmente relleno de material poco magnético, es de esperarse que el efecto proviene realmente de la roca encajonante, es decir, de los flujos de basalto.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Radar de Penetración Terrestre (GPR)

Uno de los métodos más recientes aplicados en la arqueología (utilizada por primera vez en los Estados Unidos a principios de la década de 1970) es el Radar de Penetración Terrestre, comúnmente denominado GPR por sus siglas en inglés (*Ground Penetrating Radar*) y fue desarrollado originalmente para un rápido reconocimiento de los sitios de construcción así como para propósitos militares en la búsqueda de minas y de túneles subterráneos (Wynn, 1986). Este método utiliza transmisiones de ondas electromagnéticas continuas o discretas desde una o dos antenas que son remolcadas de manera estable y continua a lo largo de una línea. Los pulsos de energía electromagnética se envían hacia el interior de la tierra desde el transmisor, y sus reflexiones son obtenidas de las interfaces entre los estratos y objetos de propiedades eléctricas y magnéticas contrastantes, cuya profundidad puede ser estimada a partir del tiempo que tarda en llegar la onda reflejada (Clark, 1990). La velocidad de transmisión del pulso electromagnético desde la antena transmisora, en un medio homogéneo, es una función de la permitividad del medio (las velocidades se dan en nanosegundos, medida en *ns/m*) y es expresada coloquialmente como el *tiempo de viaje de ida y vuelta* de la señal.

La amplitud del pulso recibido es una función de su conductividad promedio; un pulso que pasa a través de un cuerpo intermedio conductivo será reducido en amplitud por la reflexión de la superficie del cuerpo y por la absorción dentro del cuerpo (Hallenburg, 1998). La conductividad y la frecuencia determinan la profundidad de penetración de la señal del radar. Las frecuencias típicamente empleadas están en el rango de los 100 a los 1000 MHz. Los rangos de frecuencia más comúnmente utilizados van de los 100 a los 500 MHz, dependiendo de la profundidad de estudio. Estas muestran reflexiones de los contrastes de conductividad causados por objetos metálicos u horizontes de suelo alterados, como entierros o estructuras hechas por el hombre. La imagen de salida del GPR es, en cierto sentido, un corte vertical del campo cercano a la onda por debajo de la antena. Es importante considerar la dispersión de la onda, lo cual está estrechamente ligado al contenido de humedad del medio (a mayor humedad, mayor dispersión de la onda).

Las principales limitaciones del método de radar de penetración son que normalmente no puede penetrar debajo de un horizonte de arcilla por la gran humedad que generalmente concentra, el equipo es caro y la interpretación de los datos puede ser compleja y difícil. El uso incorrecto de una antena puede significar que rasgos importantes se vean atenuados o se pierdan por completo. Algunos de los factores que pueden afectar el regreso de la señal del GPR desde algunos de los objetivos en el suelo son: 1) el área efectiva de la antena receptora, 2) la localización de los objetivos, 3) la atenuación de la señal (Goodman, 1994). El uso de una antena de baja frecuencia puede permitir mayor penetración pero la resolución de los rasgos es menor, en cambio, una antena de alta frecuencia permite una mayor resolución pero la profundidad es menor (penetrando solo 1 ó 1.5 m según las propiedades del medio). La señal se atenúa rápidamente en el terreno, pero refleja los materiales con diferentes propiedades eléctricas. Con este método se pueden encontrar muros enterrados, pisos de arcilla muy compactada e incluso diferentes tipos de suelo que son similares a la vista pero que pueden tener distintas respuestas eléctricas.

Una de las motivaciones más fuertes para utilizar los radargramas sintéticos creados por el GPR es que pueden ayudar a identificar rápidamente tipos de objetos arqueológicos, como clases de tumbas o estilos funerarios; un ejemplo son los estudios de varios cementerios en Estados Unidos (Beavan, 1991). En arqueología urbana (realizada dentro de una ciudad), el GPR puede detectar huecos por debajo del concreto o asfalto, por debajo de los pisos de iglesias o caminos. En estos casos existe mucho ruido de fondo o no se pueden cavar hoyos, por lo tanto los métodos de resistencia eléctrica o magnetometría no son útiles, lo cual hace al radar mucho más útil y efectivo en la prospección arqueológica de zonas urbanas (Campbell et al, 1993).

Otro acercamiento de importantes implicaciones en la interpretación arqueológica de las imágenes de radar es el uso de las *rebanadas de tiempo* (*time slices*). Una rebanada de tiempo representa un corte a través de un conjunto tridimensional *xyz*, donde *z* representa el valor del tiempo (Conyers y Goodman, 1997). Las secciones cubiertas por el radar pueden ser interpoladas para crear mapas que muestren la distribución de las estructuras subyacentes de forma tridimensional; de esta manera se pueden crear cortes

horizontales de los datos de reflexión del radar a cierta profundidad. Cortes repetidos a diferentes profundidades de un sitio arqueológico pueden mostrar la variación de los elementos y revelar algunas de sus características (forma, tamaño, ubicación y profundidad de los objetos enterrados), como una función del tiempo del viaje de la onda del radar (fig. 8). En resumen, algunas de las aplicaciones específicas del radar en la arqueología son: 1) localizar estructuras bajo tierra, 2) construir mapas de los elementos enterrados, y 3) identificar las zonas de interés rápidamente, reduciendo la cantidad de excavación requerida (Vaughan, 1986).

Construir mapas de estos sitios usando los métodos tradicionales de excavación toma mucho tiempo y dinero. El uso del radar de penetración combinado con el software adecuado de graficación e interpretación reduce considerablemente los costos respecto de la técnica tradicional. Existen muchos casos en el mundo en donde se ha aplicado la técnica del radar para el auxilio de la arqueología. Más de 7800 m de datos digitales de radar fueron levantados en un sitio arqueológico maya del siglo sexto en Ceren, El Salvador (Conyers, 1997; www.du.edu/anthro). Los datos fueron usados para explorar las estructuras enterradas y mapear la paleotopografía a través de más de 5 m de desecho volcánico. El sitio arqueológico consistía en una villa agrícola que fue rápidamente cubierta por despojos piroclásticos producidos por un evento eruptivo cercano, preservando estructuras, plantas, campos de cultivo y parte del paisaje que lo rodeaba. Los perfiles del radar fueron entonces postprocesados en una computadora para remover el ruido y corregir la relación tiempo-profundidad para poder identificar la reflexión que representará a la antigua superficie. Esta superficie y las estructuras construidas sobre ella fueron modeladas en 2D por computadora para ayudar en la identificación e interpretación de las anomalías. Veintiséis estructuras fueron identificadas en los perfiles del GPR, obteniendo además una buena reconstrucción del paisaje y ambiente que existían antes de la erupción.

Desmond et al (1993; 1997) llevaron a cabo investigaciones de GPR en Chichen Itzá, Yucatán. El objetivo principal fue proveer nueva información acerca de cavernas y rasgos culturales enterrados en la Península de Yucatán, en los sitios de Chichén Itzá, Balankanché, Izamal y Dzibilchaltún. Se recogieron datos en transectos de varias

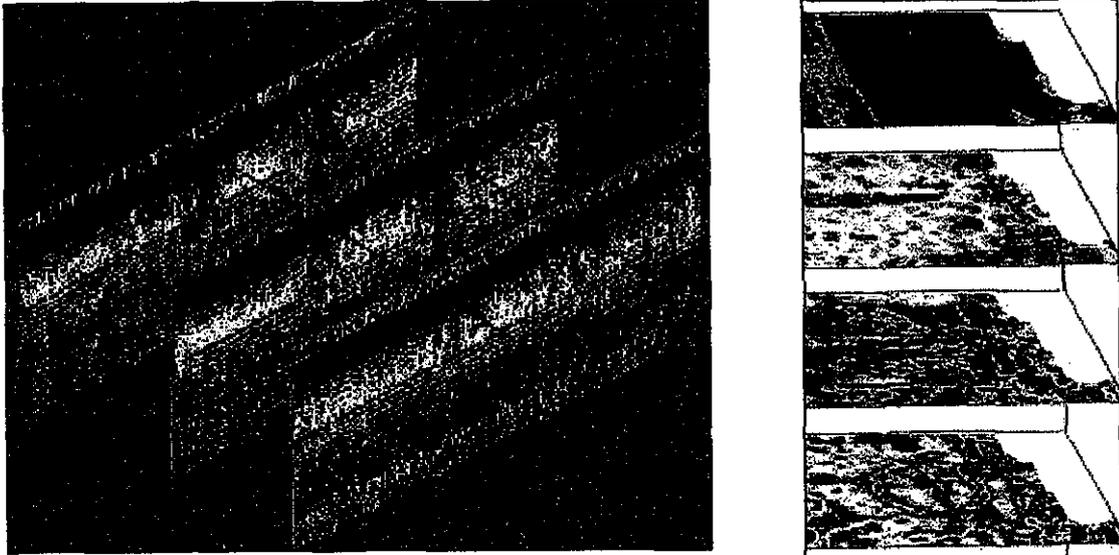


Fig. 8: De perfiles paralelos cubiertos por el radar en un sitio se pueden extraer puntos en común que puedan ser interpolados por algún método matemático para crear modelos en 3D de los sitios. Los cortes en tiempo (*time slices*) en la imagen de la derecha representan un montículo circular funerario debajo de un campo de alfalfa en Japón (www.sciam.com/exhibit/062298radar).

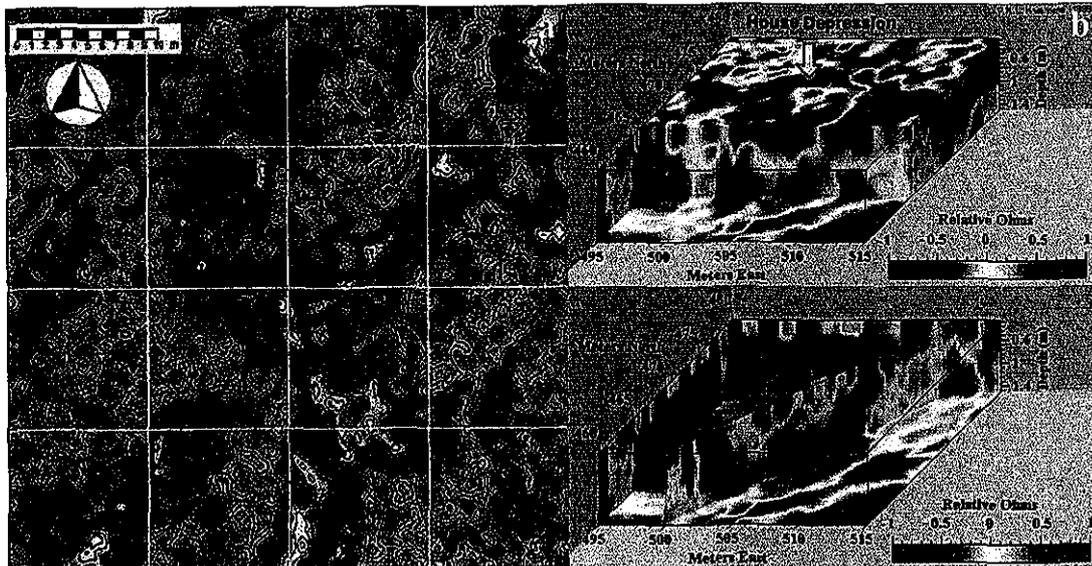


Fig. 11: Estudio eléctrico realizado por el Dr. Kvamme en una villa del S.XV cerca de UHF, Dakota del Norte: (a) Mapa de anomalía de resistencia eléctrica; (b) cortes de una tomografía eléctrica en una de las casas del sitio.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

zonas de interés en los cuatro sitios mencionados obteniendo un total de casi 10 km de perfiles. Los resultados confirmaron la gran aplicabilidad de la tecnología del GPR en ambientes como el de Chichen Itza para la identificación de rasgos tanto culturales como topográficos (fig. 9) por debajo de la superficie, así como cavernas y fisuras en la roca, que ayudaran al mejor entendimiento de la arquitectura de la zona y su cronología.

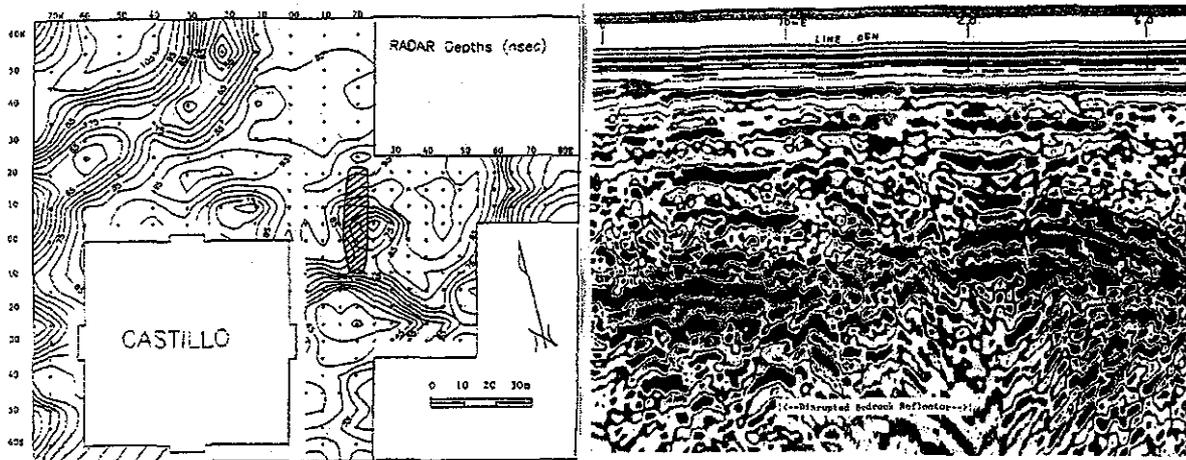


Fig. 9: (Izq) Mapa de contorno construido por medio de las profundidades del radar al reflector basal (el basamento) en la Gran Plaza de Chichén Itzá; una interrupción anómala del reflector de la roca se muestra en la zona achurada. (Der) En el perfil de la imagen se puede ver la misma interrupción en la roca (Desmond y Sauck, 1993).

Métodos Eléctricos

Los métodos eléctricos se basan principalmente en la medición de la resistencia eléctrica del subsuelo. La *resistencia* de un material es la oposición al paso de una corriente eléctrica. Esta resistencia es mayor en los aislantes y menor en los conductores, y se mide en unidades de Ohm-metro (Ωm). La *resistividad* se define por $\rho = E/i$ donde E es el campo eléctrico e i la densidad de corriente, y la resistencia se define como $R = V/I$ donde V es el potencial eléctrico e I es la intensidad eléctrica a través de un medio (Bueche y Jerde, 1996). La resistividad del suelo se denomina *resistividad aparente* (ρ_a) ya que es función de las condiciones locales encontradas en el suelo en un punto particular.

Los métodos eléctricos empezaron a ser utilizados en aplicaciones arqueológicas, incluso antes que los métodos magnéticos, desde 1946 en Inglaterra (Aitken, 1974; Wynn, 1986) e Italia (Lerici, 1958; Linington, 1970). El método de resistividad ha sido el más aplicado en la arqueología, el cual es poderoso en la exploración del subsuelo. Pero a menudo también es un trabajo lento y tedioso, a menos que se tuvieran instrumentos automatizados más modernos (los cuales al parecer ya están siendo fabricados por compañías especializadas en instrumentos geofísicos).

Este método involucra la medición de una impedancia de una forma simple: una corriente eléctrica es inyectada dentro del terreno a través de un par de electrodos; un segundo par de electrodos es entonces empleado para medir cuantitativamente el voltaje. La impedancia del terreno es entonces el cociente entre el voltaje de salida y la corriente de entrada (Telford et al, 1990). En la técnica de resistividad se conocen tres principales modos de operación: (1) los sondeos verticales, donde la separación entre electrodos es variable y se detectan anomalías verticales, (2) los de perfilaje o calicateo, en donde el transmisor y/o el receptor se mueven para detectar anomalías laterales, y (3) una combinación de ambos, que observa los cambios en la resistividad del terreno en forma lateral y vertical.

Como regla de dedo, la profundidad de máxima sensibilidad en sondeos verticales de resistividad es aproximadamente 1.5 veces el espaciamiento entre los electrodos en los dispositivos típicos. Los espaciamientos comunes de los electrodos para detectar objetos someros van entre los 0.3 a los 2 metros, según el tamaño de las estructuras a detectar y la supuesta profundidad de los materiales arqueológicos. Los objetivos más fáciles de observar en las prospecciones de resistividad son las cavidades o huecos, muros y cimientos, debido a que son altamente resistivos; pero también es especialmente útil en detectar cambios de porosidad causados por trincheras, zanjas o pozos rellenados y tumbas, ya que usualmente son buenos conductores y presentan una baja resistividad. Los elementos muy resistivos generan una anomalía positiva, mientras que poco resistivos resultan en una negativa.

Existen varios dispositivos electródicos que han sido usados en la práctica. En su forma más simple el operador toma medidas a lo largo de una línea recta moviendo los cuatro electrodos a intervalos regulares en el orden de la figura 10a, repitiendo las mediciones en líneas paralelas hasta que se haya cubierto el área deseada. Este sistema es conocido como el arreglo Wenner (Telford et al, 1990). En el arreglo Schlumberger, los electrodos de corriente tienen un espaciamiento mayor a los de potencial. En este caso, los electrodos de potencial se mantienen fijos mientras que el espaciamiento de los de corriente se va expandiendo simétricamente del centro. En el arreglo Schlumberger-Wenner, el espaciamiento entre los electrodos permanece fijo y todo el arreglo se mueve a lo largo de la línea en pasos adecuados. Los equipos más modernos (como el STING con el cual se puede hacer IRS, técnica descrita a continuación), las prospecciones eléctricas se han tornado más rápidas ya que la computadora hace los cambios automáticamente.

Wenner



Schlumberger



Fig. 10: Configuración de los electrodos de los arreglos Wenner y Schlumberger. C1 y C2 = electrodos de corriente, P1 y P2 = electrodos de potencial, a = espaciamiento equidistante estándar.

La técnica de *Tomografía Eléctrica* o Imagen de Resistividad del Subsuelo (IRS) nos proporciona imágenes en 2D y 3D formando cortes o planos del subsuelo permitiéndonos recolectar información acerca de la estructura interna de cuerpos y objetos. Se emplea principalmente para conocer la distribución de resistividades de manera lateral y a profundidad, ayudándonos en la detección de cavidades, acuíferos y restos arqueológicos

entre otros (Cámara et al, 2002). Esta avanzada técnica utiliza sistemas controlados por computadora con la facilidad de poder utilizar perfiles con un gran número de electrodos enterrados en el suelo; estos electrodos generalmente se acomodan a distancias equidistantes entre ellos. La distancia a la cual debe colocarse cada electrodo depende del tamaño de las estructuras a localizar. Posteriormente a la recolección de datos en campo, los valores obtenidos de resistividad aparente deben ser modelados matemáticamente a través de una serie de pasos para calcular la distribución de las resistividades verdaderas las cuales podrán ser luego interpretadas en cuanto a su significado físico, geológico y/o arqueológico.

En la página electrónica <http://www.planetinternet.it/archaeosurvey> se pueden ver varios casos en los que se utilizó el método de resistencia eléctrica en zonas arqueológicas alrededor del mundo. En México, los primeros estudios que involucraron levantamientos geofísicos se realizaron en Teotihuacan, Edo. de México, para la localización de túneles. Se aplicaron los métodos de gravimetría, magnetometría y resistencia eléctrica. Esta última técnica se utilizó para confirmar los resultados obtenidos con los datos magnéticos y gravimétricos y precisar la localización de los túneles, mostrando gran correspondencia entre los valores magnéticos y gravimétricos mínimos con los altos valores de resistividad (Manzanilla, et al, 1989). Los perfiles eléctricos se realizaron en el sitio de Oztoyohualco y en la Pirámide de la Luna; en ambos sitios los datos geofísicos comprobaron la presencia de cavidades subterráneas infiriendo también su trayectoria.

Desafortunadamente son pocos los estudios de geofísica aplicada a la arqueología realizados en nuestro país. Sin embargo, en Estados Unidos el Dr. Kvamme (<http://www.cast.uark.edu/~kkvamme/geop/geop.htm>) realizó en 1999 un estudio de resistencia eléctrica y tomografía eléctrica en una villa fortificada del siglo XV cerca del pueblo de Huff, Dakota del Norte. El mapa obtenido mostró claramente anomalías de alta resistividad con la forma de los cimientos de cuatro casas rectangulares (fig. 10a). Muchas otras anomalías pequeñas vistas en el mapa reflejan simplemente los huecos dejados por las madrigueras de roedores. En la tomografía obtuvieron 6 profundidades de prospección dentro de un rango que fue de los 25 cm hasta los 1.5 m; la prospección se centró en una

depresión superficial en una de las casas (fig.10b); debido a que sus pisos eran compactados, servían como barreras que inhibían la penetración de humedad lo que permitía la acumulación de la misma encima de ellas en épocas de lluvias. Esto se muestra en el corte como una baja en la resistencia encima de los suelos y alta resistencia debajo de los suelos.

Microgravimetría

El campo gravitacional terrestre es ligeramente alterado por rasgos como huecos o cuevas subsuperficiales. Gravímetros capaces de detectar pequeñas anomalías de la gravedad, denominados microgravímetros, permiten realizar mediciones punto a punto en intervalos de muestreo que pueden ser de 0.5 a 2 m, lo cuál puede consumir mucho tiempo. Además, en la mayoría de los casos, los datos deben ser corregidos cuidadosamente por efectos como la topografía entre otros. Esto hace que las prospecciones gravimétricas sean, hasta la fecha, poco usadas en la arqueología.

La mejor manera de aplicar la microgravimetría es por medio de la técnica de gradiente vertical, en la cuál se toman dos lecturas en un mismo punto del terreno: una a nivel del suelo y otra aproximadamente a un metro de altura utilizando un tripie para levantar el instrumento. La ventaja de esta técnica es que no necesita correcciones a los valores observados en campo (deriva, latitud, topografía, elevación, etc.). Esto debido a que las mediciones se dan en un espacio y tiempo tan reducidos que permite suponer que tales efectos no los afectan (son constantes en todas las lecturas).

Los principales usos que se le han dado a la técnica de microgravimetría son los siguientes:

- Exploración y evaluación estructural de depósitos minerales
- Exploración de formas kársticas y erosionales, huecos, cuevas y antiguas minas.
- Determinación de diferentes estratos sedimentarios con espesores pequeños por variaciones de densidad dentro de formaciones geológico estructurales.

- Estimación de las condiciones del subsuelo bajo estructuras industriales, incluyendo trabajos de hidroingeniería.
- Estudios para minimizar el trabajo de excavación en arqueología.

En el proyecto arqueológico de Teotihuacan mencionado anteriormente también se realizaron estudios gravimétricos realizando paralelamente perfiles topográficos. Se realizó el cálculo de las dimensiones de las cuevas usando procedimientos de inversión. En el caso de los perfiles realizados cerca de la pirámide de la Luna, “el exceso de ruido producido por las estructuras arqueológicas circundantes en los perfiles de campo no permitió una manifestación clara de las anomalías deseadas” (Chávez et al, 1988); aún así, en ambos casos, la localización de las cavidades inferidas correspondían con aquellas registradas por medio de la magnetometría. La aplicación de la prospección gravimétrica corroboró datos obtenidos en las lecturas magnéticas, además de la ayuda de métodos eléctricos, lo que ayudó a proponer la hipótesis de la existencia de un sistema de túneles interconectados bajo las pirámides de la Luna y del Sol y con otras zonas como Oztoyohualco.

Todos los casos anteriormente descritos comprueban la eficacia, aunque con sus limitantes, de la aplicación de los métodos geofísicos en la caracterización de sitios y localización de elementos de interés arqueológico. Cabe mencionar que un buen estudio geofísico debe incluir un exhaustivo estudio de la geología y antecedentes arqueológicos y arquitectónicos de los sitios a estudiar. También es importante decir que las técnicas geofísicas no pueden ser usadas como recetas, es decir, aplicadas por igual en todos los sitios. Su aplicación depende en gran medida de las condiciones dentro de las que se encuentre el sitio (características del terreno, geología, topografía, ubicación, etc) así como a las características de las estructuras (posible tamaño, profundidad, composición del material, etc); para ello hay que evaluar las ventajas que cada técnica nos puede proporcionar en contraposición a sus limitaciones. A continuación se presentan los casos de dos sitios arqueológicos que se encuentran imbuidos en diferentes ambientes: uno rural y uno urbano. En ambos casos se presentan condiciones diferentes y por lo tanto las estrategias para atacarlos también deben variar. Estos dos casos proporcionan buenos ejemplos de la aplicabilidad de la geofísica con fines arqueológicos en diferentes medios, cuales son sus ventajas y cuales sus limitaciones.

CAPÍTULO II

MEDIO RURAL: SANTA CRUZ ATIZAPAN, EDO. MEX.

En este apartado se presenta el ejemplo de un estudio de caracterización geofísica de un sitio arqueológico que se encuentra dentro de un medio rural. Aquí se plantean las ventajas y limitaciones de trabajar en este tipo de ambiente; para ello se utiliza el caso de un sitio específico. El área de investigación es el sitio arqueológico de La Campana-Tepozoco, ubicado en las afueras del pueblo de Santa Cruz Atizapan, Estado de México, por lo que también se le conoce por este nombre. Este sitio se localiza dentro de la cuenca del Alto Lerma, inmediatamente al Oeste de la Cuenca de México entre las coordenadas geográficas 19°00' a 19°20' latitud y 99°20' a 99°50' longitud, dentro del importante Valle de Toluca (fig. 12).

La Cuenca del Alto Lerma se encuentra a una altitud de 2570 msnm y está cerrada al Este por la serranía volcánica del Terciario Tardío de Tres Cruces, al Sur por el Nevado de Toluca, por conos cineríticos dispersos y flujos de lava fisurales del período Pleistoceno Tardío-Holoceno, y al Suroeste por el volcán de San Antonio (Caballero et al, 2001). El sitio arqueológico de Santa Cruz Atizapan se encuentra ubicado en la zona NW de las márgenes del Lago Chiconahuapan; éste es el más alto de una serie de tres cuerpos de agua que están conectados por el Río Lerma, el cual fluye hacia el noroeste al Lago de Chapala. Actualmente estos lagos se han visto considerablemente reducidos como resultado de la extracción de agua para la Ciudad de México, y son particularmente someros en la temporada de sequía en invierno.

La ocupación principal de este sitio arqueológico data del período Epiclásico (700-900 d.C.). Se encuentra dentro de una zona cuyo actual uso es agrícola y la obtención de recursos lacustres como la pesca y recolección de fauna y flora silvestre (Sugiura, 2000).

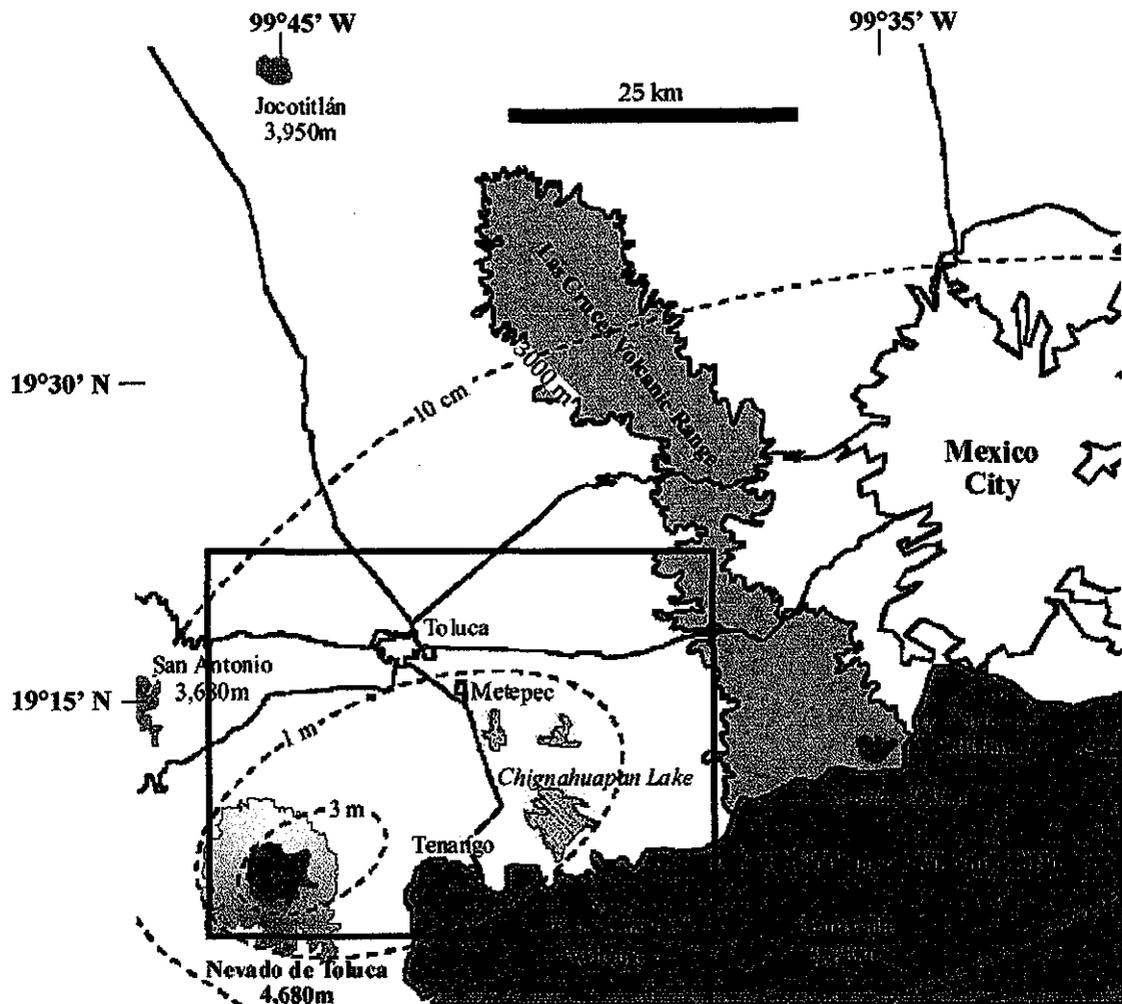


Fig. 12: Mapa general de la región que abarca la Cuenca del Alto Lerma, parte del valle de Toluca y parte de la Ciudad de México. En un recuadro color magenta se muestra la zona cubierta por la imagen de satélite procesada.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Por lo tanto, se trata de un sitio dentro de un ambiente rural en el cual se pueden aplicar con relativa facilidad cualquier prospección geofísica deseada, y cuyo único factor de ruido es el de una bomba hidráulica con la cual se extrae actualmente agua para todo el municipio y áreas circunvecinas. Dentro de los planteamientos que se hacen en esta parte de la tesis están:

- Caracterizar geográficamente, a macro escala, la región de la cuenca del alto Lerma por medio de la composición a color de las tres componentes principales de las 6 bandas del Landsat 7 (las especificaciones del satélite se describen posteriormente), su comparación con el mapa geológico de la región construido por la Sección Geológica del Instituto de Geología, UNAM, un modelo de vegetación construido con base en un análisis canónico para obtener las bandas de brillantez, verdosidad y humedad de la vegetación de la región, y un mapa de texturas que permita diferenciar las zonas de mayor rugosidad geomorfológica de las de menor rugosidad, identificando de esta manera sus rasgos naturales más importantes. Este tipo de regionalización puede permitir inferir las zonas más probables de asentamientos prehispánicos y justificar la ubicación del sitio a estudiar.
- Caracterizar la porción norte del sitio arqueológico de Santa Cruz Atizapan, a micro escala, principalmente con los métodos geofísicos de gradiente magnético, radar de penetración somera y tomografía eléctrica. El objetivo es determinar la eficacia de los métodos geofísicos en la detección de estructuras de origen arqueológico en un medio rural.

Descripción geológica de la región

La cuenca del Alto Lerma se encuentra limitada en su lado Este por la sierra de Las Cruces y los Montes Altos, que corren en dirección NNW-SSE y lo separan de la vecina cuenca de México, hacia el sur por una serie de pequeños cuerpos volcánicos de menor altura que son parte de la formación Chichinauhtzin ubicados al sur de Tenango, Jajalpa, Techuchulco y Texcalyacac. Al suroeste se limita por el estratovolcán Nevado de Toluca o Xinantécatl, que es el cuarto más alto de los volcanes de México con 4 680 msnm

(Bloomfield y Valastro, 1974; Bloomfield, 1975). Los derrames del mismo volcán, así como los volcanes de San Antonio y el Molcajete, limitan el valle por su flanco occidental. Hacia el norte está delimitado por una serie de cerros que se encuentran en dirección este-oeste y por la falla de Perales (ibid).

De los numerosos volcanes del valle de Toluca, los más importantes son el Nevado de Toluca y el San Antonio. Este último está compuesto de una gruesa secuencia de flujos de lava, superpuesta por materiales piroclásticos (capas de depósitos plinianos ricos en pumiza). La parte más alta de su secuencia tiene una edad de 3-0.2 Ma, pero se considera que las fases más tempranas de su formación proceden del Mioceno medio (García-Palomo et al, 2001). El Nevado de Toluca es la estructura ígnea que más ha contribuido con la estratigrafía y formación de suelos de la Cuenca del Alto Lerma, principalmente con el depósito de materiales volcánicos primarios y sedimentos volcanoclásticos secundarios durante los últimos 40 mil años (Caballero et al, 2001). El Nevado de Toluca es un volcán poligénico de composición andesítico-dacítica; sus primeras emisiones ocurrieron hace 2.6 Ma y continuaron durante el Pleistoceno tardío y el Holoceno. Su última actividad eruptiva ocurrió hace 3 500 años (Macías et al, 1997), y actualmente es un volcán activo en estado de quietud.

El Nevado de Toluca se formó sobre la intersección de 3 sistemas de fallas de diferente edad, orientación y movimiento: (1) el S.F. Taxco-Querétaro, de tendencia NNW-SSE, al sur del volcán, (2) el S.F. San Antonio, con orientación NE-SW, al NW del volcán, y (3) el S.F. Tenango, de orientación E-W, localizado al E del volcán. Estos sistemas de fallas han influenciado enormemente su historia volcánica, como la formación de horst y grabens del sur del nevado ocasionados por una fase extensional del Mioceno temprano, además de poseer un aparente control del volcanismo monogenético del Pleistoceno tardío al Holoceno y la actividad sísmica de la región, y colapsar los flancos del Nevado (García-Palomo et al, 2000; García-Palomo et al, 2001).

Además de los sedimentos típicos de un ambiente lacustre, en las columnas estratigráficas (fig. 13) procedentes de las márgenes del lago Chignahuapan cercanas al sitio arqueológico en cuestión y denominadas Islas I y II (Caballero et al, 2001), se identi-

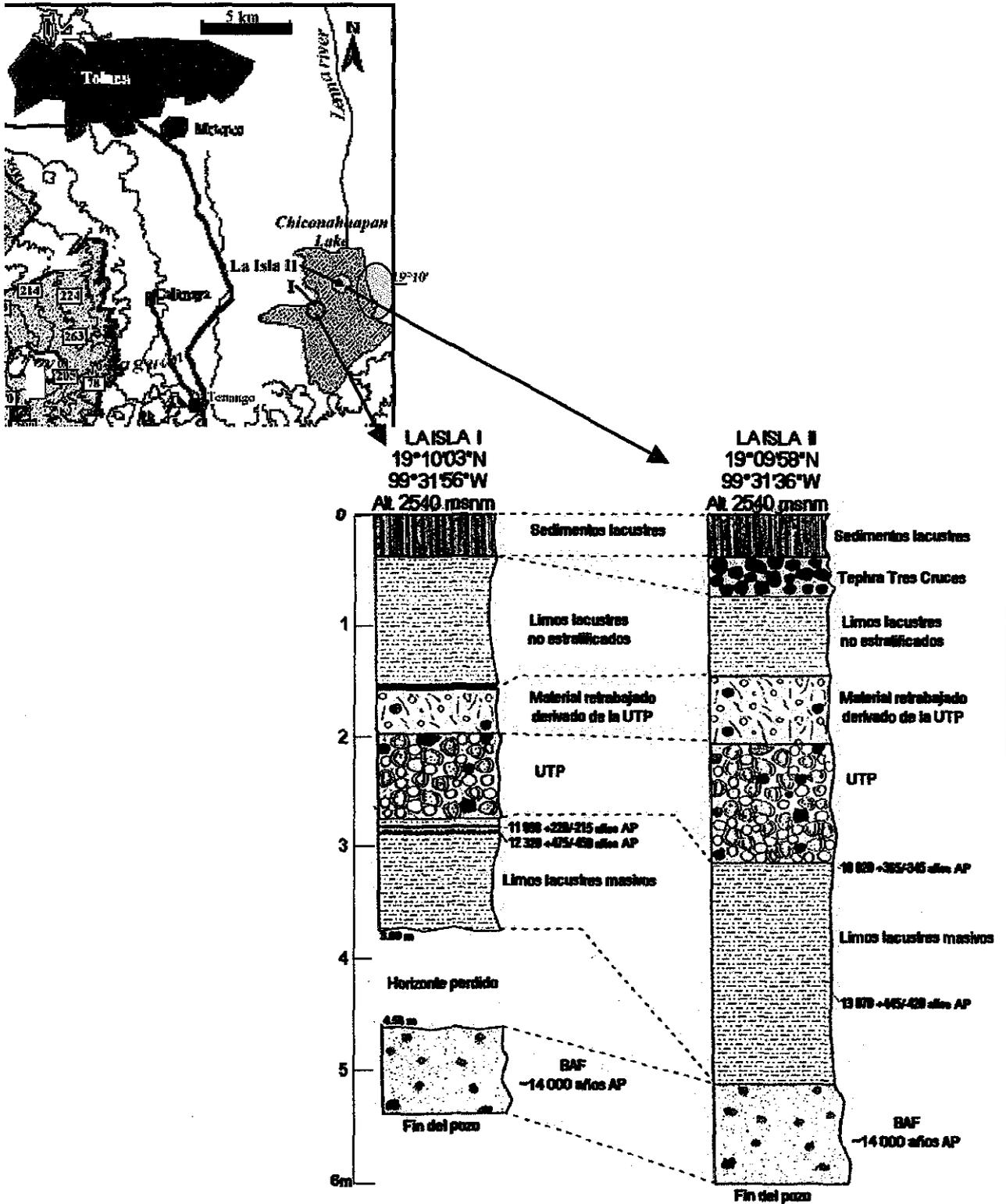


Fig. 13: Columnas estratigráficas obtenidas de los márgenes noreste y noroeste del Lago Chignahuapan (Caballero et al, 2001; Arce et al, 2001). El área en naranja denota la ubicación del sitio arqueológico.

can también algunos eventos producidos por volcán del Nevado. La erupción pliniana hace 11 600 años generó la UTP (Pumiza Toluca Alta), aunque recientes estudios de radiofechamiento (Arce et al, 2001) han ubicado a esta última erupción con una fecha real de 10 500 ¹⁴C años AP. Esta última erupción pliniana del Nevado de Toluca de hace 10 500 años perturbó las condiciones ambientales que presentaba en ese entonces la cuenca del Alto Lerma, ya que las plumas eruptivas depositaron 150 cm de pumizas en forma de grava; esto provocó un embalse parcial, además de posteriores entradas de flujos de depósitos causados por la removilización de material proveniente de las sierras aledañas a esta cuenca (Caballero et al, 2001). Se tiene conocimiento que, durante el Holoceno temprano, el área estuvo sujeta a intensos procesos de erosión que removilizaron grandes cantidades de material piroclástico depositado por la erupción UTP. Los depósitos fueron removidos como lahares por un largo período de tiempo (Arce et al, 2001). Esta unidad estratigráfica se registra en las dos islas a una profundidad de 2-3 m, y se diferencia del resto de los estratos por su alto contenido en materiales de desecho volcánicos.

La destrucción total o parcial de los domos dacíticos centrales causada por la actividad volcánica del Pleistoceno tardío (García-Palomo et al, 2001) provocaba flujos de bloques y cenizas (BAF) cuyos depósitos anteriormente se consideraban como una misma unidad con una edad estimada de 28 000 años AP (Bloomfield y Valastro, 1974, 1977; Cantagrel et al, 1981). Gracias a la nueva evidencia estratigráfica recolectada y a los fechamientos radiométricos, actualmente se conocen 5 depósitos BAF en el Nevado de Toluca y áreas circunvecinas con edades estimadas de 37, 32, 28, 26 y 14 mil años de los cuales el primero, tercero y último se relacionan directamente con la destrucción de los domos dacíticos (García-Palomo et al, 2001). El depósito producido hace 14 000 años tiene una distribución más radial que los demás y está registrada a una profundidad de 4.5 a 6 m en el perfil estratigráfico (Caballero et al, 2001), representado por un flujo masivo de cenizas de color gris con 90 cm de espesor del estrato y compuesto de partículas de tamaño de arenas finas y limos.

Durante los últimos 10 mil años, el lago Chiconahuapan ha experimentado una serie de fluctuaciones en el nivel de sus aguas (Metcalf et al, 1991), teniendo relativamente altos niveles después de la deposición de la UTP (~8 200 años AP), seguido de una

regresión de las aguas probablemente ocasionada por la erupción del volcán de Tres Cruces y periodos posteriores (entre 8 200 y 6 000 años AP). Otras fluctuaciones del nivel del lago sugieren para los años ~4 600 y 1 400-900 AP bajos niveles de agua, y altos niveles para los años 3 600 y 1 600 AP en el cual se ubica un nivel máximo (Caballero et al, 2001).

La geomorfología de la cuenca presenta las características típicas de un vaso lacustre y está conformado básicamente por tres sistemas de topoformas. En la parte baja, entre 2 580 y 2 700 msnm, se encuentra la planicie aluvial y residual lacustre, cuya extensión máxima alcanza alrededor de 1 000 km². Aunque presenta pendientes, éstas son tan suaves que prácticamente resultan imperceptibles, salvo por unos cuantos conos volcánicos que se levantan desde el fondo de depósitos aluviales y cineríticos. El segundo sistema corresponde a una franja de lomeríos de colinas redondas con alturas de 2 600 a 2 750 msnm que circunda la planicie. Tiene una extensión aproximada de 500 km². Los lomeríos se caracterizan por pendientes que van desde suaves a moderadas, con frecuencia interrumpidas por barrancas. Actualmente, gran parte de esta zona está sufriendo un proceso avanzado de deforestación y erosión. El tercero y último sistema se caracteriza por una zona de serranías, arriba de los 2 750 msnm, donde hay escudos volcánicos y topografía muy accidentada con pendientes abruptas y barrancas profundas. Por su parte, desde el punto de vista geomórfico, la cuenca del Alto Lerma tiene origen ígneo y, al igual que en el vecino valle de México, la geoforma predominante es producto del volcanismo, a la que se añaden los sedimentos lacustres y los materiales de aluvión que conforman las planicies; sin embargo, el transporte de masas por gravedad y el tectonismo también tuvieron importancia en la conformación geomórfica.

Arqueología e historia del sitio

Es bien sabido que la Cuenca del Alto Lerma, la más elevada de la República, fue habitada en épocas prehispánicas y aún a principios de la colonia por los matlatzincas, otomíes, mazahuas y mexicas. Se considera que desde tiempos remotos se constituía como una tierra de fertilidad y belleza fisiográfica. De estos cuatro pueblos, el nombre matlatzinca fue el más ampliamente reconocido por su predominio sobre los otros pueblos.

La importancia del Valle de Toluca ha sido recalcada por la gran riqueza agrícola de su suelo aluvial, como su nombre lo hace patente. En tiempo de apogeo, el dominio territorial de los matlatzincas rebasó el límite del Valle de Toluca. Incorporó una amplia región hacia el sur, oeste y suroeste del actual Estado de México, extendiéndose por la tierra caliente al sur y al occidente del Nevado de Toluca. Hacia el noroeste los matlatzincas coexistieron con los mazahuas y al oriente con los otomíes (García Payón 1936: carta de territorio ocupado por los maclatzincas en los años de 1459, 1461 y 1489). Todos pertenecían al tronco lingüístico común, el otomí-pame (Quezada 1972: 24-25).

Aunada a la fertilidad de la región, la eficaz explotación de los variados recursos lacustres como aves migratorias, peces, batracios, plantas acuáticas en la antigua Laguna de Lerma y ríos, convirtió al valle en una de las áreas más importantes para sustentar el poder del Altiplano Central en tiempos prehispánicos, sobre todo durante la ocupación mexica. Una vez incorporado a la esfera política de los mexicanos, el Valle de Toluca formó parte de un sistema tributario que afianzaba el poder mexica expansionista (Sugiura, 2000). La presencia en el Valle de Toluca de los mexicanos venía acrecentándose paulatinamente a lo largo de los últimos cuatro siglos antes de la conquista española y se reforzó en forma súbita a partir del siglo XIV. Finalmente, en tiempos del rey Axayacatl, los aztecas conquistaron en 1473 el Valle de Toluca.

Para el período Clásico medio-tardío (600-700 d.C.) se consideran cuatro sitios principales en el Valle de Toluca que funcionaban como centros rectores o centros cívico-religiosos por su arquitectura ceremonial: 1) Santa Cruz Azcapotzaltongo, mpio. de Toluca, 2) Dorantes, mpio. de Ocoyoacac, 3) Ojo de Agua, mpio. de Tenango del Valle, y 4) La Campana-Tepozoco, mpio. de Santa Cruz Atizapan. Éste último comenzó su desarrollo como centro administrativo-religioso construido sobre una planicie en los márgenes nororientales del lago Chignahuapan o ciénega de Almoloya, el cuál estaba rodeado por numerosas casas habitación (Sugiura y Serra, 1983). Este sitio alcanzó su apogeo durante el periodo Epiclásico (700-900 d.C.) y probablemente se encargaba de administrar y controlar la zona suroriental del valle así como los recursos provenientes de la Ciénega (Sugiura, 2000). La técnica de construcción de las estructuras monumentales está constituida por plazas de diferentes niveles y el uso de bloques de piedra careada rectangular con esquina

rematada, lo cual sugiere la importancia de este sitio como rector en el sureste del valle de Toluca desde fines del Clásico por el año 600 d.C.(Sugiura y Serra, 1983).

Los asentamientos de Santa Cruz Atizapan corresponden a una etapa de transición sociocultural y su ocupación, según los análisis de materiales cerámicos, va desde finales del período Clásico (600 d.C.) hasta el Epiclásico (1000 d.C.). El sitio abarca dos zonas importantes: por un lado, contiene al centro regional La Campana-Tepozoco cuyo principal representante es un montículo de mayor tamaño que se eleva aproximadamente 8 metros por encima del resto del sitio conocido como el Cerro de la Campana. Este fue construido sobre una terraza artificial de cerca de 1 metro de grosor; por otro lado, se encuentra el área lacustre que probablemente fungía como sostén de este centro. Los pobladores de las riberas del lago habitaban en pequeñas elevaciones, llamadas *bordos* o *islotes*, que se distribuían hacia el suroeste y oeste del margen nororiental de la ciénega. Cuando las aguas de la laguna tenían un nivel más alto, estos bordos emergían de ellas como islotes (Sugiura y Serra, 1983). Al parecer existía una marcada diferenciación social entre el centro religioso y el área habitacional. Esta diferencia jerárquica se ve manifestada al comparar los materiales cerámicos procedentes de la Campana-Tepozoco, con abundantes tiestos finamente decorados en Rojo sobre Crema, y los registrados en las excavaciones de los bordos, cerámica doméstica sin decoración (Sugiura, 2000).

Investigaciones arqueológicas del área han registrado más de treinta de estas elevaciones, aunque se considera la existencia de alrededor de 100 (no todas funcionando simultáneamente). En excavaciones realizadas en algunos de los bordos se ha registrado principalmente cerámica utilitaria o de uso doméstico, lo que lleva a la suposición que dichos pobladores se dedicaban al aprovechamiento de los recursos lacustres como la caza, la pesca y la recolección de la fauna y flora acuática, además de la posible manufactura de productos artesanales que aprovechaban de los mismos recursos (textiles y cestería). Debido a la buena preservación de las estructuras arqueológicas que hasta los años 50 se encontraban debajo del agua, los arqueólogos pudieron reconstruir el sistema constructivo de dichos bordos. Estos estaban contruidos artificialmente mediante capas de tierra asentadas sobre una base fabricada a base de troncos, tallos y hojas de tules y juncos entretejidos (Sugiura y Serra, 1983). No se han identificado los muros de las casas pero las

evidencias indican que los cimientos estaban formados por piedras alineadas sobre las cuales se colocaban adobes. Aparentemente estos bordos funcionaron como casas habitación que periódicamente eran renovadas superponiendo capas de tierra y grava compactada en su base (Sugiura y McClung, 1988). Los pisos de ocupación están constituidos por varias capas inferiores de tierra compactada y una superior de tezontle triturado y endurecido que formaba una superficie firme. La calidad de los pisos variaba según la función específica de cada área, pero con el cada vez mayor peso de los pisos superpuestos provocó un continuo hundimiento de los islotes con el paso del tiempo, los cuales fueron entonces rellenados de rocas y tierra (Sugiura, 2000).

Las casas tenían muros y techos ligeros, quizá de tejamanil o tule, con un armazón de postes de madera. Una de las estructuras públicas registrada en un bordo tenía una planta rectangular y muros de piedra, y correspondía al período Clásico. En el Epiclásico este sistema constructivo se modificó edificando estructuras más ligeras pero de mayores dimensiones, con muros y techados de madera recubiertos de tule, tejamanil o bajareque (Sugiura, 2000). Aparentemente algunos islotes estaban comunicados por caminos hechos sobre bases de troncos de árboles. Los entierros registrados son de tipo flexionado con orientación sur-norte; para ello, los habitantes cavaban una oquedad rectangular con una profundidad aproximada de 1.5 metros. Algunos otros hallazgos de las últimas excavaciones en el área de los bordos indican la presencia de varios *empedrados* (fig. 14), los cuales son elementos cuadrangulares de orientación N-S con alrededor de 2 m de lado formados por rocas basálticas, localizados a una profundidad de entre los 25 y los 39 cm y un grosor de 10-42cm (L. Barba y A. Ortiz, *comunicación personal*).

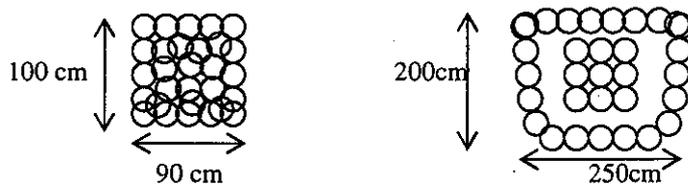


Fig. 13: Dibujos esquemáticos de dos tipos de *Empedrados* registrados en las últimas excavaciones del área de bordos.

Otro elemento son los *pisos de tepojal* de color gris claro compuestos de piedra pómez, tezontle y rocas intemperizadas, una compactación media y textura arenosa; su espesor medio es de 4 cm y la profundidad a la que se encontraron en la excavación fue de 14-56 cm. La profundidad máxima hasta donde se registraron vestigios arqueológicos fue de 3 metros (donde se encontraba la cama de pilotes de madera). Bajo los pilotes de madera se encontraba el suelo natural no alterado (A. Ortiz, *comunicación personal*). Hacia fines del Epiclásico (1000 d.C.) La Campana-Tepozoco deja de funcionar como centro regional, probablemente debido a cambios climáticos que afectaron el nivel del agua de las ciénegas y ríos. De esta manera, se dejaron de construir nuevos islotes, abandonándose los que se encontraban habitados en ese momento (Sugiura, 2000).

Procesamiento digital de la imagen de satélite multiespectral de la Cuenca del Alto Lerma, Valle de Toluca

Una imagen multiespectral de satélite es utilizada para caracterizar el contexto geológico y geográfico de la Cuenca del Alto Lerma (fig. 12), región que engloba al sitio arqueológico de interés. La imagen fue procesada por diferentes métodos. Se obtuvo una composición a color de las primeras tres componentes de la imagen y así extraer los rasgos más importantes de la región, dejando de lado información redundante. A su vez, se comparó esta imagen con el mapa geológico de la región, un modelo de vegetación y un mapa de texturas, de forma que se pudieran separar todas sus variables naturales y poder explicar a mayor detalle cada uno de sus rasgos principales. Esto dará una idea del entorno actual en la que se encuentran las principales zonas arqueológicas en esta porción del Valle de Toluca.

La *Descomposición en Componentes Principales (DCP)* es una transformación al conjunto de datos que se aplica simultáneamente a todas las bandas que componen una imagen multiespectral (o hiperespectral) y a la salida se obtiene también una imagen multiespectral (Lira, 2001). Al utilizar el procedimiento de una descomposición en componentes principales se intenta generar un nuevo conjunto de bandas o componentes no correlacionadas al reducir la dimensionalidad del espacio sin pérdida significativa de

información. Como son combinaciones lineales de las variables originales, los nuevos valores del vector de pixels esta relacionado a su valor anterior de brillantez en el conjunto de las bandas espectrales. Lo importante de esta operación es hacer evidente algunos rasgos que no son discernibles en las variables originales, preservando el contenido de información esencial de la imagen original. Por otro lado, se puede eliminar el ruido contenido en las imágenes al realizar esta transformación. Las nuevas variables generadas se conocen como componentes principales y poseen características estadísticas deseables, tales como independencia (cuando se asume multinormalidad) y, en todos los casos, no correlación. Además cada componente principal sintetiza la máxima variabilidad residual contenida en los datos (Morrison, 1990; Hair et al, 1992).

Se examinan cuántos componentes son necesarios incluir para que el porcentaje de variación explicada sea satisfactorio. En principio, se recomienda preparar un gráfico donde se represente el porcentaje de variación explicada por cada componente en las ordenadas y los componentes en orden decreciente en las abscisas. Se elegirán los componentes que puedan explicar el mayor porcentaje de variabilidad (al menos 95 %), perdiendo así un mínimo de información. El análisis de componentes principales es esencialmente descriptivo y tiene una interpretación geométrica; además, cada banda de salida puede tener una interpretación física (Lira, 2001). Es probable que la imagen de salida contenga valores negativos que no es conveniente manejar ni para efectos del despliegue ni para transformaciones ulteriores. Por esto es necesario realizar un re-escalamiento del rango dinámico de valores combinado posiblemente con una normalización al histograma, para darle a la imagen de salida el mejor contraste posible, aprovechando al máximo las características de realce global que tiene esta transformación. Comúnmente se emplean las tres primeras componentes para efectos de despliegue a color, lo cual también se puede usar para fines de una clasificación espectral. En el caso específico de las imágenes LANDSAT son posibles las aplicaciones en las áreas de geología, uso del suelo e hidrología (<http://rst.gsfc.nasa.gov/>). Dada la naturaleza de esta transformación, se tiene que la varianza en una imagen multispectral está asociada con las clases de patrones que presenten poco o ningún cambio, por lo que aquellas regiones de cambio localizado quedan diferenciadas o realzadas en sus primeras componentes.

La *composición a color* de una imagen es aquella donde se despliegan tres bandas asignando a cada una de ellas tonos de los colores rojo, verde y azul o RGB (Lira, 2001). El falso color es una representación punto por punto de una imagen original o de un conjunto de bandas de una imagen multiespectral de una escena a un espacio de color definido por un despliegue de valores tricromáticos que pueden ser funciones lineales de los valores de píxel originales de la imagen. El mapeo a color pone a los objetos normales en un mundo de colores extraños de manera que el observador le preste mayor atención a tales objetos, lo que no haría si estuvieran coloreados normalmente o en tonos de grises. La composición en falso color se efectúa mediante una síntesis aditiva de los colores, por lo que se pueden descomponer sus diferentes objetos en “cantidades” relativas de colores primarios y así realizar una apreciación relativa de la respuesta de cada material en los diferentes canales que la conforman (Pratt, 1991).

En un trabajo reciente, Lira y Rodríguez (2001) proponen un *operador no-paramétrico* para extraer textura en imágenes multiespectrales. En este procedimiento el conjunto de bandas de una imagen multiespectral se representa como un campo vectorial. Sobre este campo se aplica un *operador de divergencia* para generar un mapa de texturas donde los niveles de gris representan la rugosidad de la textura. Las derivadas parciales involucradas en este operador se pueden aproximar por medio de diferencias finitas ponderadas. Los autores consideran que el operador de divergencia es un medio adecuado para extraer las variaciones de textura a partir de un conjunto de bandas de una imagen multiespectral. Con el objeto de reducir los recursos de memoria utilizados, acelerar el cálculo del operador de divergencia y disminuir el contenido de ruido de la imagen, se debe aplicar una descomposición de componentes principales a las bandas de la imagen con una misma resolución espacial. En imágenes LANDSAT TM, las tres mejores componentes se utilizan para construir el campo vectorial.

Tradicionalmente los mapas de cobertura de vegetación de una región se generaban a partir de la obtención de algún índice de vegetación (como el NDVI o el DVI) o transformación, derivados principalmente de las bandas del rojo e infrarrojo cercano de una imagen multiespectral únicamente. Pero se ha visto que esto no es suficiente para caracterizar la vegetación. Hurcom et al (1996) han demostrado que las características clave que causan la variación de la vegetación en los datos espectrales son algunos

parámetros biofísicos que se obtienen del espectro: a) la brillantez de la vegetación, b) la cantidad de vegetación y su contenido de agua, y c) la absorción de la clorofila. De acuerdo con ellos, ninguno de estos parámetros puede caracterizar el estado de la vegetación por sí sola, por lo que deben ser consideradas conjuntamente. Para ello, Lira y García (2002) proponen la construcción de un modelo que caracterice los tipos de cobertura de vegetación en una región a partir de tres variables canónicas no correlacionadas derivadas de las bandas de una imagen multiespectral. Las variables canónicas son las siguientes: 1) el albedo de la vegetación, 2) la fortaleza de verdor de la vegetación, y 3) el contenido de humedad de la vegetación. Estas variables forman a su vez una imagen multibanda, la cual posteriormente es clasificada por algún clasificador espectral no supervisado, como el algoritmo de isodata, de forma que se genere un mapa temático de los tipos de cobertura de la vegetación.

La primera componente canónica se obtiene al calcular la primera componente principal de un recorte previo de una zona conocida de la imagen que sólo contenga vegetación saludable. Con el kernel obtenido se procesa nuevamente la imagen original que realzará las zonas con vegetación. Esta primera componente principal será, entonces, directamente proporcional al albedo de los tipos de cubierta vegetal. A la segunda componente de la transformación Kauth-Thomas (Kauth y Thomas, 1976) se le llama *verdosidad* y está asociada a la fuerza de la verdosidad o la biomasa de la vegetación; esto caracterizaría nuestra segunda componente canónica. El TSAVI (Transformed Soil-Adjusted Vegetation Index) es un modelo de índice de vegetación basado en la distancia; es decir, comprende un modelo que usa una combinación de las bandas del rojo visible y el infrarrojo cercano además de los valores del modelo de la regresión lineal calculada sobre los píxeles compuestos sólo de suelo sin vegetación en la región. De esta manera separa las áreas con vegetación de las áreas con suelo seco, lo cual representaría la tercera componente canónica.

Para este apartado se trabajó con las 6 bandas del sensor Landsat 7, cuyas características originales son las siguientes:

Tamaño píxel	Path/Row	Zona	Fecha	Pixels	Líneas
30 x 30 m ²	26/47	Cuenca de México	29/10/2001 11:03:42	4726	3245
Tipo coordenadas	Esquina noreste		No. Bandas		
UTM	369585.000 m E, 2182515 m N		6		

Tabla 1: Características generales de la imagen reportada

La imagen original cubre un área que incluye a la ciudad de México, el Valle de Toluca y a gran parte de los sistemas montañosos (de origen volcánico) que los limitan hacia el sur. Ya que sólo la parte del Valle de Toluca, y más específicamente la Cuenca del Alto Lerma, fue conveniente hacer un recorte de la imagen original que englobara sólo esta área. Cubriendo las coordenadas geográficas: 19°03' a 19°21' latitud y 99°37' a 99°46' longitud, se obtuvo una imagen de 2048 x 1800 pixels. En el programa SANDI (Lira y Laudgrave, 1992) se aplicó un Análisis de Componentes Principales extrayendo 6 componentes (tantas componentes como bandas se tienen). Los resultados de éste análisis se muestra en la tabla 2. Para esta imagen, las primeras tres componentes principales acumularon un poco más del 99% de la información de la imagen; por lo tanto, el campo vectorial es 3-dimensional. Debido a que la resolución espacial de la banda 6 es diferente (60 x 60 m), ésta no fue incluida en el procesamiento.

+----- ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES -----+					
Kernel					
0.3890	0.4256	0.4490	0.2719	0.4224	0.4621
0.0762	0.0057	-0.0730	0.9270	-0.0681	-0.3534
-0.5134	-0.4027	-0.2227	0.1390	0.5866	0.4016
-0.5842	0.1441	0.6935	-0.1211	0.1237	-0.3565
-0.3783	0.1184	0.1145	0.1601	-0.6599	0.6071
0.3080	-0.7886	0.4995	0.0844	-0.1486	0.0678
Rotaciones = 65					
Porcentaje de información significativa en cada banda de transformación:					
Banda 1: 87.7978%					
Banda 2: 7.1563%					
Banda 3: 4.1494%					
Banda 4: 0.5809%					
Banda 5: 0.2548%					
Banda 6: 0.0608%					

Tabla 2: Resultados numéricos de la Descomposición en Componentes Principales de la imagen analizada.

El despliegue de las primeras tres componentes se hizo por medio de una composición a color, aplicando a la primera componente el color rojo, a la segunda componente el verde y la tercer componente el azul. Debido a que sólo puede desplegar en RGB bandas que tengan valores enteros (dentro de un rango de 0 a 255), se reescalaron los valores de los pixels obtenidos en cada una de las componentes utilizadas por medio de la aplicación de una elongación lineal a su histograma. Posteriormente se pudieron desplegar en sus respectivos canales. El resultado de la composición en falso color se puede ver en la fig. 15. En ella se pueden distinguir ciertos rasgos geológicos que se presentan en el mapa geológico construido por el Servicio Geológico Metropolitano y el Depto. de Vulcanología del Instituto de Geofísica de la UNAM (fig. 16). Muchos rasgos geológicos no se diferencian finamente en la composición ya que la clasificación también se ve afectada por los datos que aportan tanto la vegetación como los rasgos antropogénicos.

Lo que se puede obtener de esta composición a color de los tres primeros componentes principales es una regionalización, con mayor detalle, de la imagen original; los diferentes colores registrados dan una idea de la existencia de distintas características presentes en la superficie. Esta imagen incluiría entonces zonas boscosas en toda la parte sur y este de la cuenca del Alto Lerma, una serie de campos agrícolas y áreas deforestadas en varias partes de la planicie aluvial y lacustre (gran parte actualmente desecada), tres principales cuerpos de agua alterados esencialmente por contaminación y vegetación (alrededor de estas ciénegas se encuentran los asentamientos prehispánicos de mayor interés), así como zonas urbanizadas modernas.

Las principales zonas de derrames basálticos también se pueden apreciar con otras tonalidades (i.e. el Nevado de Toluca al sureste de la cuenca, con una diferenciación marcada en la cima probablemente debida a la ausencia de vegetación); la gran variedad de conos cineríticos también son claramente diferenciables en la escena (la mayoría en tonos de verde). El tipo de vegetación actualmente presente en la región incluye bosques de pino, encino y oyamel, matorrales, pastos y varios campos agrícolas. Se pueden apreciar varias de las fracturas importantes identificadas por el mapa geológico al sur de la escena, las cuales toman una tonalidad verde más intensa (i.e. debajo de Teotenango, San Pedro Zilotepec y León



Fig. 15: Composición a color de las tres primeras componentes principales mostrando los principales rasgos regionales de la imagen. Con un triángulo negro se ubican algunos sitios arqueológicos conocidos. Con un triángulo amarillo se muestra las zonas geográficas con condiciones favorables para el asentamiento de comunidades en épocas prehispánicas (márgenes de lagos, riveras de cauces de ríos, planicies, rutas de acceso, pendientes bajas de volcanes y sierras, mesetas).

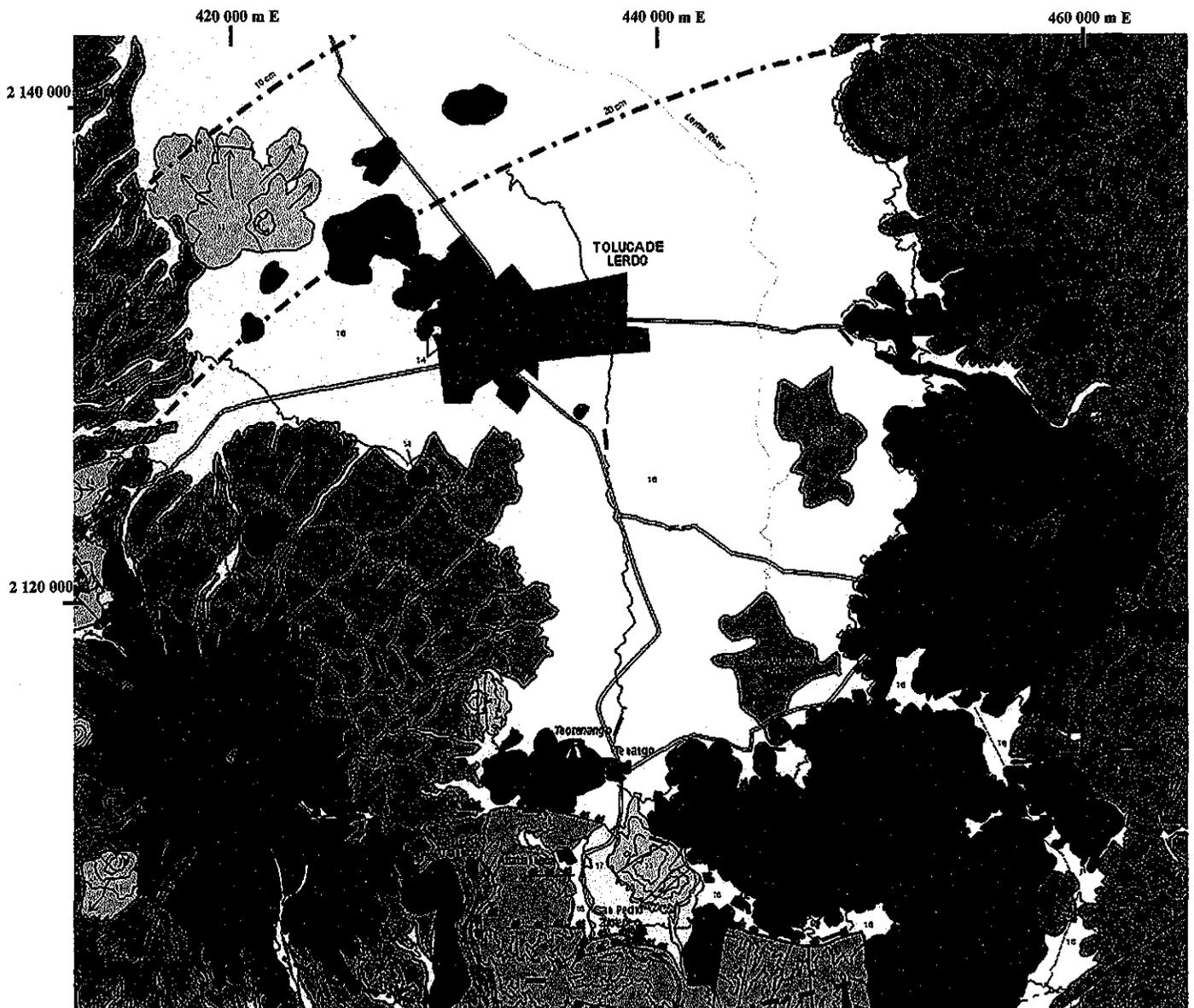


Fig. 16: Mapa geológico de la región del Valle de Toluca construido por el Servicio Geológico Metropolitano y el Depto. de Vulcanología, IGEOF-UNAM (Arce et al, 2001). Las leyendas de los tipos de unidades de roca se encuentran en la página siguiente.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

- 6** **TEPOZTLÁN FORMATION.**- (Early Miocene to Late Miocene) This formation consists of massive lahars rich in subrounded porphyritic andesite clasts interbedded with fluvial and minor lacustrine deposits. The fluvial deposits show a wide diversity of stratification types (cross-bedded, normal grading, etc.), syn-sedimentary faults, occasionally clastic dikes, and channel fillings. Its total thickness is 200-1000 m.
- SAN NICOLÁS BASALTIC-ANDESITE.**- (Early Miocene) Composed of a series of gray vesicular basaltic-andesite lava flows that have aphanitic textures and signs of hydrothermal alteration. It has a thickness greater than 100 m. A whole-rock K-Ar date of this unit yielded 21.6 ± 1.0 Ma (García Palomo, 1998).
- TILZAPOTLA FORMATION.**- (Early Oligocene) Composed of rhyolites, rhyodacites, dacitic lava flows, and pyroclastic flow deposits. In the towns of Porfirio Díaz and Chiltepec formed large and extend plateaus, sometimes intruded by felsic dikes. Thickness is 300 m. Several K-Ar dates yielded 26 Ma. (Fries, 1960) and between 24.8 ± 1.3 and 36.2 ± 1.0 Ma, assigning this formation to the Oligocene (Morán - Zerteno et al., 1998). A whole-rock age determination of a pyroclastic flow in the area yielded 38.3 ± 1.0 Ma (García-Palomo et al., 1999).
- BALSAS FORMATION.**- (Late Eocene-Early Oligocene) Consists of calcareous conglomerates, lava flows, sandstones, volcanic siltstones, and lacustrine deposits. It is represented by reddish heterolithic conglomerates that consist of rounded to subrounded clasts (1-5 cm in diameter) set in a sandy-silty matrix. Variable thickness to a maximum of 500 m.
- INTRUSIVE FELSIC IGNEOUS ROCKS.**- (Early Eocene) Small stock of quartz-rich porphyritic dacitic (C. La Piedra Parada) dated at 55 ± 6 Ma by the Pb-alpha method (De Cserna et al., 1974).
- GUERRERO-MORELOS PLATFORM.**- (Early-Late Cretaceous) Includes the Morelos and Mexcala Formations. The Morelos Formation consists of light-gray dolomitic limestones interbedded with chert bands with massive to meter-scale bedding. The Mexcala Formation consists of shales, limestones, and marine conglomerates.
- GUERRERO TERRANE.**- (Late Jurassic-Early Cretaceous) This terrane consists of three formations: The first is the Ixtapan-Teloloapan Sequence that is composed of terrigenous conglomerates, lava flows, and limestones affected by green schist-facies metamorphism. The Acuitlapan Formation consists of interbedded grey green shales and poorly sorted graywackes. The Amatepec Formation is composed of dark-blue, gray to black limestones with bands of white calcite and quartz.
- 16 17** **ALLUVIUM and DEBRIS APRON.**- These youngest basin-filling deposits of the region consist of fluvial, lacustrine, and laharic deposits
- CHICHINAUTZIN FORMATION.**- Represents the youngest volcanic rocks in the area. Consists of a series of scoria cones (e.g., Tres Cruces volcano, Holotepec, etc.) and fissure-vent lava flows (e.g., Tenango) of predominantly basaltic andesitic to andesitic composition. The age of the volcanic centers of the Chichinautzin Formation varies from 38,000 to 8,000 years BP (Bloomfield, 1975) and probably younger.
- NEVADO DE TOLUCA DACÍTC SEQUENCE.**- Consists of the youngest deposits of the Nevado de Toluca volcano. It is complex sequence of pyroclastic deposits that mantle the flanks of the volcano. In the northern part of the volcano, they form coalescent fans while in the southern part they formed elongated channels along NW-SE tectonic basins. This subunit is composed by debris flows, fluvial deposits, two debris avalanches, pyroclastic flows, surges, and fall deposits that have been emplaced approximately during the last 100,000 to 3,500 years.
- NEVADO DE TOLUCA ANDESITIC SEQUENCE.**- (Pleistocene-Pliocene) Older cone-building lavas of the Nevado de Toluca stratovolcano are divided in two sequences. The oldest sequence (2.6 ± 0.2 Ma) corresponds to porphyritic andesites, with plagioclase, clinopyroxene and resorbed hornblende phenocrysts. The younger sequence consists of a series of andesitic porphyritic light-gray lava flows that built up the actual edifice of the volcano. Mineralogically, these lavas are composed of plagioclase, pyroxenes, olivine, and lithic fragments. The age of these lavas was determined by the K-Ar method at about 1.23 to 1.6 Ma. (Cantagrel et al., 1981).
- 11** **CONES AND DOMES COMPLEX.**- (Pliocene) These lava and cinder cones have andesitic to dacitic composition. Many of these volcanic centers present open craters with collapse structures towards the southwest (e.g., Tarasquillo, Las Palomas and Cieneguillas volcanoes). The domes are widely distributed in the area and are strongly fractured and eroded.
- SIERRA DE LAS CRUCES SEQUENCE.**- (Miocene-Pliocene) The Las Cruces Range consists of several andesitic stratovolcanoes roughly aligned in a NNW-SSE direction. This sequence is composed of a complexly interbedded pyroclastic deposits, debris and lava flows, and reworked deposits. Its age spans from Miocene to Pliocene.
- BASAL SEQUENCE.**- (Late Miocene) This sequence predominantly forms the Tenancingo, Desierto del Carmen and Chiltepec ranges. It consists of interbedded dark-gray andesitic lava flows and basaltic breccias that weathered to a reddish color. It has approximate total thickness of about 400 m. A K-Ar date of this unit yielded an age of 7.5 ± 0.4 Ma. (García-Palomo et al., 1999).
- SAN ANTONIO VOLCANIC SEQUENCE.**- (Miocene) Consists of eruptive products of San Antonio volcano. The main edifice of San Antonio is composed of a thick sequence of lava flows overlain by a complex set of pyroclastic flow, surge, and fall deposits with total thickness of about 400 m.

Guzmán, que tienen una forma curvada, y la de la cima del Nevado de Toluca, de color rojizo).

Con la finalidad de realzar la geología y/o geomorfología de la región, se aplicó un operador de divergencia a las tres componentes principales de la imagen por medio de un programa de computadora (Lira y Rodríguez, *ibid*). Los pasos básicos que el algoritmo utiliza para calcular el operador de divergencia fueron los siguientes:

- (1) Se aplica la descomposición en componentes principales a las bandas originales de la imagen multiespectral; las mejores componentes se introducen en el cálculo de la divergencia ya que portan la mayor parte de la información relevante de la imagen, están casi libres de ruido y acelera el proceso de cálculo, mejorando la calidad de los resultados.
- (2) Se considera un cubo de $3 \times 3 \times 3$ voxels (*volumetric picture elements*), de $5 \times 5 \times 5$ y de $7 \times 7 \times 7$. Para un hipercubo de $3 \times 3 \times 3$ voxels, por ejemplo, la asignación es como sigue: el voxel central tiene un factor de peso de 4, los cuatro voxels más cercanos al del centro tienen un factor de peso de 2, y las cuatro esquinas un factor de peso de 1. El voxel central del hipercubo se desplaza sistemáticamente sobre todos los puntos del dominio $D(X^n)$; en cada ubicación del hipercubo se calcula el flujo (Jähne, 1997). Cabe definir que los voxels son elementos de volumen en el mismo sentido que los pixels son elementos de una imagen; es decir, los voxels son unidades tridimensionales de medición.
- (3) El resultado del cálculo del flujo se escribe en un archivo de imagen de salida, aplicando una elongación lineal [de 0 a 255 tonos de gris] al histograma de la imagen de salida.

Se seleccionó la imagen con el cubo de $5 \times 5 \times 5$ para el análisis de texturas ya que realizaba mejor los rasgos que en la de $3 \times 3 \times 3$ y no había tanta degradación espacial como con el cubo de $7 \times 7 \times 7$. Debido a que la imagen de salida aparenta mucha granulosidad, se le puede retocar para efectos visuales por medio de un suavizado con un filtro de media. Los efectos de suavizado son filtros que suavizan la transición y decrementan el contraste al promediar los píxeles vecinos a los bordes bruscos de líneas definidas y áreas donde hay

transiciones de color significativas. El filtro de suavizado aplica una borrosidad uniforme a una imagen, lo que sirve como retoque de fotografías que presentan mucha granulosidad. Este procedimiento se aplicó puramente para efectos de visualización y no se utiliza dentro del procesamiento de los datos, pero si permite distinguir con mayor claridad las zonas rugosas de las planas. En la figura 17 se puede observar el resultado final del suavizado a la imagen obtenida por el operador de divergencia con un hipercubo de $5 \times 5 \times 5$.

En la imagen se pueden determinar las diferencias de textura suaves y rugosas por sus tonos de gris; es decir, las partes más rugosas se verán en tonos blancos o claros, mientras que las menos rugosas se verán en tonos más oscuros o negros. Por ejemplo, la sierra de las Cruces se presenta más blanca que el resto de los elementos mientras que la ciudad de Toluca, que se encuentra ubicada dentro de la planicie aluvial, se observa en gris oscuro. El resto de la planicie aluvial está en tonos de grises con tendencia al oscuro y el volcán de Toluca demuestra su rugosidad en tonos claros, excepto la cima la cuál aparenta menos rugosidad probablemente por la ausencia de vegetación y/o por los achatamientos que usualmente presentan estas estructuras ígneas en su cima. Otra estructura ígnea notoria es el volcán de Tres Cruces (sur-centro), que sobresale en la escena por su diferencia de rugosidad con respecto a las unidades de roca que lo rodean. Las fracturas descritas en la composición a color de los componentes principales también se ven resaltadas notoriamente con tonos claros (especialmente los lineamientos curvos de la parte inferior central de la imagen). De esta manera podemos correlacionar las formas existentes tanto en el mapa como en la imagen digital. Pero, aparentemente, zonas que son bastante planas como los cuerpos de agua (flechas rojas) están representados con tonos claros, indicando una textura rugosa. Lo que sucede con los cuerpos de agua es un caso excepcional y muy específico de los materiales con poca reflectividad, como el agua, lo que se explica de la siguiente manera.

Los sensores del satélite están calibrados para medir el nivel de la señal de reflectividad de la superficie terrestre, siendo la señal de la tierra mucho mayor a la señal del agua. Toda señal tiene ruido; cuando la señal de la tierra es muy grande, el ruido casi no se observa, pero cuando proviene del agua, la señal es muy débil (ya que es más pequeña en términos de la longitud de onda reflejada) por lo que gran parte de lo que se percibe es



Fig. 17: Imagen de texturas de la región resultado de la aplicación de un operador de divergencia con un hipercubo de 5x5x5 y un suavizado. Las zonas brillantes indican mayor rugosidad del terreno mientras que las más oscuras indican planicies. Las flechas rojas señalan los tres cuerpos de agua que siguen el cauce del río Lerma.

ruido. A pesar de que el operador de divergencia se aplica después de un análisis de componentes principales, el cual coloca la información relevante en las primeras componentes y deja al ruido en las últimas, la separación de la información-ruido no es perfecta por lo que los remanentes del bandeo y del ruido electrónico coherente son aún visibles en la textura asociada al cuerpo de agua (Lillesand y Kiefer, 1987). En otras palabras, lo que se ve en la imagen de color blanco es la textura del ruido no la textura física del cuerpo de agua; como la textura del ruido es rugosa, es por eso que se ve clara.

Entre más cristalina es el agua, la señal es absorbida reflejándose una señal muy pobre (se comporta como un cuerpo negro), detectándose entonces la textura del ruido representada por tonos más claros. En cambio, cuando el agua tiene mayor cantidad de sedimentos suspendidos o contaminantes, la señal es más grande ya que son los sedimentos los que reflejan la radiación, por lo que se puede apreciar en tonos oscuros la textura plana real del cuerpo de agua. Resumiendo, cuando se tienen sedimentos suspendidos, se puede ver la textura del agua, pero cuando no se tienen sedimentos entonces se percibe la textura del ruido; esto habla de la capacidad del operador de divergencia para medir variaciones sutiles de textura. De acuerdo con lo anterior, se puede interpretar de la escena que los lagos de Chignahuapan y Lerma (flecha roja) son cuerpos de agua con pocos sedimentos o contaminantes suspendidos, siendo el primero el más limpio (con un tono más blanco), mientras que el cuerpo de agua ubicado al norte de los mismos o puede contener muchos sedimentos suspendidos o se encuentra ya en un alto grado de desecación.

Posteriormente se construyó el mapa de vegetación descrito en la parte anterior obteniendo el mapa de la figura 18. En ellos se pueden apreciar los diferentes estados de la vegetación en la región: las zonas boscosas de coníferas (verde la más densas y amarillas las menos densas) en la parte sur y este de la cuenca, series de campos agrícolas (anaranjado) y áreas deforestadas o de poca vegetación (rojo y magenta). En la planicie aluvial y lacustre, así como en el cráter del Nevado de Toluca se pueden distinguir los cuerpos de agua en color azul marino, algunos de ellos alterados por contaminación y vegetación.



Fig. 18: Mapa de vegetación obtenido por medio de una clasificación con el algoritmo de isodata del modelo de vegetación construido a partir de la composición a color de las tres componentes canónicas. Los diferentes estados de la vegetación se señalan en diferentes colores: Rojo = zonas secas o con vegetación casi nula, Anaranjado = áreas de cultivo o de vegetación baja, Magenta = áreas erosionadas de poca vegetación, Amarillo = zonas boscosas o de mayor vegetación, Verde = zonas boscosas más densas, Azul marino o púrpura = cuerpos de agua

Las imágenes tratadas muestran una zona de un ambiente sedimentario lacustre que forma grandes planicies con suficientes recursos naturales para mantener grandes poblaciones humanas, desde la antigüedad hasta la actualidad. Tanto los abundantes cuerpos de agua como las grandes planicies aluviales ricas para la agricultura son importantes características que permiten al hombre asentarse y crecer social y económicamente. Desafortunadamente, el marco tectónico en el que se encuentra la región es un factor importante de riesgo que debe ser tomado en cuenta por las poblaciones actuales y futuras. Aún así, las ventajas naturales del Valle de Toluca fueron un fuerte motivo que llevó a las poblaciones prehispánicas a asentarse en la región. La subsistencia a través de la explotación de recursos naturales procedentes de los lagos o ciénegas ha sido una actividad importante desde épocas prehispánicas e inclusive prehistóricas, por lo que es lógico encontrar pueblos prehispánicos ubicados alrededor de la zona de ciénegas (como es el caso del sitio estudiado aquí).

La planicie aluvial proveía de amplias extensiones de tierra rica en nutrientes, lo cuál era bueno para el desarrollo agrícola. Por esto encontramos también un gran número de asentamientos precolombinos (cuya habitación permanece en la actualidad). Aunque existía una alta cantidad de pueblos, la cantidad de habitantes explotando los recursos naturales de su época no era tan abundante como en el presente, por lo que su ambiente no se veía tan dañado. Es triste la deforestación a la que se ha visto expuesta la zona por causa del hombre. Actualmente son pocas las áreas que aún conservan su original cobertura vegetal, siendo que tantas otras forman parte del sistema de ejidos o campos agrícolas muchos de los cuales ni siquiera son cultivados. La deforestación a gran escala también ha propiciado una mayor erosión de las topofomas circundantes, cuyos sedimentos son transportados a la planicie y zonas de lagos lo que a su vez provoca que poco a poco sus aguas bajen de nivel y los recursos acuáticos, que en antaño formaban parte de sus medios de subsistencia, se vayan perdiendo.

En las zonas de las sierras circundantes es menos probable que existiera una gran cantidad de poblados prehispánicos debido a las limitantes que su topografía implicaba, aunque si contaban con claros entre las serranías que facilitaban un poco su habitación. Es probable que los asentamientos de esta zona estuvieran principalmente enfocados a la

extracción de recursos forestales, a las funciones religiosas (como Malinalco y Tenango) o al control de las rutas de comercio, aunque las partes más planas de las sierras si pudieron haber funcionado como campos de cultivo. En la figura 15 se pueden observar la localización de algunos sitios arqueológicos conocidos, denotados con triángulos, de la Cuenca del Alto Lerma.

Estudio geofísico del sitio arqueológico de Santa Cruz Atizapan, Estado de México

El sitio arqueológico se localiza dentro de una zona rural en las afueras del pueblo de Santa Cruz Atizapan, al Noroeste de los márgenes del Lago Chignahuapan dentro de la Cuenca del Alto Lerma, y ocupa una área de aproximadamente 1000 x 1000 m. La prospección geofísica se llevó a cabo en la porción norte del sitio (fig. 19) sobre tres montículos observados desde superficie, cubriendo un área de 56 x 95 m. El área reviste gran importancia desde el punto de vista arqueológico dado que se tiene evidencia de la existencia de estructuras en esa zona (topografía y recorrido de superficie); sin embargo, debido a problemas políticos y sociales propios del municipio, no ha podido ser excavada. La única manera de definir que era lo que se encontraba bajo de la superficie del terreno fue por medio de la prospección geofísica. La porción estudiada estuvo, hasta los años 60 estacionalmente cubierta por las aguas del lago; con la extracción de agua por bombeo y la exposición al aire libre de las tierras en la década de 1960, éstas fueron usadas para la agricultura. Finalmente, en épocas recientes, esta propiedad es donada por la comunidad a la iglesia para la futura construcción de dos capillas.

Los montículos se encuentran en una zona que aparentemente en épocas prehispánicas no se encontraba a merced de las inundaciones temporales, como lo estaba la parte sur del sitio más cercana al margen del lago; esto podría indicar la presencia de estructuras pertenecientes a pobladores de una mayor jerarquía social.

Gracias a la facilidad que proporciona el hecho de que el sitio se encuentre dentro de un ambiente rural y lo relativamente plano del terreno, se decidió utilizar en la

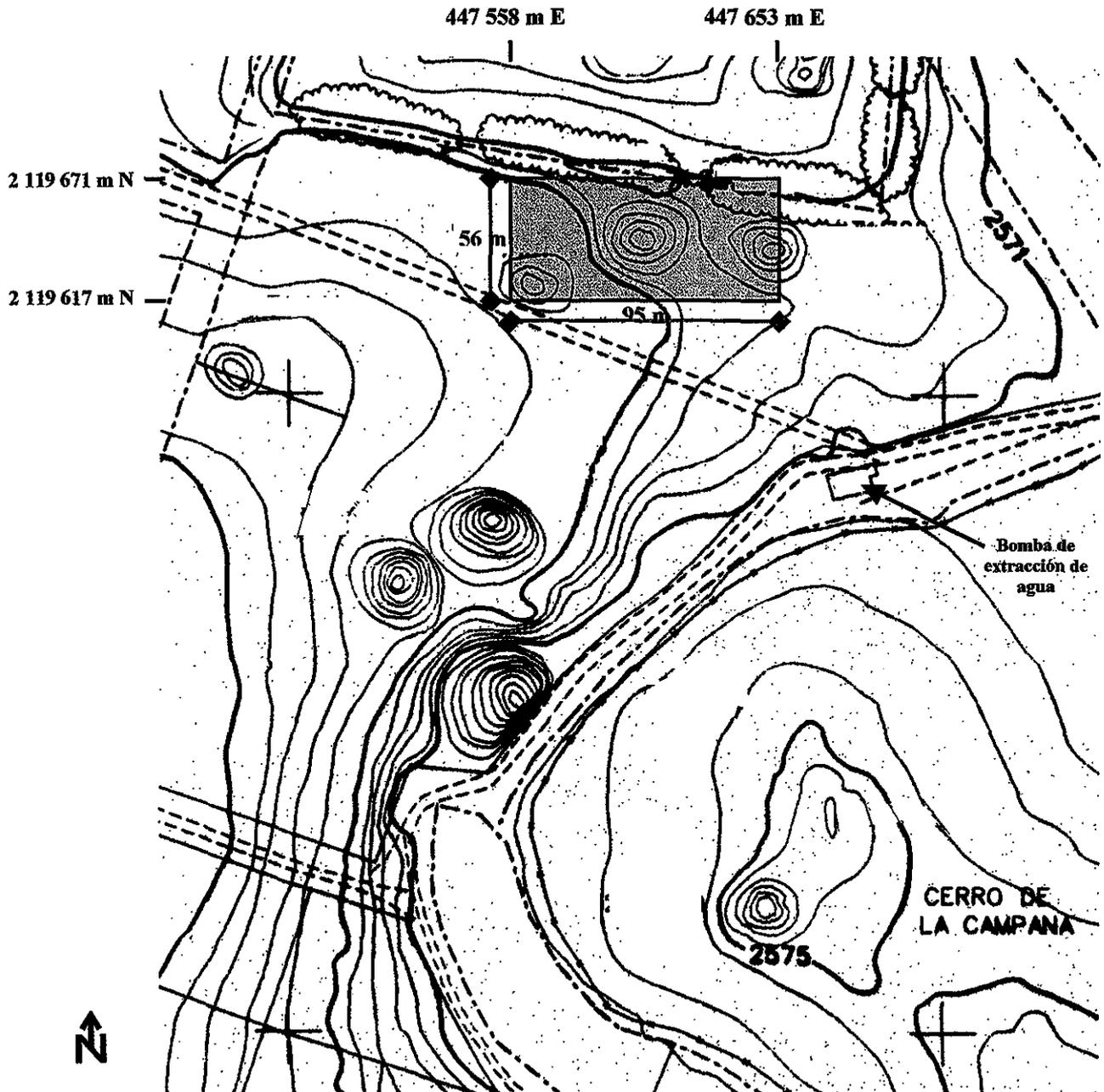


Fig. 19: Porción norte del sitio de Santa Cruz Atizapan. El cuadro anaranjado encierra la zona investigada. Las coordenadas fueron obtenidas en UTM con la ayuda de un GPS con un error estimado de 3.7 m. Al sureste se puede ver el cerro de la Campana, actualmente dentro de una propiedad privada, montículo prehispánico de mayor altura en el sitio y considerado como de mayor valor religioso. Cada curva de nivel representa un cambio de 10 cm en la elevación. La topografía baja hacia el sur-suroeste.

investigación las técnicas de prospección geofísica de magnetometría, radar de penetración somera y tomografía eléctrica. Recolección de datos de magnética y radar de penetración somera se realizó con equipos del Instituto de Geofísica-UNAM; la tomografía eléctrica fue practicada y procesada por la Facultad de Ingeniería-UNAM. Debido a que se deseaba detectar elementos de poco tamaño, como muros, cimientos, pisos, etc, se definieron los espaciamiento entre lecturas de tal manera que se combinar una alta resolución espacial con una mayor rapidez en la prospección. En tomografía eléctrica no se logró esto debido a la falta de tiempo (sólo se contaba con tres días para realizar la prospección). El trabajo de campo fue el siguiente:

- Magnetometría**: la toma de datos fue N-S con el modo de gradiente vertical magnético, usando un magnetómetro de protones ENVIMAG fabricado por la compañía SCINTREX con resolución de 0.1 nT, con un espaciamiento entre líneas de 1 m y estaciones medidas cada 0.50 m realizando un total de 10528 estaciones. El área abarcada fue de 94 x 56.5 m.

- GPR**: la toma de datos electromagnéticos se realizó en transectos de 90 m de largo en dirección E-W; se realizaron 56 líneas con un espaciamiento de 1 m entre cada línea. Se utilizó un equipo Sir 2000 (GSSI) con una antena de 200 Mhz y una ventana de tiempo de 200 ns. Debido al tamaño de la antena (80 cm aprox), se decidió que tal espaciamiento era adecuado.

- Tomografía eléctrica**: se empleó una configuración Wenner-Schlumberger con una distancia entre electrodos de 1m utilizando el equipo STING (AGI); 3 perfiles E-W de 60 m de largo y 3 perfiles N-S de 40 m de largo, con 5 m de separación entre cada perfil. Los perfiles se realizaron sobre el montículo central que por su topografía aparentaba ser el más prominente.

El procesamiento de la información se describe a continuación. En el caso de la **magnetometría** se produjo un mapa del gradiente magnético por medio de la interpolación con el método de kriging de los valores obtenidos en cada estación. De este mapa se calculó la primera derivada direccional con orientación hacia el norte magnético (90°), con el fin de evidenciar más las anomalías y rasgos geométricos de los materiales del subsuelo (fig. 20a).

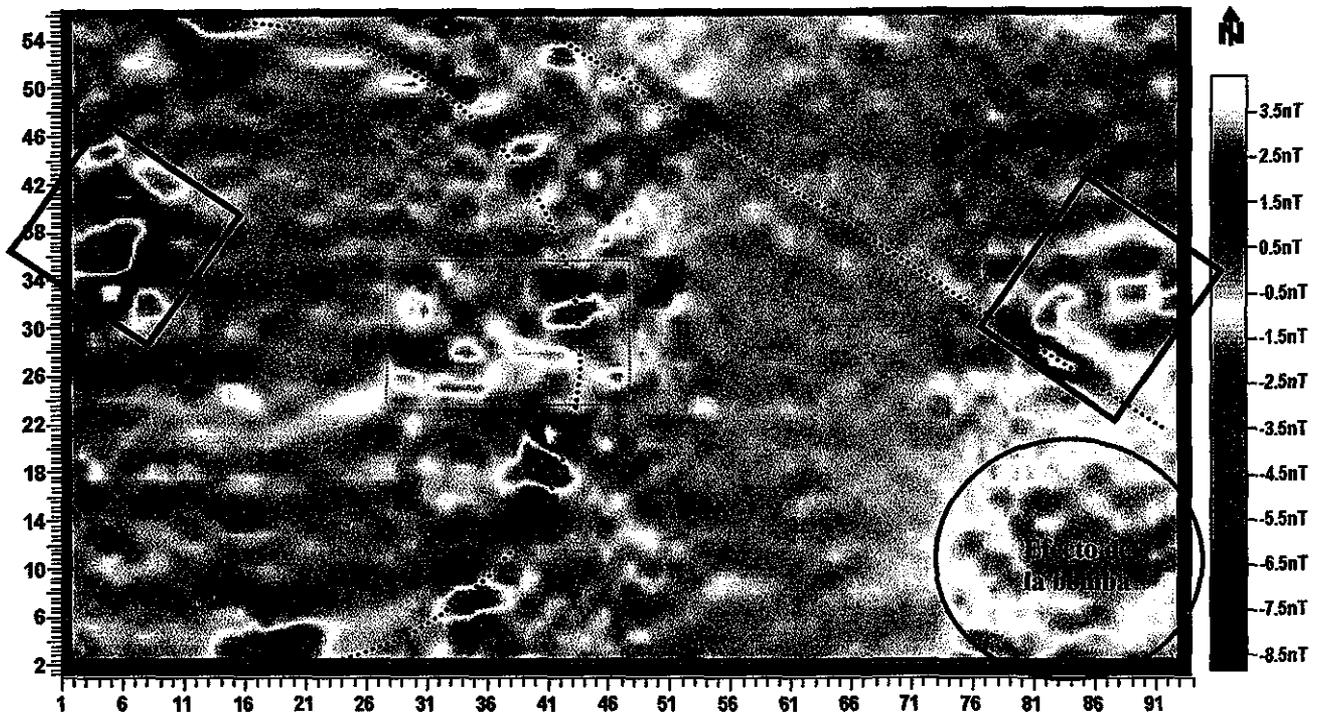


Fig. 20a: Imagen resultante del cálculo de la primer derivada en dirección norte del mapa de gradiente magnético. Los grupos de anomalías grandes se señalan con recuadros y las tendencias con líneas punteadas. El efecto de la bomba hidráulica se denota en la esquina inferior derecha de la imagen.

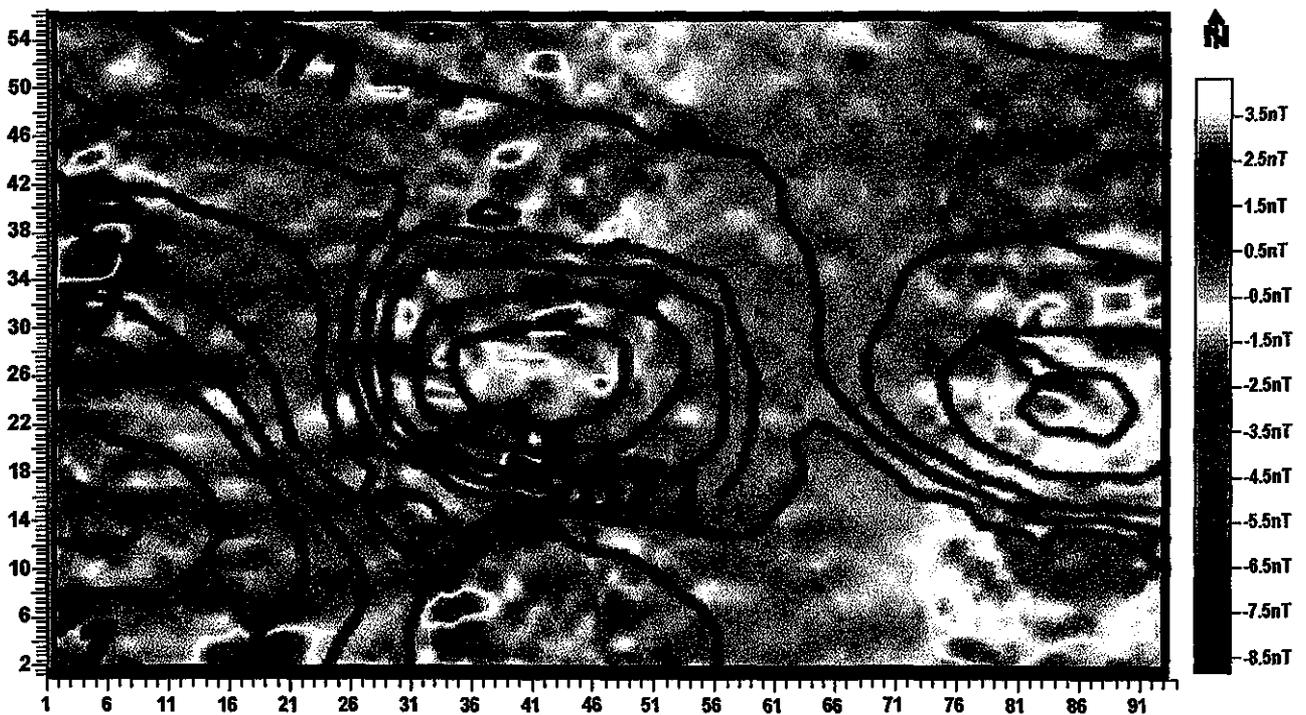


Fig. 20b: Superposición del mapa topográfico sobre la imagen de anomalías magnéticas. Se puede apreciar como coinciden las anomalías magnéticas con las elevaciones topográficas.

En esta imagen se pueden distinguir dos grupos de anomalías principales señaladas con un recuadro de línea sólida, y algunas tendencias marcadas con líneas punteadas. También se puede denotar el efecto que causó la bomba hidráulica sobre un pequeño cuadrante en la esquina inferior derecha, visto en color verde. Al superponer la topografía del área sobre esta imagen (fig. 20b), se puede apreciar la exacta correspondencia entre la ubicación de las anomalías y las elevaciones topográficas, con excepción del grupo de anomalías de la parte superior izquierda de la imagen a las cuales no les corresponde ningún desnivel topográfico. Probablemente debido a que se encuentra en la parte más baja de esa área (ver topografía en la fig. 19). Otra posibilidad es que, conociendo que existían varias etapas de construcción de las estructuras arqueológicas, ese grupo de anomalías corresponda a una estructura de un período anterior al del resto.

La representación resultante fue procesada como imagen digital para obtener una mejor identificación y realce de las anomalías presentes y poder aislarlas de los elementos de menor interés. Para ello se aplicó un filtro pasa bajas en el dominio del espacio, es decir, definido por los cambios en los tonos de brillantez por unidad de distancia para cualquiera parte de la imagen (Jensen, 1986). En la operación de un filtro se genera la convolución espacial de una función de factores de peso, definidos en una ventana, con los valores de los pixels de la imagen. Este proceso consiste en calcular la suma de los productos de los valores de los píxeles con aquellos en correspondencia con los factores de peso de la ventana. La ventana se desliza por todos los nodos que componen la lattice o rejilla de la imagen; en cada posición de la ventana se realiza el cálculo mencionado. Los factores de peso se producen a partir del kernel que define el filtro y son constantes (Lira, 2001). En este caso se utilizó un kernel de 3 x 3, y el cual dio los mejores resultados, para la convolución de bajas frecuencias (Jensen, 1986):

$$\begin{array}{ccc} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{array}$$

Con la aplicación del filtro pasa bajas se eliminaron elementos ruidosos de alta frecuencia, incluyendo parte del efecto de la bomba. Una vez obtenida la imagen del filtro pasa bajas, se aplica una detección de bordes en todas sus direcciones, de forma que realce

los contornos de las anomalías de mayor interés y las aísla del resto del cuerpo de la imagen; así se pueden definir mejor las tendencias de las mismas y agruparlas. La operación de detección de bordes son filtros que acentúan las áreas de contraste y los bordes en una imagen. La detección de bordes en todas sus direcciones realza el contraste entre los elementos brillantes y oscuros al oscurecer la imagen y después iluminar los bordes. Si se desea que la imagen tenga un fondo blanco en vez de uno oscuro, simplemente se obtiene el negativo de la imagen. A la imagen se le aplicó además un filtro de erosión. Esta operación expande los elementos no blancos de la imagen, con lo cual se pueden realzar visualmente mejor las anomalías más pequeñas como las más grandes. Por medio de este procesamiento se obtuvo el mapa de anomalías que se presenta en la figura 21.

En este mapa se pueden identificar de forma independiente los grupos de anomalías y sus tendencias. Aún permanece parte del efecto del ruido de la bomba, aunque la mayor parte fue eliminada. La geometría de los grupos de anomalías marcadas en recuadro sólido es muy similar a la geometría registrada para los elementos arquitectónicos comunes en el sitio denominados *empedrados* (fig. 14). Como ya se mencionó, estos empedrados estaban conformados por conjuntos de rocas careadas de origen volcánico formando una figura cuadrangular o rectangular. Los grupos de anomalías registran a su vez varios dipolos, lo que indicaría la presencia de varios cuerpos magnéticos. Lo anterior lleva a la interpretación de que tales anomalías magnéticas reflejen este tipo de estructuras arqueológicas; el único inconveniente es que, en las zonas de los bordos, éstas estructuras no ocupan un área mayor a los 2 x 2.5 m. En nuestro caso tenemos anomalías de hasta 15 x 13 m, aunque el cuerpo anómalo podría ser más pequeño. Esto se podría traducir como que los empedrados en esta zona (al tener otra función dentro de la sociedad que el área de bordos) fueran de mayores dimensiones o, en su defecto, que se trate de una estructura diferente.

Las anomalías más centrales de la imagen aparentan seguir una tendencia semicircular que posee un diámetro aproximado de 60 m. Esta tendencia puede llevar a varias interpretaciones. Observando el mapa topográfico del sitio (fig. 19), los tres montículos principales del área de prospección se encuentran en diferentes niveles topográficos (con diferencias de 10 cm uno del otro). Esto podría sugerir que éstos túmulos

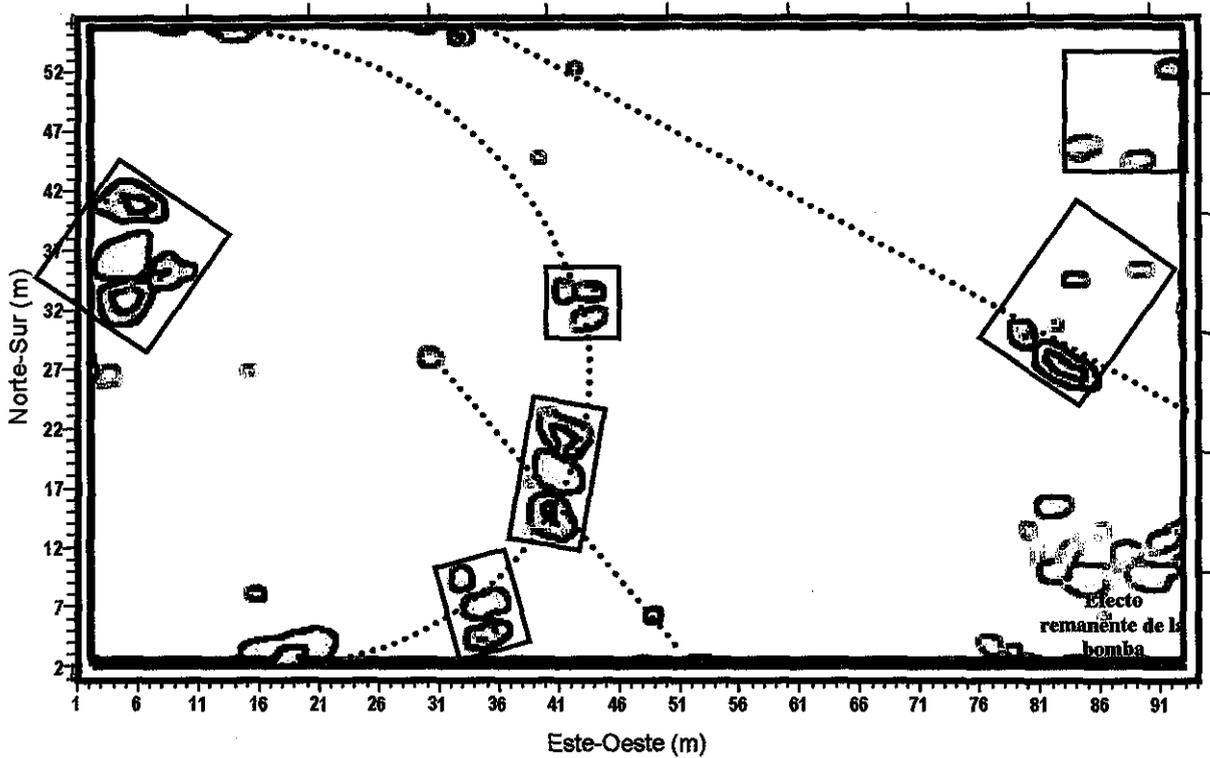


Fig. 21: El mapa de la primer derivada es procesado como una imagen digital, aplicando un filtro pasa bajas, una detección de contornos y una dilatación, de manera de eliminar el efecto de la bomba y aislar las anomalías más importantes del resto del mapa. Las tendencias principales se señalan con líneas.

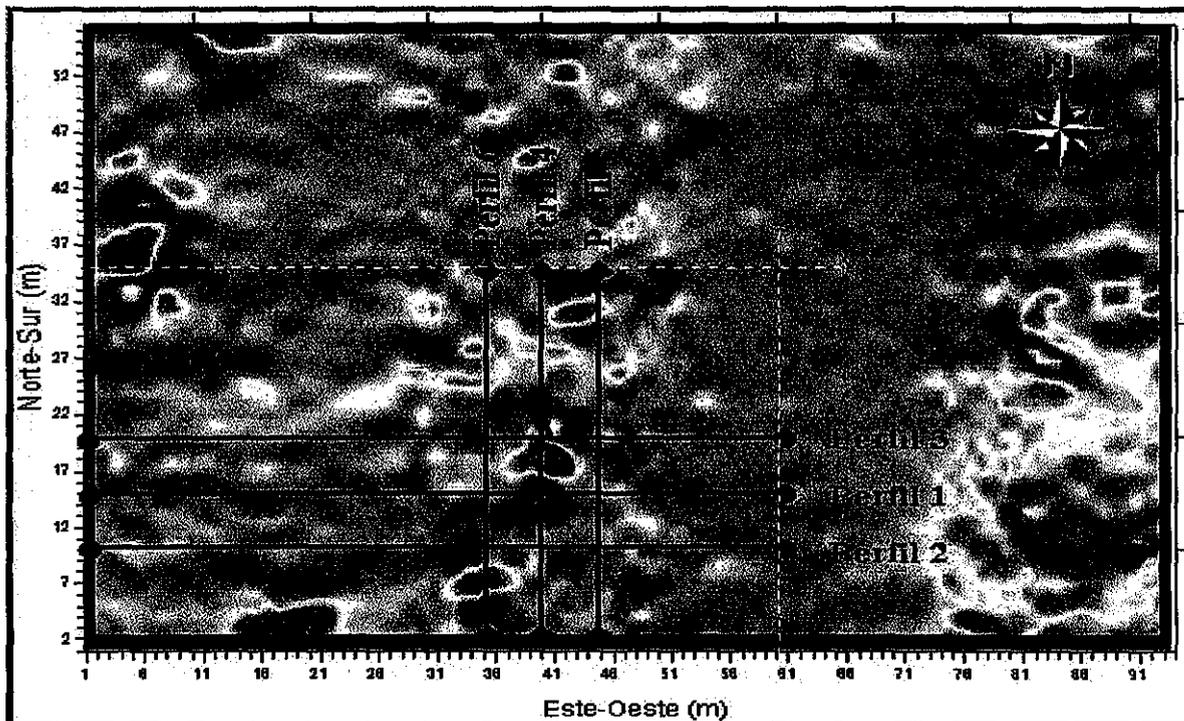


Fig. 22: Ubicación de los perfiles de tomografía eléctrica sobre el mapa de anomalías magnéticas.

podrían estar dispuestos en pequeñas terrazas. Esta tendencia semicircular podría estar representando la curvatura superior de la terraza que divide la estructura central de la lateral izquierda.

En excavaciones de la parte sur del sitio se han registrado estructuras en forma semicircular pero no con un diámetro tan extenso (aprox. 10 m). Esto lleva a pensar en la posibilidad de tratarse de un grupo de estructuras o cimientos de casas formando un conjunto habitacional que rodea un área abierta de posible uso comunal como se registra en las sociedades agrícolas del estado de Hidalgo (*O. Sterpone, comunicación personal*). Su ubicación preferencial en las áreas más lejanas a la zona de bordos del lago, encontrándose en medio de ambas zonas al significativo montículo de La Campana, puede sugerir un rango social de mayor jerarquía al del resto de la población que habitaba los bordos. También se puede interpretar como la zona que se empleaba para la agricultura, ya que corresponde a una posición menos expuesta a las inundaciones temporales de esa época que podrían acabar con los cultivos. De esta misma forma se pueden interpretar las anomalías al Este de la imagen como otro conjunto habitacional que se encuentra separado del primero por una distancia aproximada de 30 m, espacio adecuado para evitar la competencia por el terreno. En el caso extremo de que la anomalía correspondiera realmente con una sola estructura de forma semicircular, podría pensarse que tratamos con una especie de contenedor de las aguas del lago (o dique) que restringiera su paso a una zona de cierta importancia social. Cabe aclarar que en la zona explorada de los bordos no se observaron estructuras con estas dimensiones.

El procesamiento de los datos de **GPR** fue realizado con el programa *RADAN* (Geophysical Survey Systems, Inc). La edición incluyó la normalización de la distancia de todas las marcas, el ajuste de la paleta de color y ajuste de la función de ganancia en todos los perfiles; posterior al filtrado se hizo un recorte de la ventana de tiempo de 200 a 100 ns. Esto debido a que después de los 100 ns no se presentaban anomalías y sólo se registraba ruido provocado por el efecto de la saturación de humedad. En el filtrado de los perfiles se aplicó un filtro FIR (Finite Impulse Response) simétrico pasa bajas vertical a una frecuencia de 275 MHz para eliminar el ruido producido por la saturación de humedad en el medio (la frecuencia de corte se determinó por medio de la observación de las frecuencias

en los perfiles en el osciloscopio). Se aplicó un filtro pasa bajas horizontal con una ventana de 5 trazas para eliminar el efecto nieve y un pasa altas horizontal a 1024 trazas para eliminar las tendencias horizontales continuas. Para determinar la constante dieléctrica, se realizaron pruebas de velocidad con el radar en el medio cavando una pequeña zanja de 1.5 m de profundidad en el terreno e introduciendo un tubo metálico en ella. Se cubrió la zanja y se realizaron varias líneas de 10 m pasando por encima de la zona donde se encontraba enterrado el tubo metálico con el GPR. Al tener controlada la variable de la profundidad y por ende el tiempo, se podía determinar con precisión la velocidad con la que a su vez se puede calcular la constante dieléctrica, con un valor de 10 para este caso. Una vez que se tiene listos los perfiles, se convierten a formato ASCII para ser introducidos al programa SLICER (Fortner Research LLC), proporcionado por el Ing. Jorge Blancas del Lab. de Arqueometría del IIA-UNAM, el cual permite la visualización en 3D de datos volumétricos del GPR.

Se realizó una comparación entre los datos de radar y magnetometría en la misma posición donde se realizaron los perfiles de tomografía eléctrica. De esta manera se pudo comparar los elementos registrados por uno y otro método. Como se habrá notado, los perfiles de tomografía corren tanto E-W (perfiles 1, 2, y 3) como N-S (perfiles 4, 5, y 6), mientras que las líneas de radar corren E-W y las de magnética N-S. Para realizar las comparaciones entre los tres métodos, en algunos casos se utilizaron los radargramas y perfiles reales mientras que en otros se utilizaron interpolaciones de los datos. Por ejemplo, para los perfiles eléctricos 1 y 3, se pudieron utilizar los radargramas originales aunque los perfiles magnéticos eran interpolados. En cambio, en el caso de los perfiles eléctricos 4 y 6, los perfiles magnéticos fueron construidos con los datos medidos en la mencionada línea, pero se utilizaron los datos interpolados de los radargramas a partir de su representación en 3D.

Como se puede observar en la figura 22, los perfiles de tomografía eléctrica pasan por encima de anomalías magnéticas importantes, principalmente en los perfiles 1 y 3 en dirección E-W y los perfiles 4 y 6 en dirección N-S. En los perfiles 1 y 3 de la tomografía (fig. 23a y 23b) se distingue el rompimiento de una estructura continua relativa a los 2 y 3 metros de profundidad. Se observa en el perfil estratigráfico de la zona (fig. 14) la

presencia de un estrato con alto contenido de materiales volcánicos (unidad *UTP*) a esa misma profundidad que se diferencía del resto de los estratos conformados por sedimentos lacustres. Esto sugiere que la estructura registrada tanto en radar como en eléctrica corresponde a un estrato natural que ha sido alterado por medio de excavaciones realizadas por los antiguos pobladores con el fin de edificar o cimentar estructuras arquitectónicas. Comparativamente se puede corroborar que el rompimiento del estrato en los perfiles de radar corresponde con la distancia en donde se encuentran las anomalías magnéticas en los mismos transectos (aproximadamente a los 35-40 m). Las anomalías magnéticas parecen representar la presencia de estructuras arqueológicas mientras que los perfiles de radar y tomografía se identificarían con los pozos o excavaciones realizadas por los antiguos pobladores en el subsuelo con el fin de cimentar tales estructuras. En el perfil 1 (fig. 23a), se puede observar la presencia de una estructura que también se ve reflejada tanto en el radar como en el gradiente magnético. Sus características tanto eléctricas como magnéticas contrastantes, pueden indicar la presencia de un elemento arqueológico. En el perfil 3, dos altos magnéticos se pueden correlacionar con dos sutiles prominencias en los datos de radar, además de que el estrato *UTP* se observa muy adelgazado. Esto se puede interpretar como una posible actividad humana en la que se excava en la tierra para cimentar algún elemento cultural, destruyendo así parte del estrato. El resto del perfil magnético representa la tendencia casi horizontal del mencionado estrato *UTP*.

En el caso de los perfiles 4 y 6 (fig. 24a y 24b) se puede distinguir la misma capa estratigráfica a la misma profundidad aunque con una ruptura más extensa, lo cual se ve relacionado con una porción más amplia de anomalías magnéticas que siguen una tendencia semiparalela a la posición del perfil. Altos magnéticos del perfil coinciden con las reflexiones del radar más someras las cuales también se ven representadas en el perfil eléctrico. Esto es un indicador de la presencia de una posible estructura arqueológica. En cambio, en las reflexiones más profundas del radargrama, las cuales corresponden también con altos resistivos, tienen una tendencia de los valores magnéticos que decrece de N a S. Como se sabe, la topografía de la zona posee una inclinación en esa dirección hasta llegar al lago, por lo que la deposición de los estratos sigue esta pendiente. Esto se puede ver claramente en el perfil estratigráfico (fig. 14), en donde los estratos son más profundos

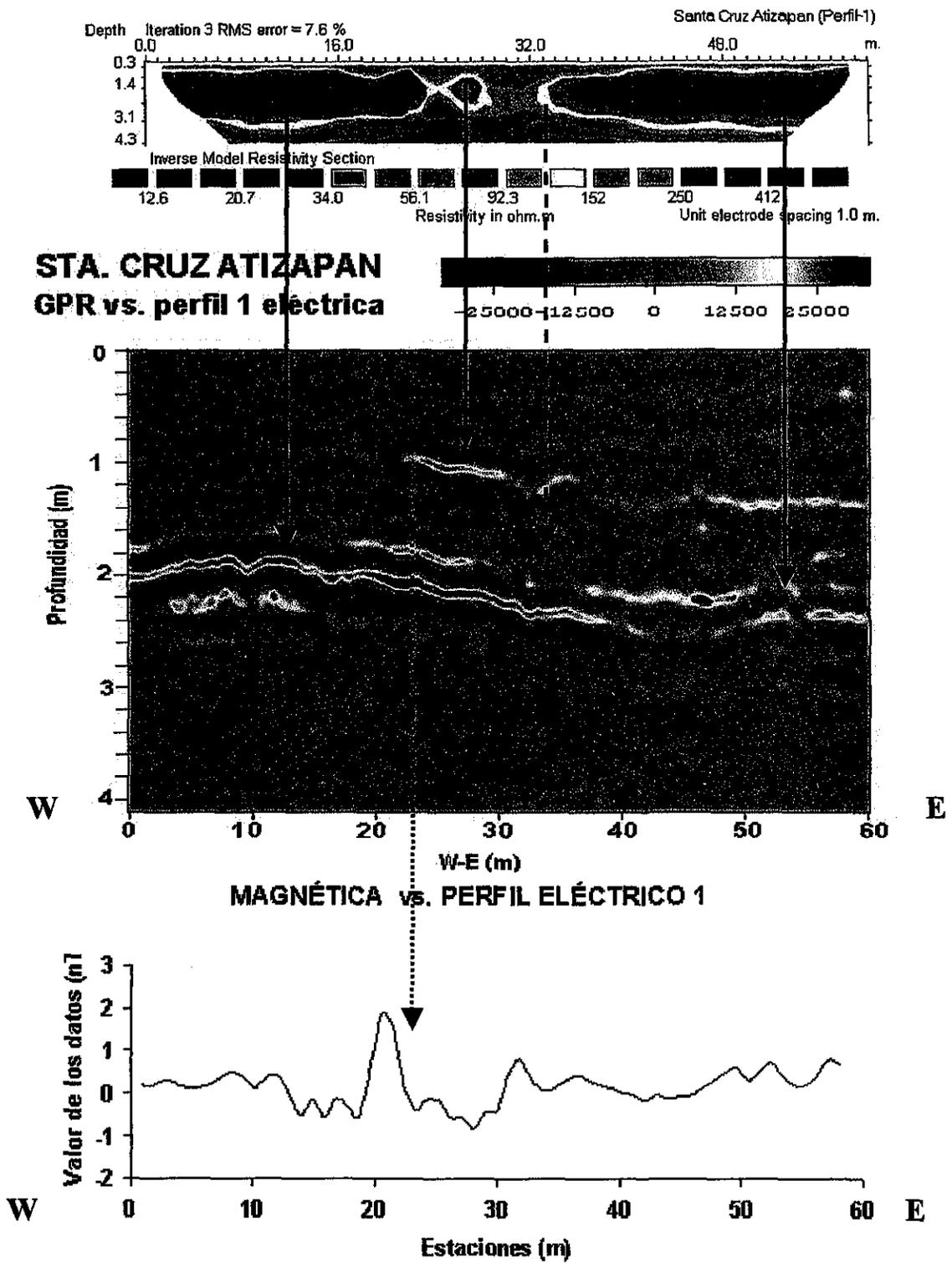


Fig. 23a: Comparación entre los datos eléctricos, EM y magnéticos en la misma posición vertical con dirección E-W.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

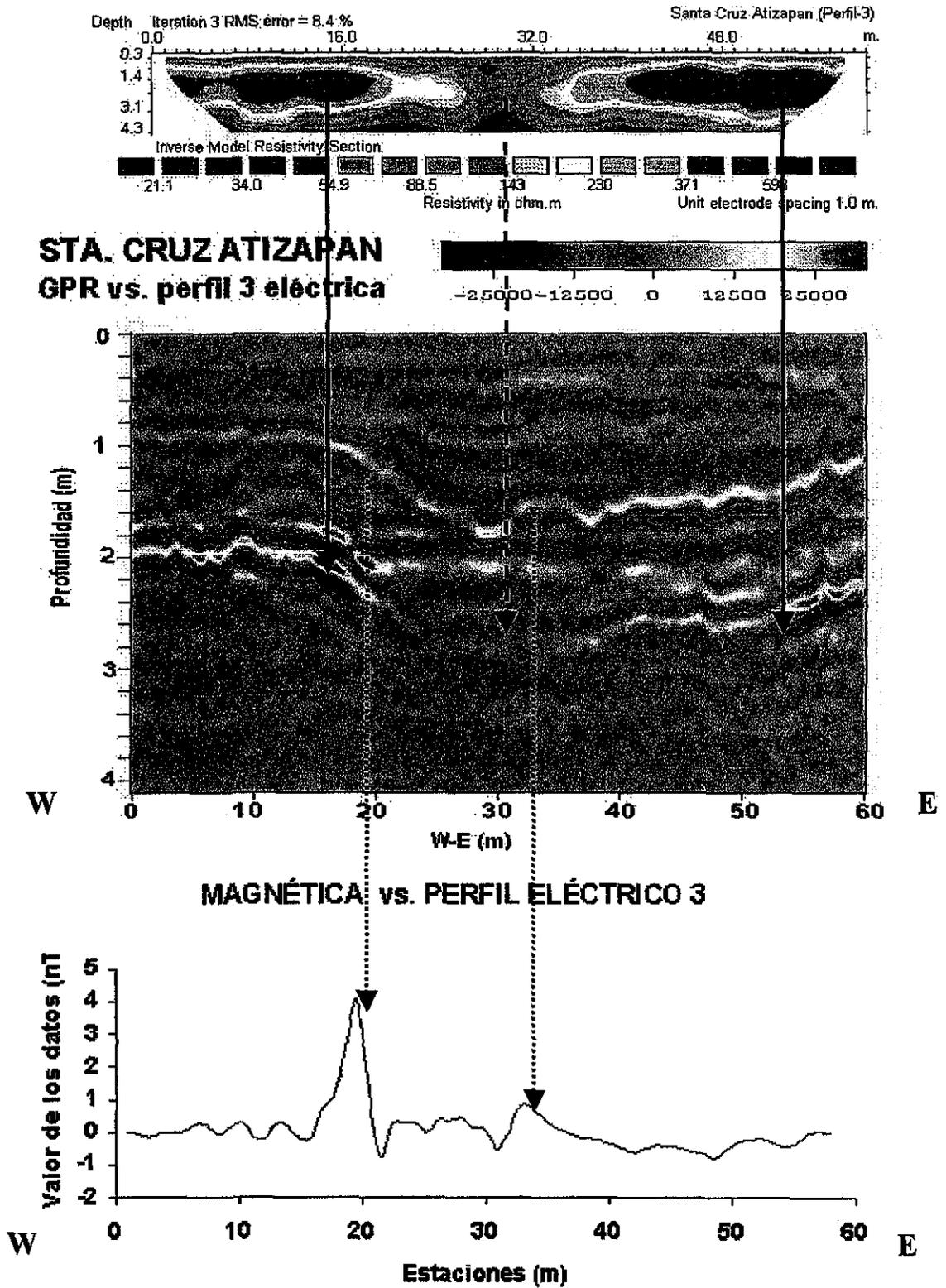


Fig. 23b: Comparación entre los datos eléctricos, magnéticos y de radar en la misma posición vertical con dirección E-W.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

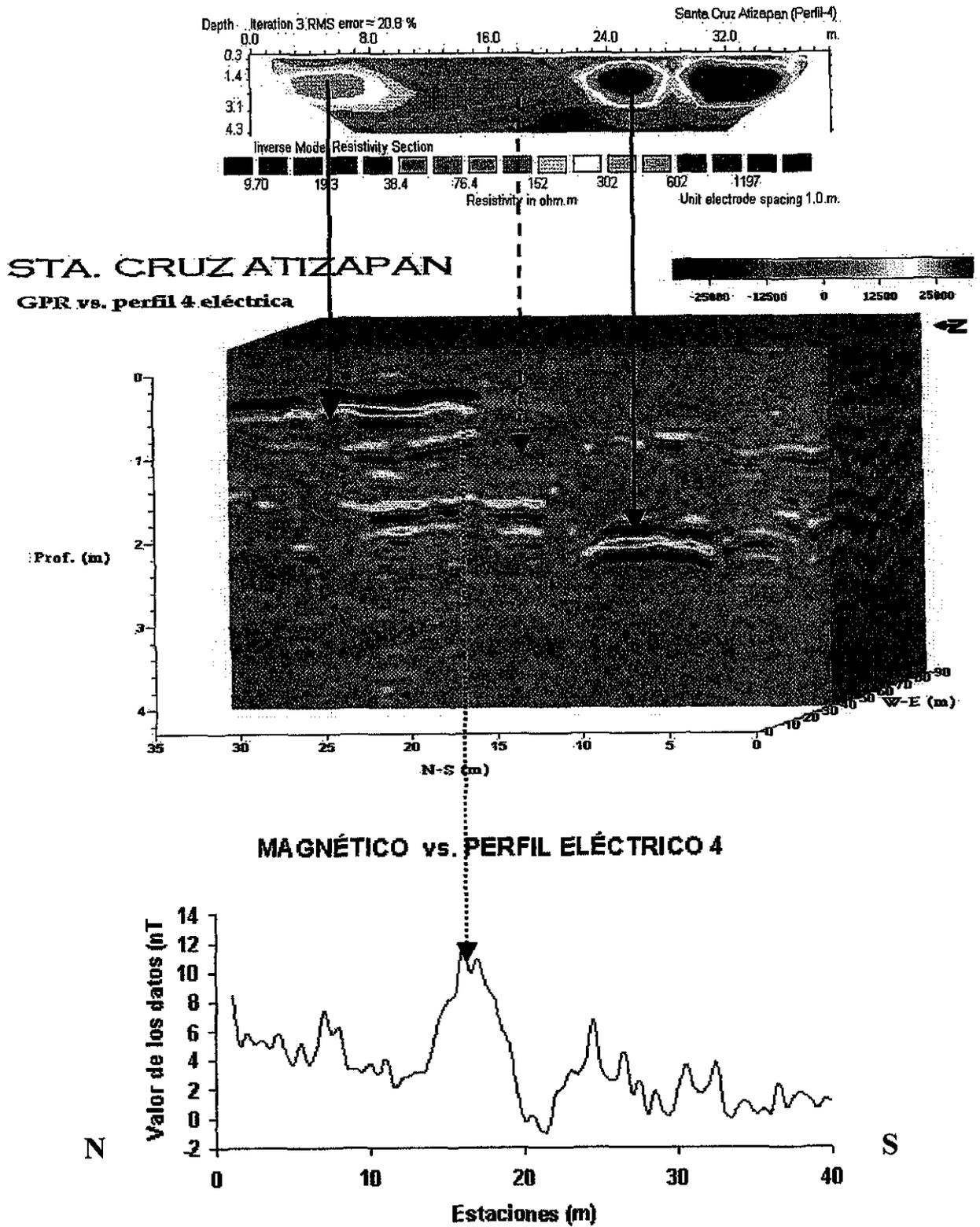


Fig. 24a: Comparación entre los datos eléctricos, magnéticos y de radar en la misma posición vertical con dirección N-S.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

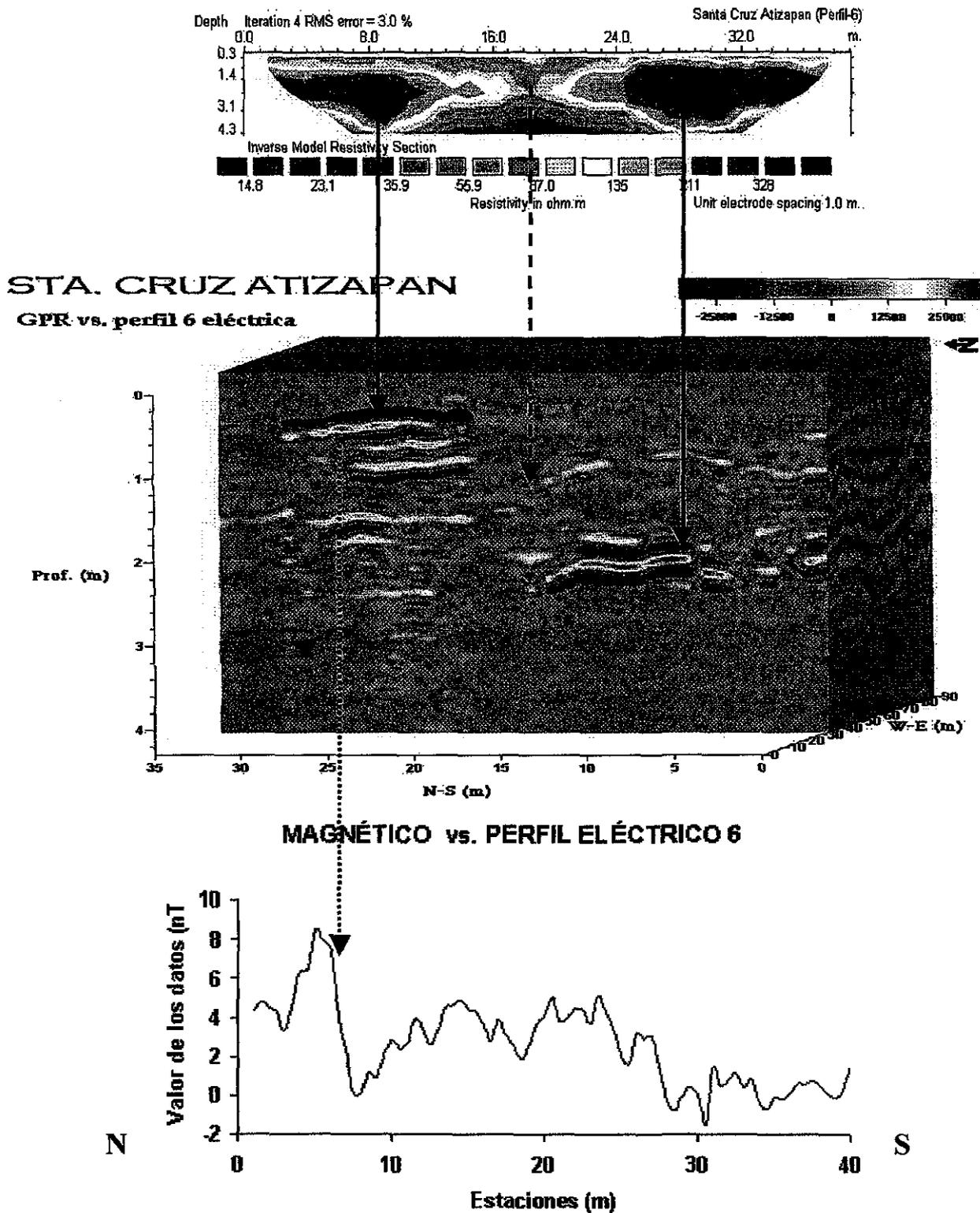


Fig. 24b: Comparación entre los datos eléctricos, magnéticos y de radar en la misma posición vertical con dirección N-S.

hacia el centro del lago. Entonces, esta tendencia decreciente de los valores magnéticos representaría la pendiente del estrato UTP.

Además, se realizaron cortes horizontales a diferentes profundidades (rebanadas de tiempo) para comparar los rasgos observados con la magnetometría con los registrados por el radar. La presencia de anomalías electromagnéticas se observa desde un metro de profundidad hasta los 2.5 m. A partir de los 3 metros prácticamente dejan de detectarse alteraciones en el subsuelo. De acuerdo a lo anterior, se realizaron cortes cada 50 cm de profundidad y se superpuso el mapa de anomalías magnéticas para corroborar correspondencias entre las anomalías (figuras 25 y 26). Analizando dichas imágenes se puede observar que los grupos de anomalías 2 y 3 parecen relacionarse con una profundidad más somera que el resto (a 1 m), lo cual desecharía la hipótesis de ser más antiguas que las demás. Asumiendo que las anomalías de radar alrededor del 1-1.5 m de profundidad pertenecen a la señal producida por estructuras arqueológicas, se puede pensar que el grupo de anomalías 2 y 3 se sitúan a 1m de profundidad, registrándose de nuevo el estrato natural a 1.5 m. Cabe comentar que, con base en lo anterior, lo que aparentemente eran residuos del ruido provocado por la bomba de agua, parecen proceder de estructuras reales. La zanja correspondiente a las estructuras del grupo 1 parece comenzar a 1.5 m, terminando a los 2 m; a los 2.5 m vuelve a aparecer el estrato natural UTP. Se registra cierta tendencia diagonal de la estructura, también vista en el mapa magnético.

El grupo 4 registra un rango de profundidad de 1.5 m hasta los 2 m. Desafortunadamente, la porción norte de las rebanadas de tiempo no se aprecian tan bien como las de la porción sur debido a la creciente conductividad que el terreno presenta (mayor saturación de agua). De acuerdo con los datos de resistencia, la capa de agua se encuentra a una profundidad aproximada de 3.5 m de la superficie. Una limitante fue la baja resolución espacial en z (profundidad) que se le dio en la representación gráfica de la tomografía eléctrica. Debido a esto, se perdió detalle de la profundidad de los elementos detectados (lo cual si pudo determinarse con el radar). Aunque cabe aclarar que en eléctrica generalmente no se puede determinar con precisión este aspecto, ya que lo que se ve representado es un halo de diferencias de resistividad alrededor del elemento detectado

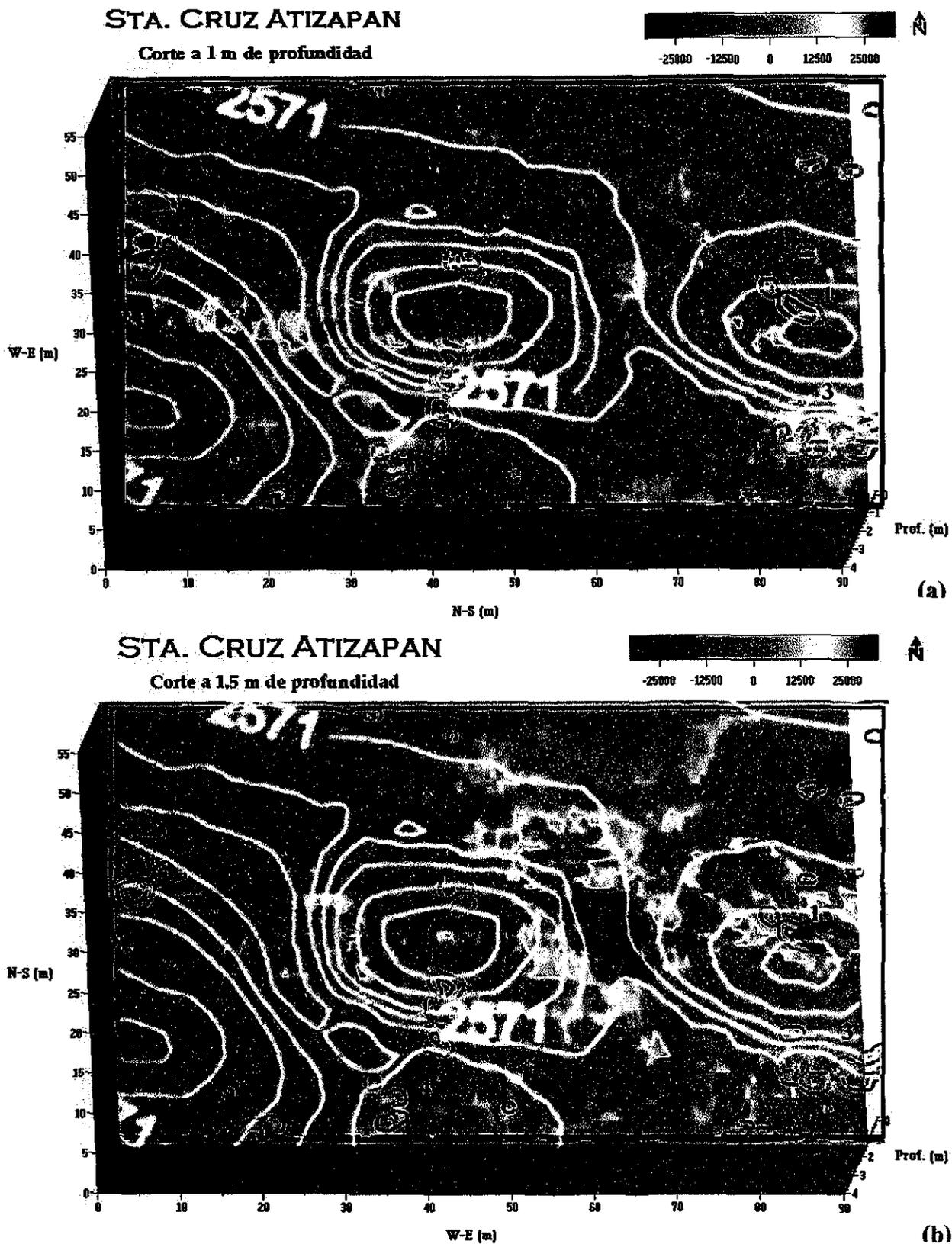


Fig. 25: Comparación del mapa magnético con cortes horizontales de los datos de radar: (a) 1 m de profundidad, (b) 1.5 m de profundidad. Los grupos de anomalías magnéticas están señalados con números

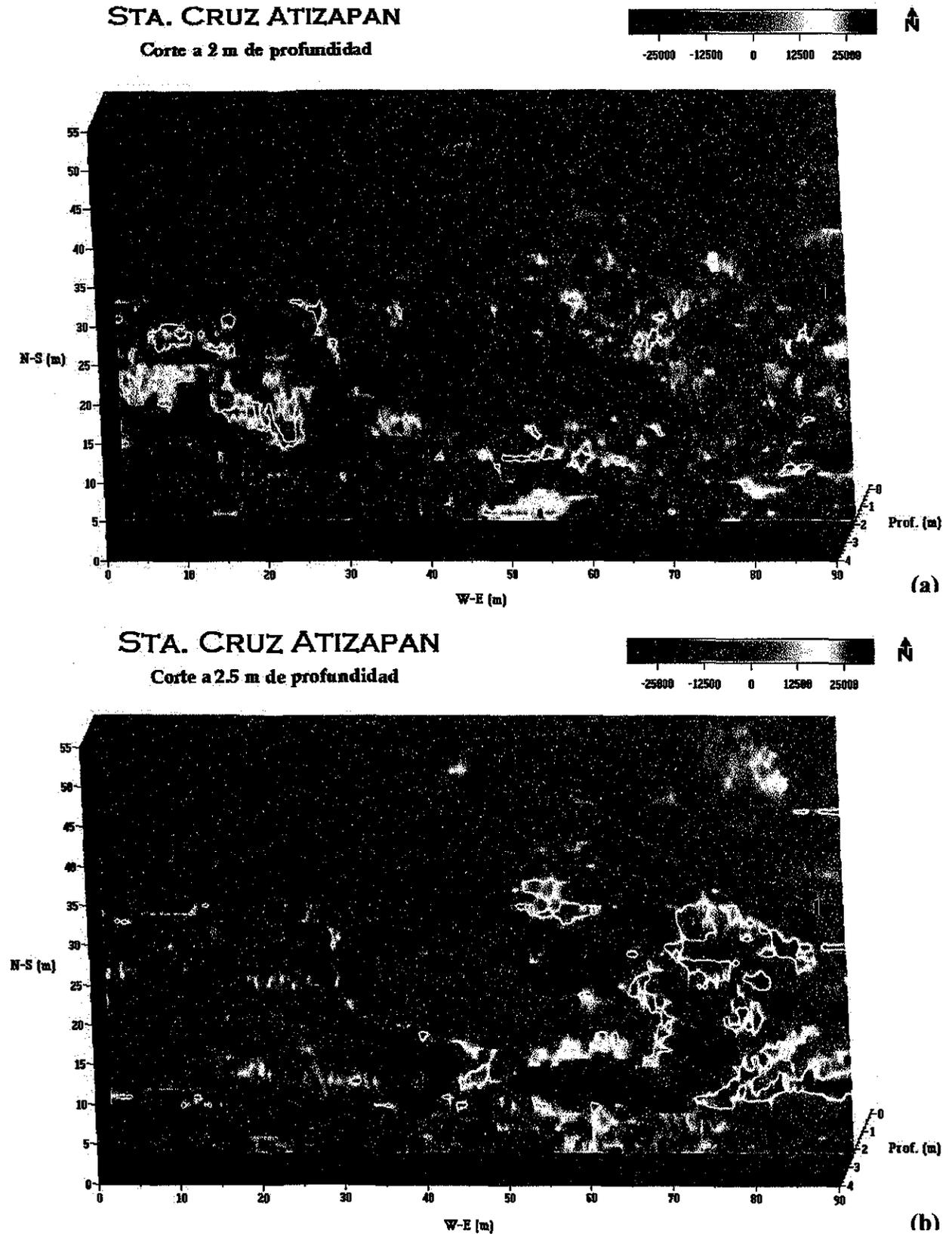


Fig. 26: Comparación del mapa magnético con cortes horizontales de los datos de radar: (a) 2 m de profundidad, (b) 2.5 m de profundidad. Los grupos de anomalías magnéticas están señalados con números.

que no siempre coincide con su posición vertical exacta. Hubiera sido muy valioso haber podido contar con una mayor cantidad de perfiles eléctricos y a un menor espaciamiento con el fin de obtener una representación tridimensional de las estructuras bajo tierra. Aún así, cada perfil analizado individualmente aportó información que pudo ser corroborada con los datos obtenidos con magnética y GPR. El método magnético obtuvo la presencia de las estructuras, el GPR y la tomografía definieron el contexto de enterramiento.

Los hallazgos obtenidos a través de la prospección geofísica permitieron ubicar las posibles estructuras de interés arqueológico así como sus profundidades. Estos datos son de utilidad para la interpretación de la función del sitio de acuerdo a la distribución espacial de sus elementos, y podrían servir de base para futuros rescates del sitio en caso de ser permitidos por la comunidad. Se considera que la interpretación más adecuada, debido a las fuentes y el tamaño de los elementos no registrados en otras zonas del sitio, sería la de un área con una función de tipo agrícola dentro de su sociedad, conformada por conjuntos habitacionales rodeando un área comunal y separados por extensiones de tierra que eran utilizadas para cultivos domésticos. El hecho de tener una distribución o arquitectura diferente a la registrada en las casas de los bordos puede explicarse por las diferentes funciones que ambas áreas realizaban dentro de su cultura (unos extraían recursos del lago mientras que los otros se dedicaban a cultivar). Con todo lo anterior se comprueba la hipótesis de que, con una adecuada estrategia de investigación y conocimiento previo de la zona, la prospección geofísica en sitios arqueológicos dentro de medios rurales (incluyendo aquellos con condiciones naturales difíciles como un alto contenido de humedad) es eficaz y útil en la investigación arqueológica.

CAPITULO III

MEDIO URBANO: PÁTZCUARO, MICHOACÁN

El área específica de investigación se localiza en el atrio del costado sur de la Basílica de Nuestra Señora de la Salud, ubicada al oeste de la ciudad de Pátzcuaro (fig. 27), en el estado de Michoacán. El edificio se ha revestido de gran importancia social, cultural, religiosa e histórica para la población antigua y moderna. Actualmente, la ciudad de Pátzcuaro está declarada como Patrimonio Cultural de la Humanidad ante la UNESCO. El proyecto inicia por el interés de revelar la posible existencia de los cimientos de otras cuatro naves proyectadas en el diseño original para la construcción de la catedral sede del episcopado de Michoacán (Ponce, 2002; Toussaint, 1942), además de probables restos prehispánicos sobre los cuales se levantó el templo.

La ciudad de Pátzcuaro se localiza en las coordenadas geográficas 19°30' N, 101°36' W, a una altura aproximada de 2140 msnm, dentro de una rica cuenca lacustre que lleva el mismo nombre. Se encuentra al sur del lago, y a 64 km al E de Morelia, capital de Michoacán. Es un sitio que ha contenido tanto asentamientos de origen prehispánico, principalmente del período Posclásico (1200-1524 d.C.), e históricos como modernos. Ha sido portadora de los poderes cívico y religioso tanto en época del imperio tarasco como en el virreinato español. Muchos autores han urgido a la pronta recuperación de los vestigios arqueológicos e históricos por medio de la excavación, cuando esta sea factible, o de métodos no destructivos, que permitan la caracterización de estos sitios, cuando no sea posible realizar alteraciones.

De aquí la importancia de utilizar los métodos geofísicos ya que, ante un monumento histórico de alta relevancia como lo es la basílica de Ntra. Sra. de la Salud, no es necesario no causar modificación alguna al entorno al obtener información valiosa que

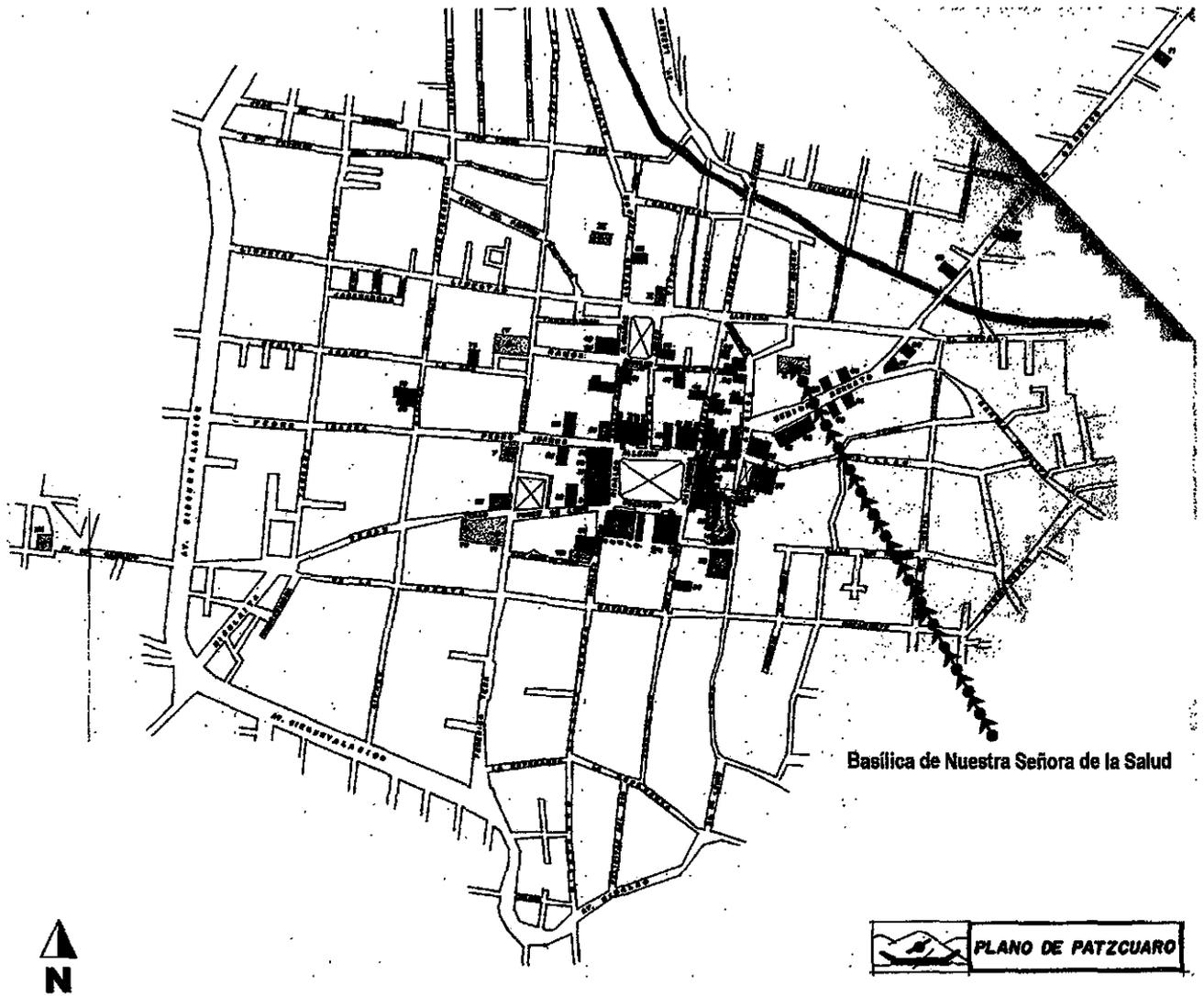


Fig. 27: Plano actual de la Ciudad de Pátzcuaro, Michoacán. Con flechas se muestra la ubicación de la Basilica de Nuestra Señora de la Salud, lugar de la primera catedral de Michoacán construida por orden de Don Vasco de Quiroga en el siglo XVI (plano original de Ramírez Romero, 1986).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

nos ayude a entender el pasado de este lugar. Tratamos con un medio urbano, por lo cual las estrategias de investigación deben variar con respecto a las tomadas en las prospecciones dentro del medio rural; esto debido a que las condiciones varían con respecto a la presencia del ruido ambiental producido por los materiales de construcción humana (cables de luz, rejas metálicas, edificios, etc.). Debido a que en el capítulo anterior se hizo una exhaustiva descripción de la metodología aplicada tanto en el procesamiento de las imágenes de satélite como en los datos geofísicos, en este apartado sólo se expondrán los resultados obtenidos además de una breve introducción al entorno natural e histórico de la región. Dentro de los planeamientos que se hacen en esta última parte de la tesis están:

- Caracterizar a macro escala el medio geográfico de la región de la Cuenca lacustre de Pátzcuaro, Michoacán, por medio de la composición a color de las primeras tres componentes de las 9 bandas del satélite Aster (las especificaciones del satélite se describen posteriormente), un mapa de texturas que delimite las zonas de mayor rugosidad topográfica y las de menor rugosidad, y un mapa de vegetación construido a partir de una imagen en composición a color de las tres componentes canónicas de brillantez, verdosidad y humedad de la vegetación regional.
- Identificar la posible existencia de los cimientos de una nave secundaria de la catedral del primer episcopado de Michoacán, actual Basílica de Nuestra Señora de la Salud, diseñada por Don Vasco de Quiroga en el S. XVI. Determinar la posible existencia de los restos de estructuras prehispánicas sobre las cuales se construyó esta iglesia.

Descripción geográfica de la región

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La región lacustre de Pátzcuaro está conformada por una cuenca cerrada, parte del sistema de cuencas lacustres elevadas dentro del Sistema Volcánico Transversal; los fenómenos de redistribución y reajuste de la corteza terrestre hacen de la región una zona de continua actividad sísmica y volcánica. Tiene una extensión de 1525 km². Está combinada de toposformas de origen ígneo que forman las sierras de Santa Clara y

Tingambato al Sur, la de Pátzcuaro y la Comanja al Oeste, y Tzirate al Norte (Macías, 1978). La cuenca se divide en tres principales zonas geográficas compuestas por las riveras lacustres a 2000-2100 msnm, las llanuras ribereñas de pendientes suaves que varían de los 2100 a los 2500 msnm, y los montes de topografía más accidentada con una altitud de 2500-3000 msnm (Correa Perez, 1979). Sus afluentes principales son los ríos de San Gregorio y Chapultepec, los cuales desembocan al lago en forma de los arroyos de Santa Fe y Soto respectivamente. El nivel del lago no se ha mantenido igual siempre, ha fluctuado mucho desde tiempos históricos aunque en general el lago es poco profundo; tanto así que en 1939 se registró un nivel de 1.20 m de profundidad mientras que en 1941 se elevó hasta los 6.60 m (West, 1948).

Existen en la cuenca una gran cantidad de conos cineríticos y pequeños volcanes que han afectado sus suelos. Cada uno de los tres principales tipos de suelo de la región coincide con una clase de vegetación y una posición geográfica predominantes: (1) suelo café amarillento, de los taludes superiores de las sierras, con bosques de oyamel, (2) suelo de barro oscuro, de textura fina y arenosa, de los taludes inferiores de la sierra con bosques de pino, encino y pastos, y (3) suelo café rojizo arcilloso color "charanda" en las zonas de menor altura comúnmente cubierta por la agricultura de temporal (West, 1948). El clima predominante es templado con lluvias estivales. El índice de aridez es subhúmedo, propio de zonas localizadas en el eje neovolcánico. A principios del siglo XVI, la región contaba con una vasta región de sierras tupidas de bosques, muchos de los cuales actualmente han desaparecido gracias a la mano del hombre. La vegetación se componía de diversas especies según su altura. En la ciénega crecían plantas herbáceas acuáticas como tule y carrizo, los llanos y abanicos aluviales contenían encinos, matorrales, jaboncillo así como cultivos de maguey, maíz, frijol y calabaza; las sierras circundantes al lago tenían en sus faldas bosques de pino y encino, matorrales y plantas pequeñas de varias clases (Correa Pérez, 1978).

El área de la Cuenca contiene más de 100 asentamientos mestizos e indígenas, muchos de ascendencia purépecha, destacando principalmente dos ciudades de origen colonial construidas sobre vestigios prehispánicos: Pátzcuaro y Quiroga. Por su privilegiada

ubicación en la zona de la ladera, Pátzcuaro se ha convertido en la ciudad más importante, la cual ha asumido el control de la región desde épocas prehispánicas hasta la actualidad.

Arqueología e historia de Pátzcuaro

La etimología de Pátzcuaro proviene de la voz purépecha *petáhzacua* o *petahzácuaro*, que significa lugar de cimientos para *cues* o templos, aunque su nombre original era Tzacapu-Hamacutín Pátzcuaro o lugar de alegría ya que se consideraba como el lugar de recreo de los nobles tarascos (Ramírez Romero, 1986). Siendo esta cuenca un lugar propicio para el asentamiento humano, con ricas planicies aluviales buenas para la agricultura y abundante flora y fauna acuática y terrestre, se vio paulatinamente ocupada por distintas migraciones de cazadores y recolectores que gradualmente fueron pasando a la etapa agrícola. La migración más importante de chichimecas se dio entre el 900 y 1200 d.C. proveniente de Zacapu, los cuales se mezclaron con los pobladores ya establecidos de la región. En el siglo XVI, el rey Tariácuri inicia uno de los movimientos más grandes de unificación de muchos los pueblos ribereños, lo que da base al gran imperio tarasco. Con el tiempo, su poder va aumentando hasta alcanzar un alto desarrollo político, militar y económico (Ibíd.). Una vez sometidos, todos los pueblos de la cuenca, fundan su capital y sede del gobierno en Tzintzuntzan desde la cual establecen un control sobre la región y empiezan a conquistar áreas fuera de ella. Sus principales enemigos eran los mexicas contra los cuales mantuvieron una continua rivalidad y fuertes enfrentamientos.

Tariácuri dividió su señorío en tres partes: el pueblo de Ihuatzio, el pueblo de Tzintzuntzan y el pueblo de Pátzcuaro. A cada uno de los pueblos les correspondía un Señor, los cuales formaron los tres señoríos de este imperio representados cada uno con los colores rojo, verde y blanco respectivamente (E. Soto, *Cronista de Pátzcuaro, comunicación personal*). Turátame, hijo de Tariácuri, incendió Pátzcuaro en una de sus tentativas por usurpar el poder pero es vencido por este último quien reconstruyó la ciudad en 1362 (Fernández, 1936). Aunque Tzintzuntzan era el centro del gobierno civil, Pátzcuaro constituía el centro religioso dentro del cual se levantaba el altar a Curicaveri

(dios principal de los tarascos controlador de las fuerzas de la naturaleza) fundado por Tariácuri en 1324 (ibíd.).

Los centros ceremoniales se localizaban sobre una plataforma elevada, a media altura de una ladera, mientras que el grueso de la población se asentaba en las partes más bajas de la ladera. Así, desde un punto exterior al perímetro habitado, el conjunto religioso dominaba visualmente la zona. Al situarse a media altura, las partes más altas de las laderas servían de protección a los monumentos religiosos (Ramírez Romero, 1986). Pátzcuaro tenía su centro ceremonial localizado en donde hoy se levanta la basílica y contaba con una plaza antigua, de mayores dimensiones a la plaza actual, que manejaba la concepción radial del espacio. Exploraciones arqueológicas recientes han mostrado evidencia de que este centro religioso se prolongaba hasta la actual iglesia de los jesuitas, que sirvió como catedral provisional a la llegada del primer obispo, la cual también sustituyó un templo tarasco construido sobre una plataforma (*Oliveros A., comunicación personal*).

La localización de la ciudad de Pátzcuaro corresponde al acceso natural a la zona lacustre y, por lo tanto, a la visión indígena del control de los productos agrícolas y pesqueros de la zona. Probablemente este fue el motivo principal que movió a don Vasco de Quiroga a trasladar la capital de Tzintzuntzan a Pátzcuaro, sin hacer ninguna corrección a la traza original de la ciudad (Ramírez Romero, 1986). La red de caminos de acceso, de origen prehispánico, tiene un trazo radial con respecto al centro ceremonial que se sobrepone a la retícula urbana (Chanfón, 1994). El trazo actual de la ciudad (fig. 27) mantiene una tendencia basada en el sistema de lotificación indígena, posteriormente adoptado por los españoles, en donde no se aprecian ejes de simetría y las intersecciones de calles y la subdivisión en lotes revelan una tendencia no muy clara de perpendicularidad. Se cree que en la plaza de Don Vasco se ubicaba el antiguo mercado indígena.

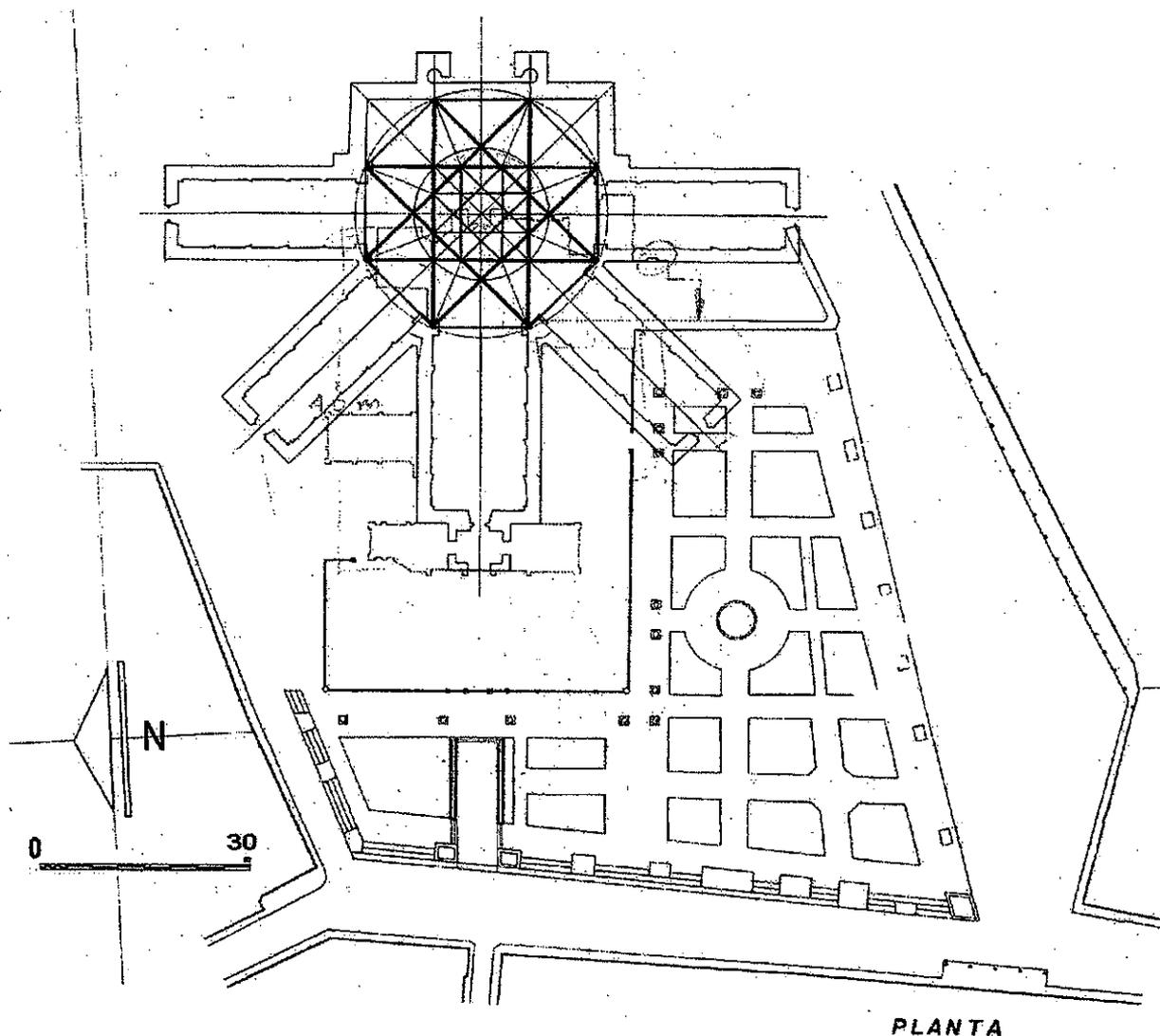
La ciudad contaba con manantiales naturales que se encontraban en la ladera, detrás del antiguo recinto ceremonial, desde donde descendía hacia la población. Cuatro de las cinco fuentes antiguas construidas en la época virreinal se ubican al pie de la ladera que baja del antiguo recinto. La región lacustre de Pátzcuaro se encontraba agrupada en poblaciones próximas entre sí, lo cual sirvió de gran ayuda a los frailes franciscanos al

momento de la evangelización, ya que no tenían que fundar nuevas ciudades ni ampliar su radio de acción para llegar a realizar su labor.

En 1522, Tzintzuntzan es penetrado por el español Cristóbal de Olid. Desde las primeras incursiones españolas a territorio purépecha se había reconocido a Tzintzuntzan como capital, y es aquí donde se asientan las primeras misiones franciscanas y fundan los primeros templos cristianos ese mismo año. Cortés la toma como capital de la provincia de *Mechuacan*. En 1538, el Papa Paulo III designa a don Vasco de Quiroga como primer obispo de Michoacán en Tzintzuntzan, ciudad en la cual permaneció la sede episcopal por poco más de un año. Para 1540, don Vasco decide trasladar su nueva residencia a Pátzcuaro, supuestamente por cuestiones de una mejor ubicación geográfica. Es de esta manera que Tzintzuntzan pierde importancia social, política y económica dentro de la cuenca, mientras Pátzcuaro la gana (Ramírez Romero, 1986). Sus funciones como capital son muy breves ya que en 1580 la corona española traslada el poder civil y eclesiástico a la ciudad de Valladolid, actual Morelia. Lo anterior provoca un abandono masivo de los habitantes españoles de Pátzcuaro y sus comarcas, contando en 1589 con tan sólo 40 españoles en la ciudad (López Sarrelangue, 1965).

Con el fin de asegurarle a Pátzcuaro una supremacía como capital de la provincia, Vasco de Quiroga inicia la construcción de una serie de instituciones necesarias para el buen funcionamiento de su diócesis, entre las cuales estaba el diseño de la que debió haber sido la gran catedral de la sede episcopal. El proyecto original fue del mismo Vasco de Quiroga, asesorado en inicio por la gente indígena y posteriormente por el arquitecto Toribio de Alcaraz (Toussaint, 1942). El antiguo recinto ceremonial utilizado por don Vasco, para emplazar su catedral, conservó sus características prehispánicas de centro religioso y dominio visual sobre el grueso de la población, aunque sus dimensiones originales se ven reducidas (Ramírez Romero, 1986). La catedral se empezó a edificar a partir de 1540; pero los avances del diseño original, incluyendo el desplante de los muros y más de 50 pilares, continuaron sólo por 30 años más.

La catedral original tendría entonces una planta pentagonal dejando ángulos de 45° entre sí (fig. 28) en forma de *mano abierta*, donde cada “dedo” representaría a cada una de



(Posición de la Catedral en la actual Plaza de la Basílica). Haciendo coincidir la nave actual de la Basílica, con los datos que se conocen sobre el proyecto de la Catedral, vemos lo que hubiera abarcado. Así puede verse que la nave inicial de 120 pies, se alargó en la Basílica actual, al espacio de la torre adosada al frente, que tenía 40 pies más.

PLANTA DE LA CATEDRAL DE DON VASCO DENTRO DE LA PLAZA ACTUAL.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Fig. 28: Reconstrucción del diseño original de la Catedral de Don Vasco de Quiroga, superpuesto a la actual Plaza de la Basílica, en donde se define la ubicación de los cimientos de las otras cuatro naves. Una mayor descripción del plano se encuentra dentro de la figura (Ramírez Romero, 1986).

las cinco razas del mundo suponiendo el deseo de atraer a todos sin distinción (*E. Soto, comunicación personal*). El presbiterio sería el punto central donde convergerían las naves de modo que permitiera la visión hacia el altar desde todos los puntos (Chanfón, 1994). Aunque la proyección de los cinco edificios catedráticos está bien documentada, poco se sabe de su verdadera construcción. Los datos documentales mencionan que los trabajos fueron iniciados por constructores indígenas; en 1545 Toribio de Alcaraz ordena sólo algunas correcciones y en 1552 se hace totalmente responsable de la obra. Los cimientos estaban desplantados sobre tierra rocosa muy compactada propia de la ladera y parte de una plataforma artificial ya consolidada de piedra baja y tierra de los edificios prehispánicos. Los muros y cimientos, construidos con técnicas indígenas, estaban hechos de mampostería con paramentos de cantería semilabrada muy regular con juntas uniformes y mortero de cal (Ramírez Romero, 1986). Las naves se construirían de diferente anchura siendo la central, de casi 22 m, la más ancha; las dos naves diagonales medirían 13 m de ancho y 10 m las dos perpendiculares. La cubierta de las naves y la bóveda del presbiterio se fabricarían de madera, y sobre la entrada principal del templo se levantaría una torre (Toussaint, 1981).

Existían en la época fuertes reacciones por parte de las autoridades españolas en contra del avance de la construcción, y en 1565 muere Don Vasco sin poder ver la culminación de su obra catedralicia. El proyecto inicial, ya sin la enérgica dirección de su diseñador, es entonces abandonado y sólo se permite levantar la nave principal (la actual basílica es la única parte que se conserva del enorme proyecto formulado para esta catedral). La iglesia fungió como catedral de San Salvador hasta 1580, año en que el segundo obispo de Michoacán don Antonio Ruiz de Morales traslada la sede religiosa a Morelia (anteriormente Valladolid). Desde entonces fungió como la Iglesia parroquial de San Salvador hasta 1883, cuando es elevada al rango de Colegiata de Ntra. Sra. de la Salud por el Papa Pío X. Finalmente, el Papa Pío XI la eleva en 1924 a la categoría máxima de Basílica (Bay, 1930).

La gran actividad sísmica de la región ha afectado continuamente la historia constructiva de esta iglesia, teniendo que ser restaurada y reconstruida en múltiples ocasiones, principalmente en el siglo XIX (Chanfón, 1994). La iglesia actual (fig. 29) tiene una nave rectangular de orientación E-W, cuya fachada principal encara el oeste, con



Fig. 29: Fotografía de la actual Basílica de Nuestra Señora de la Salud, Pátzcuaro, Michoacán

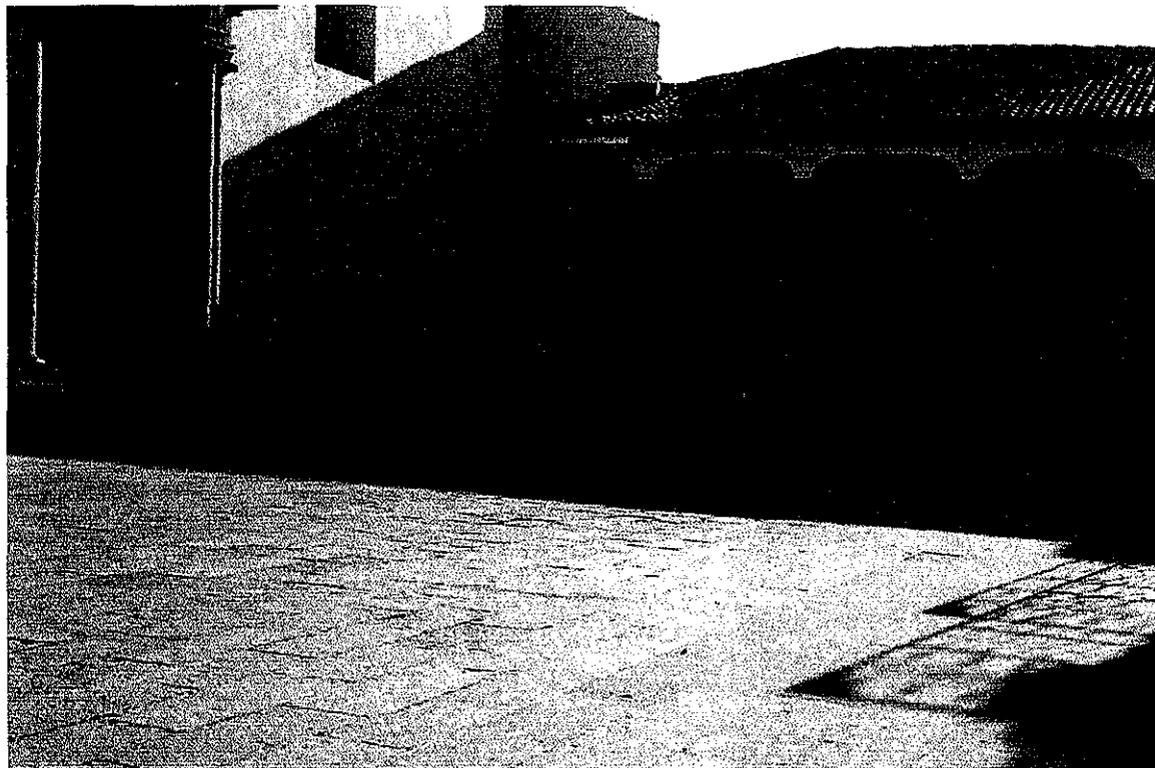


Fig. 30: Fotografía del atrio en el costado sur de la catedral, lugar donde se realizaron los trabajos de prospección geofísica. Al fondo el espacio abierto que precede a las oficinas parroquiales.

ábside semicircular. La sacristía, notaría parroquial y cuartos anexos están acoplados en el costado sur del presbiterio. Al frente y en el costado sur se desplaza el atrio y la plaza. El atrio está limitado por celosía de ladrillo interrumpida por pilares de cantera rematados con perillones y candiles de hierro forjado. En el costado sur se encuentra la portada atrial con rejas de hierro forjado estilo Art Nouveau a eje con la portada lateral de grandes dimensiones del templo. En este costado se aprecian las características constructivas de la basílica como los gruesos muros de mampostería de más de 2 m de espesor (los muros de la iglesia presentan un ancho que varían de los 2.30 a los 2.80, excepto en el presbiterio con muros de 1.80 m de ancho). Hacia el oriente del atrio se encuentra el edificio por el cual se accede a la notaría y oficinas parroquiales; su frente lo conforma un espacio semiabierto con cuatro columnas dóricas de madera. Fue en este costado sur de la basílica (fig. 30) donde se realizaron los trabajos de prospección geofísica, ya que constituía la única área abierta que correspondía con la ubicación de una las naves en dirección diagonal.

Procesamiento digital de una imagen multiespectral de la Cuenca de Pátzcuaro, Michoacán

La imagen multiespectral fue tratada de la misma forma que en el capítulo anterior, obteniendo de esta manera una composición a falso color de las tres primeras componentes principales de la imagen, un mapa de texturas y un modelo de la vegetación predominante regional. Para ello se trabajó con las nueve bandas del sensor Aster nivel 1A, cuyas características principales (tabla 3) son las siguientes:

Tamaño píxel	Zona	Fecha	Píxeles	Líneas
15 x 15 m ²	Cuenca de Pátzcuaro	09/11/2001 14:00:00	2048	1800
Tipo coordenadas	Esquina noroeste		No. Bandas	
geográficas	101°46' W, 19°46' N		9	

Tabla 3: Características generales de la imagen reportada

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Las bandas que se utilizaron del satélite Aster trabajan en la porción del visible y el infrarrojo cercano y medio (VNIR y SWIR). Las bandas SWIR (4-9) tienen una resolución espacial de 30 m el píxel por lo que, con el fin de computar adecuadamente el conjunto de todas las bandas de la imagen, primero se tuvo que remuestrear estas bandas a 15 m cada una. Posteriormente se aplicó una descomposición en componentes principales, obteniendo los resultados de la tabla 4:

	<i>C 1</i>	<i>C 2</i>	<i>C 3</i>	<i>C 4</i>	<i>C 5</i>	<i>C 6</i>	<i>C 7</i>	<i>C 8</i>	<i>C 9</i>
var%	79.03	14.51	5.08	0.39	0.36	0.32	0.15	0.11	0.05
CARGA POR COMPONENTE									
	<i>C 1</i>	<i>C 2</i>	<i>C 3</i>	<i>C 4</i>	<i>C 5</i>	<i>C 6</i>	<i>C 7</i>	<i>C 8</i>	<i>C 9</i>
<i>B1</i>	0.3873	-0.9005	0.1589	-0.0101	-0.0045	0.1300	-0.0000	-0.0000	-0.0005
<i>B2</i>	0.6701	-0.7245	0.0958	-0.0198	-0.0024	-0.1274	0.0008	0.0000	-0.0000
<i>B3</i>	0.5614	0.3740	0.7372	0.0356	-0.0041	-0.0043	-0.0026	0.0016	-0.0012
<i>B4</i>	0.9716	0.2012	0.0034	-0.1310	0.0232	0.0113	0.0077	0.0053	0.0069
<i>B5</i>	0.9868	0.0942	-0.0690	0.0117	-0.0870	0.0057	-0.0011	-0.0847	0.0004
<i>B6</i>	0.9872	0.0765	-0.0929	0.0270	-0.1023	0.0055	-0.0020	0.0529	-0.0005
<i>B7</i>	0.9892	0.0599	-0.0822	0.0228	0.0602	0.0054	-0.0385	0.0002	-0.0504
<i>B8</i>	0.9893	0.0239	-0.0833	0.0597	0.0656	0.0049	-0.0474	0.0002	0.0385
<i>B9</i>	0.9818	0.0337	-0.0770	0.0664	0.0605	0.0054	0.1078	0.0002	-0.0003

Tabla 4: Resultados numéricos de la Descomposición en Componentes Principales de la imagen analizada en IDRISI 32.

Las primeras tres componentes principales acumularon un 98.62 % de la variabilidad de la imagen. Posteriormente, estas se desplegaron en composición a color (rojo=C1, verde=C2, azul=C3) con lo cual se obtuvo el resultado de la figura 31. Esta imagen provee una regionalización a detalle de la Cuenca de Pátzcuaro, en donde se pueden observar sus diferentes elementos. Del lago de Pátzcuaro, ubicado en la mitad izquierda de la imagen, se aprecian sus partes menos profundas con altos contenidos de sedimentos suspendidos y sus partes más profundas hacia el centro. Dentro de él se pueden

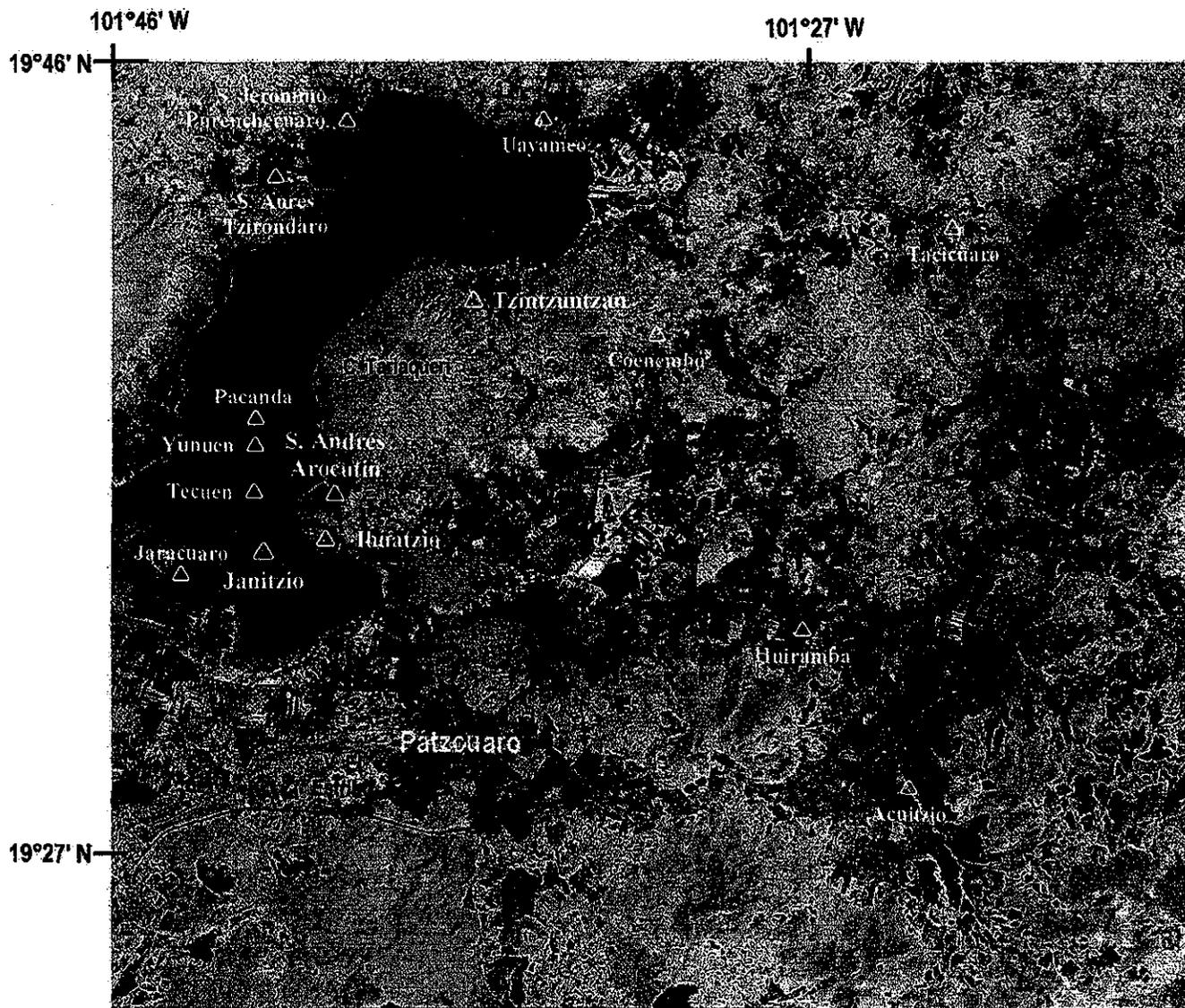


Fig. 31: Composición a color de las tres primeras componentes principales mostrando los rasgos generales de la región lacustre de la Cuenca de Pátzcuaro. En blanco se muestran algunos sitios arqueológicos conocidos, los asentamientos más importantes son Tzintzuntzan, Ihuatzio y Pátzcuaro.

ver cuatro de sus islas más importantes, incluyendo la isla de Janitzio (al sur del lago), la de Pacanda (al centro) y la de Jaracuaro (debido a la regresión de las aguas del lago, éste se observa ya como una península más que como una isla) al suroeste. La zona de sierra, al sur de la imagen (en colores claros), se muestra diferenciada de las partes más bajas (en tonos de magenta) con grandes concentraciones de campos de cultivo. Las laderas medias y bajas se muestran en colores verdes y anaranjados respectivamente. Las zonas conurbanas, como Pátzcuaro y Quiroga, se observan en colores rojizo oscuro. Los trazos de las carreteras también son claros, sobre todo la autopista Uruapan-Morelia localizada al sur de la imagen.

En el mapa de texturas (fig. 32), obtenido a través del mismo operador de divergencia ya descrito, podemos distinguir las partes bajas de las partes rugosas compuestas por las serranías de la región. Los derrames de lavas de algunos conos cineríticos se aprecian mejor que en las componentes principales. Ejemplos de esto son el derrame de un cono cinerítico en el cuadrante NE de la imagen y el de un pequeño volcán en el cuadrante SW. Algunas fracturas también pueden ser vistas, generalmente en tonos claros. Como se puede observar en este mapa, las texturas de la región son mucho más rugosas de lo que aparentan las componentes principales; las partes menos rugosas corresponderían al área del lago y sus márgenes. Otro hecho interesante es el proporcionado por la evidencia de texturas dentro del lago. La brillantez diferenciada dentro de la superficie del lago indica la calidad de agua: las zonas más brillantes indican agua más limpia, las zonas más oscuras señalan las porciones de agua con mayores contenidos de partículas suspendidas o contaminantes. En esta imagen los rasgos geomorfológicos están mejor delimitados que en las componentes principales, por lo que esta imagen sirve de complemento a la primera.

Por medio de la clasificación con el algoritmo de isodata para el modelo de vegetación construido a partir de la composición a color de las tres componentes canónicas (descritas a detalle en el capítulo anterior), se obtuvo el mapa de vegetación de la región (fig. 33). Los diferentes estados de la vegetación se señalan en diferentes colores: Amarillo = bosques de oyamel, Verde = bosques de pino y encino. Morado = zonas cubiertas por agricultura de temporal y/o pastizales, Azul = zonas agrícolas cultivadas, Rojo = zonas



Fig. 32: Imagen de texturas de la región resultado de la aplicación de un operador de divergencia con un hipercubo de 5x5x5 y filtro de suavizado. Las zonas brillantes indican mayor rugosidad del terreno mientras que las más oscuras indican planicies o zonas muy erosionadas. La brillantez diferenciada dentro de la superficie del lago indica la calidad de agua; las zonas más brillantes indican agua más limpia y/o profunda, las zonas más oscuras señalan las porciones de agua con mayores contenidos de partículas suspendidas y/o partes más someras.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

urbanas, de suelo seco o con poca vegetación. Se observa además la presencia de pequeños cuerpos de agua, además del lago, distribuidos en la superficie cubierta por la imagen. Es impresionante ver como los antiguos bosques que cubrían anteriormente a la región (Alcalá, 1988), actualmente se encuentran ampliamente deforestados con fines agrícolas (para campos de cultivo) o para la obtención de los recursos forestales (como la madera). En épocas prehispánicas, los purépechas reconocían la importancia de los recursos de los bosques por lo que existía una persona que supervisaba a todos aquellos trabajadores que guardaban los montes y explotaban la madera (Castro-Leal et al, 1989). Actualmente, son pocas las zonas que aún conservan su cubierta vegetal original.

Estas imágenes procesadas nos muestran una región de gran actividad volcánica y sísmica, con un alto contenido de pequeños volcanes, conos cineríticos, sierras y pequeñas fracturas, que han formado una cuenca naturalmente "fortificada". Este tipo de ambiente fue propicio para el poblamiento de la cuenca por parte de las tribus nómadas procedentes de otros lugares, principalmente alrededor del lago (fig. 31). La abundancia de recursos naturales como agua, madera, flora y fauna acuática y terrestre, hicieron de ella una zona atractiva, además de segura. Actualmente mucha de esta riqueza natural se ha visto destruida por la acción del hombre el cual no ha sabido cultivarla. La gran cantidad de zonas deforestadas están ahora cubiertas por campos de cultivo de los cuales no se obtiene cosecha alguna (como se puede observar en el mapa de vegetación y en el despliegue de las componentes principales), y gran parte del lago se encuentra contaminado por lo que los recursos lacustres ya no son tan seguros. Todos estos recursos alguna vez fueron sustento de muchas poblaciones antiguas, quienes formaron un gran imperio que rivalizó con las grandes culturas de Mesoamérica.

Todo lo anterior nos dirige a pensar en la importancia ecológica y cultural de esta región, la cual fue observada tanto por prehispánicos como españoles lo cual llevó a la fundación de ciudades tan importantes como la de Pátzcuaro. Ella se encuentra ubicada en un sector geográfico privilegiado con acceso tanto a los recursos lacustres como a los terrestres. Ubicada en una zona de fallas tectónicas y actividad volcánica, se entiende por qué la catedral sufrió tantas catástrofes durante el trascurso de su historia. Probablemente, los españoles no conocían este factor a la hora de construir la catedral y posterior basílica,

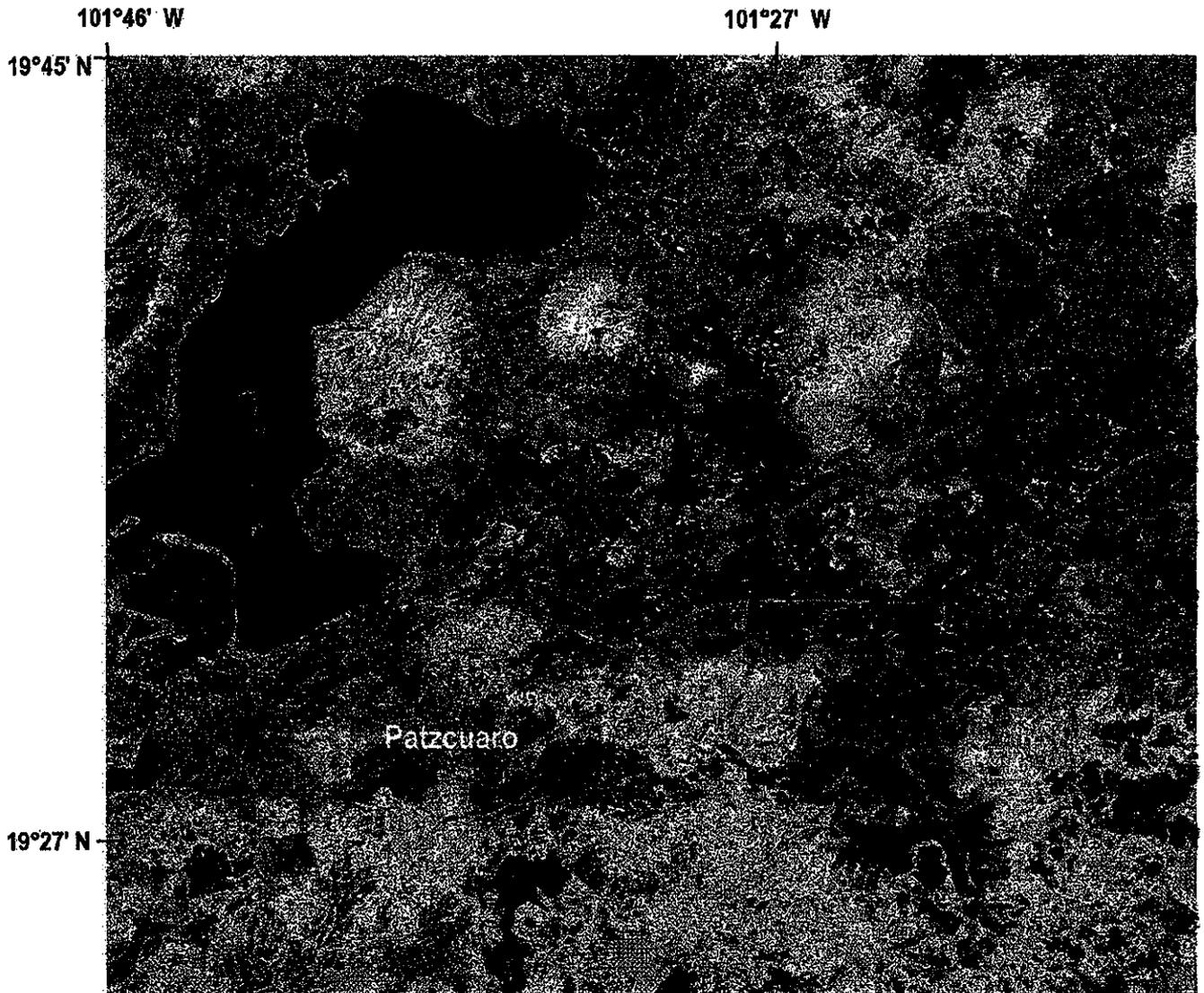


Fig. 33: Mapa de vegetación obtenido por medio de una clasificación con el algoritmo de isodatos del modelo de vegetación construido a partir de la composición a color de las tres componentes canónicas. Los diferentes estados de la vegetación se señalan en diferentes colores: Amarillo = bosques de oyamel, Verde = bosques de pino y encino, Morado = zonas cubiertas por agricultura de temporal y/o pastizales, Azul = zonas agrícolas cultivadas, Rojo = zonas urbanas, de suelo seco o con poca vegetación, Negro = cuerpos de agua.

sino que basaron su ubicación puramente en factores culturales (la superposición de un templo cristiano sobre uno pagano). De esta manera, las imágenes de satélite nos dan una vista sinóptica de la región que permite ubicar a Pátzcuaro dentro de un contexto natural, el cual influyó en gran medida sobre la posición de los asentamientos, antiguos y modernos, que se pueden encontrar.

Estudio geofísico de la Basílica de Ntra. Señora de la Salud en la ciudad de Pátzcuaro, Michoacán

En Pátzcuaro principalmente se han llevado a cabo trabajos de tipo histórico (con bases documentales) que han sugerido la existencia de los cimientos de cuatro naves anexas a la nave central de la actual basílica, formando una planta pentagonal (Ramírez, 1986). Cabe recordar que esta iglesia estaba destinada a ser la catedral de la diócesis de Michoacán en épocas en que el episcopado tenía su sede ahí. La evidencia documental confirma la existencia de los planos originales diseñados por don Vasco de Quiroga en los cuales se muestra la forma pentagonal descrita en la introducción histórica de este capítulo. Pero no se tenían evidencias físicas de que los cimientos de las otra cuatro naves realmente habían sido levantados. Con el fin de comprobar la existencia de estos cimientos, surge la idea de utilizar métodos geofísicos no destructivos que proporcionen la información necesaria para ello (Ponce, 2002).

El primer reto del trabajo de campo fue definir el área apropiada a investigar, dentro del perímetro de la basílica, que dispusiera de las condiciones necesarias para permitir el adecuado funcionamiento de los instrumentos geofísicos. Con la ayuda de los planos originales y fotografías, se localizó un punto en el que coincidía un área abierta con la trayectoria de una de las naves que corrían en dirección diagonal hacia el suroeste (fig. 34). El atrio de la iglesia, en costado sur de la misma, se ubica un espacio abierto con un piso muy plano de laja de cantera; de este se seleccionó un área de 16 x 15 m, sin obstáculos que impidieran el paso de los instrumentos, por donde se esperaba que pasara el trazo del cimiento (fig. 35). El levantamiento de datos magnéticos y de radar se resume de



Fig. 34: Plano del diseño original de la catedral de Don Vasco de Quiroga superpuesto a una fotografía aérea de 1976 de la actual Basílica de Nuestra Señora de la Salud. En esta figura se muestra con exactitud la posición en la que se deberían encontrar los cimientos de la segunda nave (ubicada a 45 ° al suroeste de la nave central). En amarillo se enmarca el área de la prospección geofísica.

la siguiente manera:

- **Magnética:** se uso un equipo SCINTREX ENVIMAG en modo de gradiente: se levantó un total de 28 estaciones, con estaciones cada 40 cm. en 18 líneas de orientación E-W con separación de 80 cm entre cada una.
- **GPR:** se uso un equipo SIR 2000 con antena de 200 Mhz. levantándose 20 líneas con orientación E-W de 15 m de longitud y una separación de 80 cm entre cada línea.

Se seleccionaron los métodos de gradiente magnético y GPR por las condiciones urbanas en que nos encontrábamos. Es decir, al estar dentro de una ciudad, el ruido ambiental producido por la gran cantidad de objetos metálicos y campos eléctricos no permitía el uso de la magnetometría en su modo de campo total. Se contaba también con una superficie totalmente plana que permitía el paso de la antena de radar en transectos bien definidos formando un polígono regular apropiado para el despliegue de los datos en forma tridimensional, además de tener conocimiento acerca de la posición de ductos de drenaje modernos (ninguno de los cuales atravesaba el área estudiada) y la profundidad del manto acuífero (cerca de los 3 m). Todas estas ventajas, además de las proporcionadas por el método mismo para definir variaciones en los estratos o la presencia de estructuras en el subsuelo, ayudaron a considerar a este método como el más eficaz en la consecución de las metas. Ya que no se podía realizar perforaciones en el monumento histórico y el tiempo de estudio con que se contaba era poco, otros métodos (como el eléctrico o el gravimétrico) no fueron contemplados.

En el caso de Pátzcuaro, los datos son procesados por medio del software REFLEX en el cual se les aplica un filtro pasa bandas tipo butterworth con una frecuencia de corte a los 25 y 400 Mhz. Estas frecuencias de corte se determinó con la ayuda del osciloscopio de RADAN donde se puede observar con precisión las frecuencias que no aportan información). Se aplicó un filtro de substracción de la media (*subtract-mean*) y un filtro de promedios móviles (*running average*) para el suavizado de los datos, así como un declipping de 5 trazas para realzar las ganancias. Al igual que con los datos magnéticos en el capítulo anterior, se produjo un mapa de gradiente por medio de la interpolación con el algoritmo de kriging. De este mapa se calculó la primera derivada direccional con orienta-

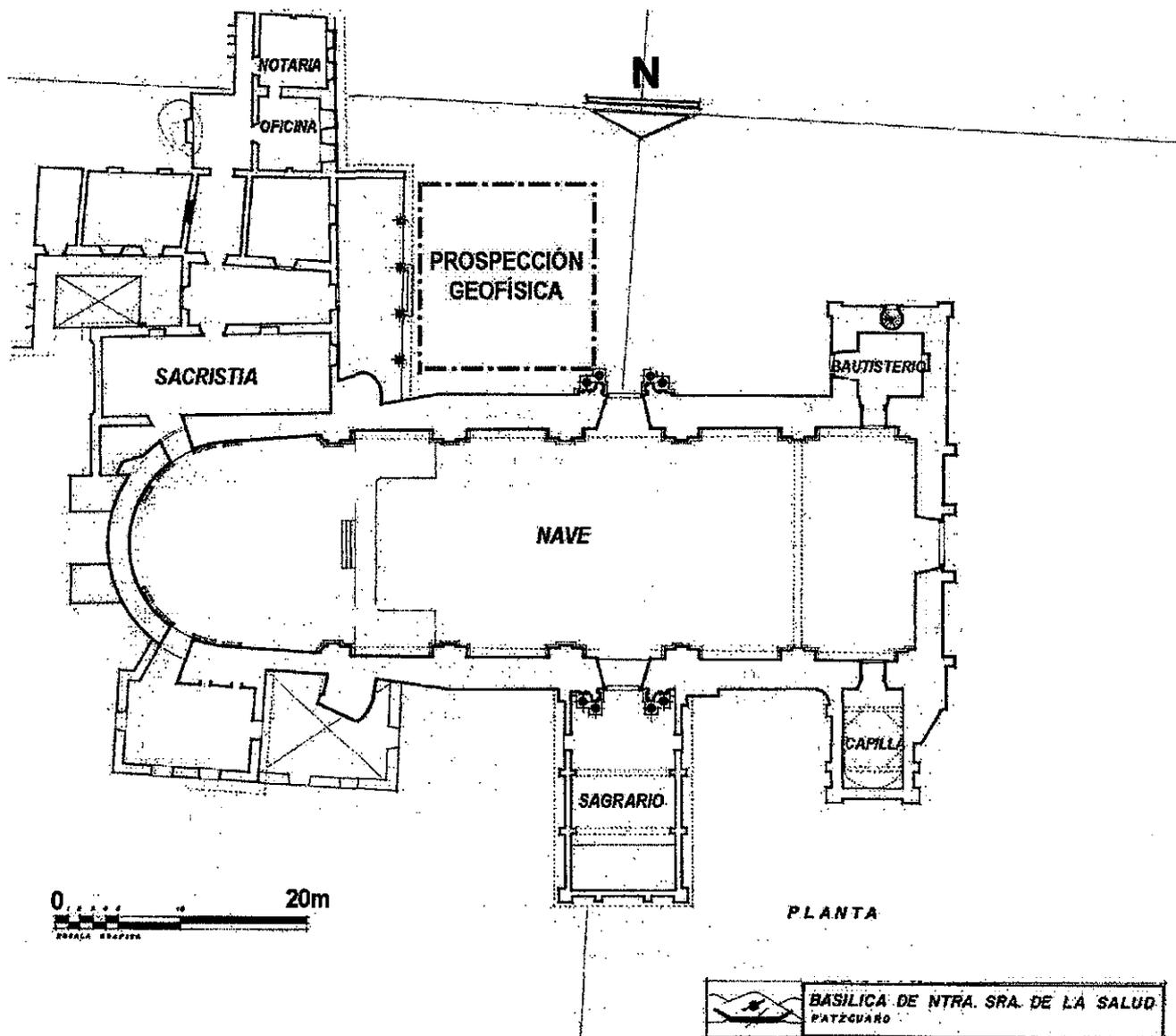


Fig. 35: Plano de la actual Basílica de Ntra. Sra. de la Salud. En rojo se enmarca el área seleccionada para realizar los trabajos de prospección geofísica.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ción hacia el norte magnético (0° en este caso ya que los transectos corrían E-W) con el fin de evidenciar las anomalías y los rasgos geométricos de los materiales del subsuelo (fig. 36a). La imagen resultante fue procesada como imagen digital para obtener una mejor definición y realce de las tendencias de las anomalías magnéticas y aislarlas de los elementos de menor interés.

Para ello se le aplicó un filtro en el dominio del espacio de detección de bordes en todas sus direcciones, de forma que realzara los contornos de las anomalías más importantes y rebajara el resto del contexto. Además se aplicó un filtro de erosión, el cual aumenta las proporciones de los bordes, haciéndolos más visibles. Con el procesamiento anterior se obtuvo el mapa de la figura 36b. En él se pueden apreciar dos tendencias diagonales que corren en dirección NE-SW, las cuales pueden suponerse son evidencia de la presencia de los cimientos de una de las cuatro naves a 45° de la central. Además se visualizan otras anomalías magnéticas en dirección E-W que parecieran formar un piso de piedra. Teniendo conocimiento de que la catedral se construyó sobre un antiguo templo tarasco, podríamos estar observando tal vez parte de su plataforma original.

Para corroborar los hallazgos obtenidos por medio de la magnetometría, se superpuso el mapa magnético sobre cortes horizontales de los datos volumétricos de radar a diferentes profundidades. De esta manera se podría definir las profundidades a las que corresponde cada elemento y determinar posibles temporalidades. En la figura 37a vemos el corte a 25 cm de profundidad, un corte superficial, en donde no podemos definir con precisión tendencias en particular; más bien aparenta una capa de escombros que sirven de relleno y nivelado del piso. A 1 m de profundidad ya se puede observar una tendencia bien definida a aproximadamente 45° del muro de la nave central y con un ancho de alrededor de 2 m, que coincide con la tendencia diagonal sugerida por la magnetometría. Este podría ser un claro indicio de la existencia de los cimientos buscados, ya que su geometría, su contexto y su ubicación coinciden exactamente por las propuestas por los etnohistoriadores (Ramírez, 1986; Ponce, 2002).

Debajo de ellos, a los 2 m de profundidad (fig. 38a), se puede seguir observando dicha tendencia; pero además se observan otras anomalías que coinciden con las del mapa

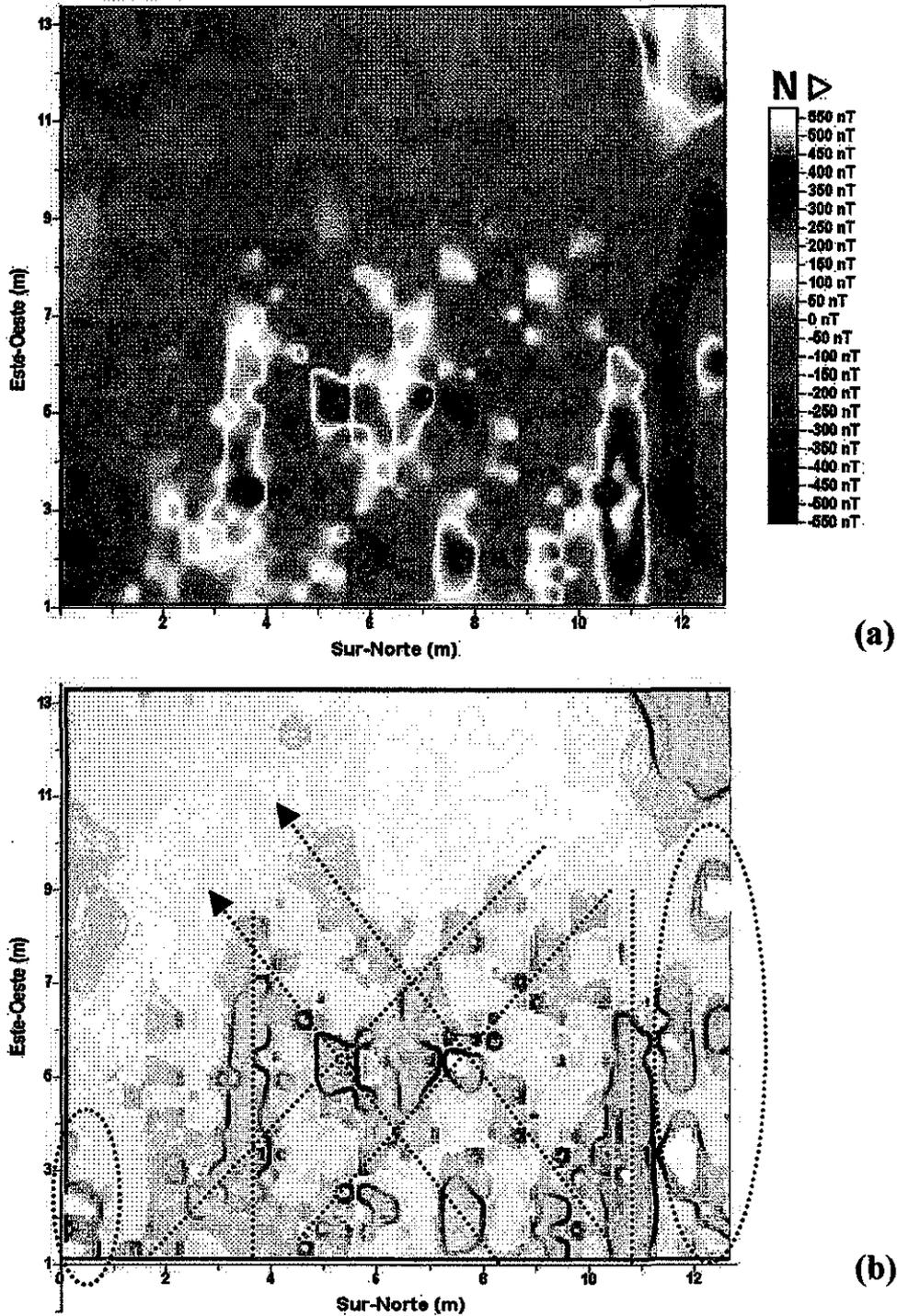


Fig 36: Mapas de anomalías magnéticas resultantes del atrio del costado sur de la Basílica de Ntra. Sra. de la Salud, Pátzcuaro: (a) Imagen de la primer derivada direccional a 0° (dirección norte) de los datos de gradiente magnético; (b) Mapa resultante del procesamiento de la imagen por medio de la aplicación de un filtro de detección de bordes en todas las direcciones y un filtro de dilatación. Las tendencias de las anomalías se marcan con líneas punteadas.

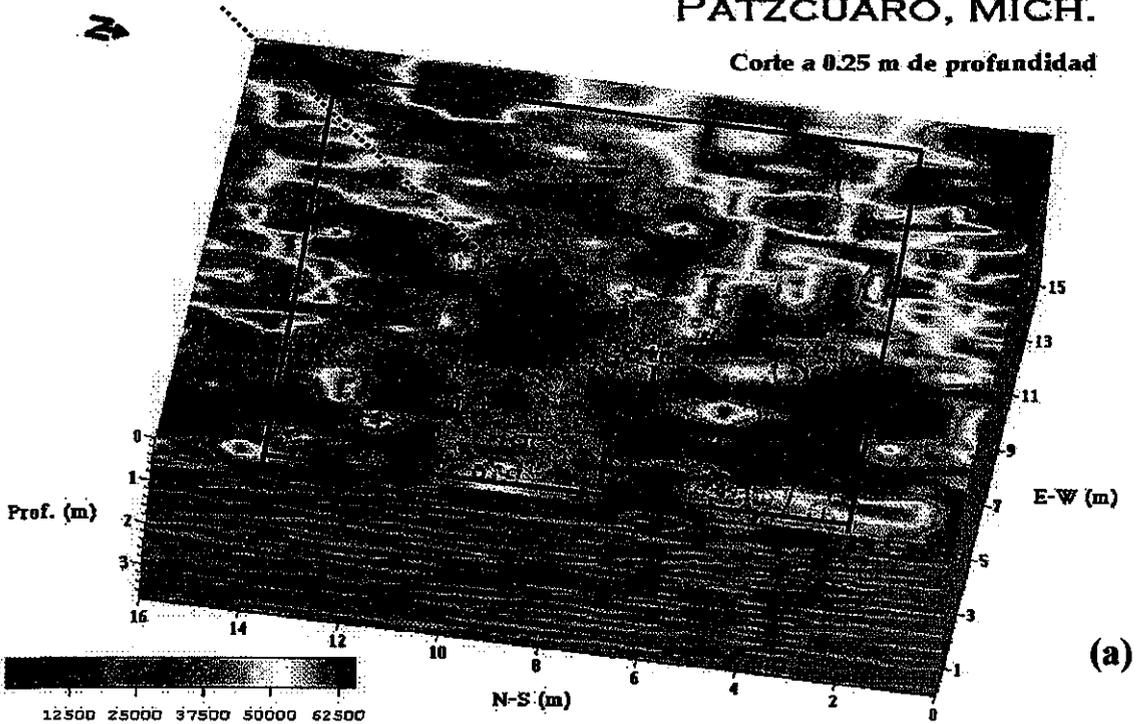
magnético, formando un cúmulo de materiales con propiedades físicas diferentes a observadas para el contexto de enterramiento. Estos cuerpos también sugieren una tendencia E-W. Por su profundidad, podemos suponer que son más antiguas a los cimientos; siendo que los cimientos son del origen colonial temprano, tales anomalías corresponderían a un período anterior a la conquista española, es decir, prehispánicos. La geometría, distribución y posible antigüedad de estos restos llevan a la conclusión de que corresponden a restos derruidos de la antigua plataforma tarasca sobre la cual se cernía el templo ceremonial. Después de los 3 m de profundidad (fig. 38b) ya no se observa ninguna variación que suponga estructura alguna, por lo que se puede interpretar que después de este punto nos encontramos con el estrato natural. La fig. 39 proporciona repetidos cortes horizontales a diferentes profundidades (*time slices*) con un espaciamiento de 80 cm entre cada uno. En esta figura se puede apreciar de forma resumida la variación espacio-temporal de las anomalías de interés, siendo que las mismas se localizan a una profundidad relativamente superficial (no mayor a los 2.5 m aproximadamente).

Todos los resultados satisfactorios con respecto al buen funcionamiento de los métodos geofísicos en un medio urbano, motivan a la aplicación de los mismos y nos muestran que un intercambio científico entre las dos disciplinas (la arqueología y la geofísica) es de suma importancia y utilidad. Siempre que se cuente con un estudio previo de la historia natural y cultural de una zona determinada de estudio que nos proporcione una idea definida de lo que se desea descubrir, los métodos geofísicos pueden proporcionar a la arqueología formas seguras y rápidas de comprobar una hipótesis y aclarar dudas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

BASÍLICA DE NTRA. SRA. DE LA SALUD PÁTZCUARO, MICH.

Corte a 0.25 m de profundidad



BASÍLICA DE NTRA. SRA. DE LA SALUD PÁTZCUARO, MICH.

Corte a 1 m de profundidad

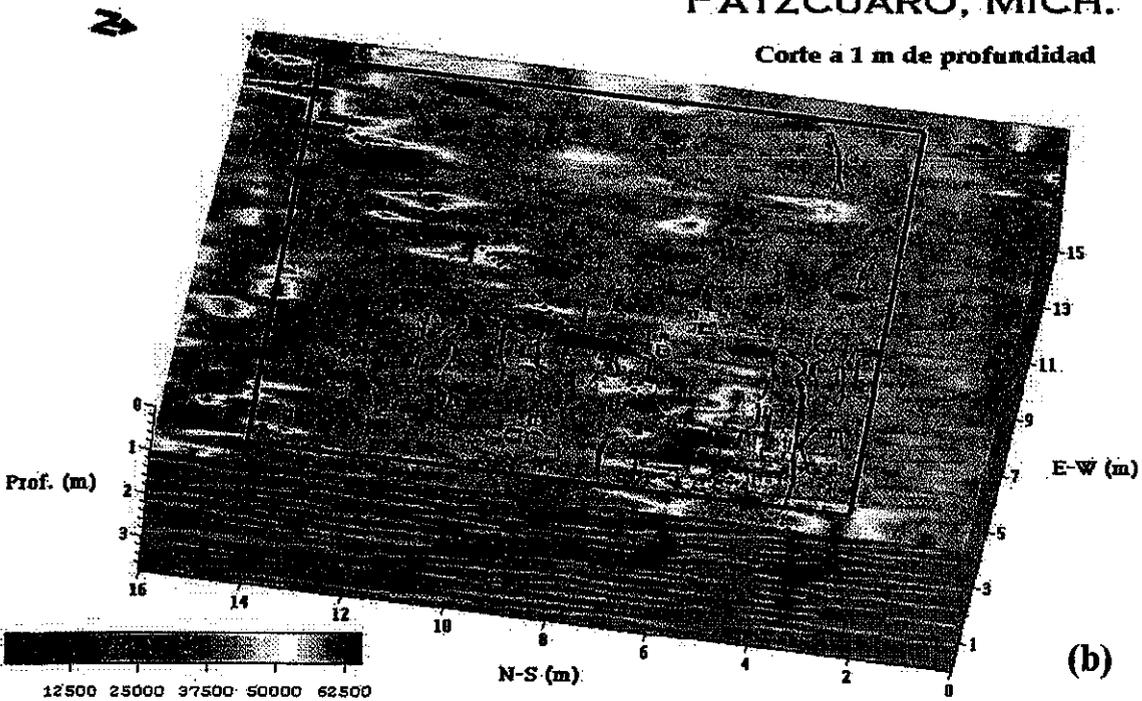
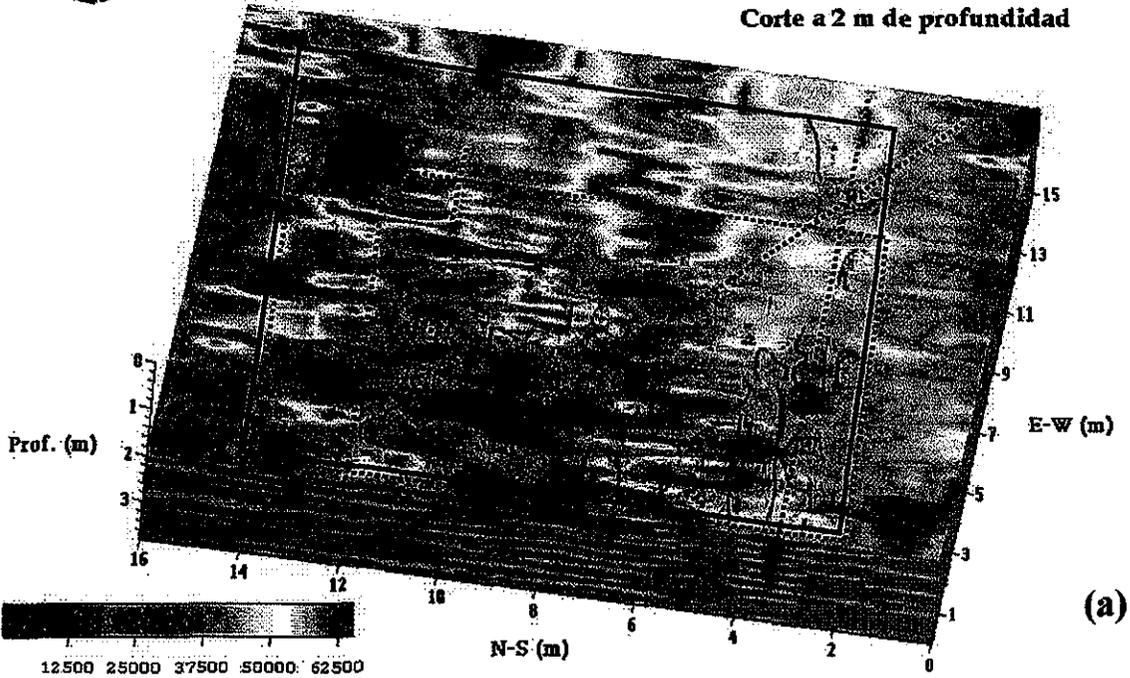


Fig. 37: Comparación del mapa procesado de anomalías magnéticas con cortes horizontales de los datos volumétricos de GPR a diferentes profundidades: (a) a 0.25 m de profundidad, (b) a 1 m de profundidad. Las tendencias de radar que concuerdan con las anomalías magnéticas se señalan con líneas punteadas.

BASÍLICA DE NTRA. SRA. DE LA SALUD PÁTZCUARO, MICH.

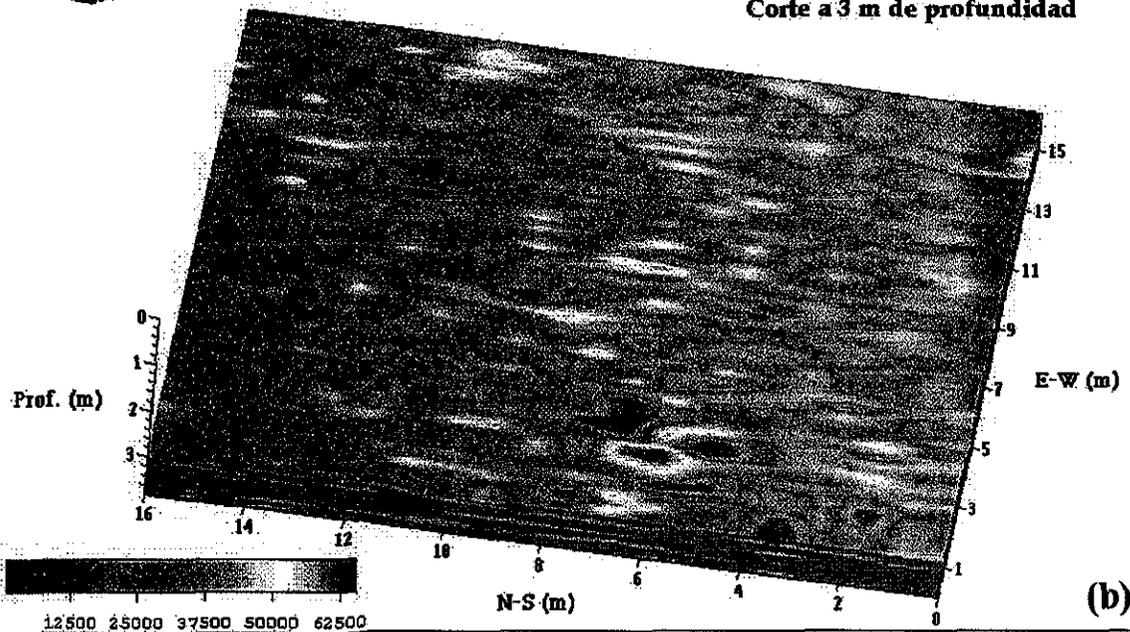
Corte a 2 m de profundidad



(a)

BASÍLICA DE NTRA. SRA. DE LA SALUD PÁTZCUARO, MICH.

Corte a 3 m de profundidad



(b)

Fig. 38: Comparación del mapa magnético con cortes horizontales de los datos de radar: (a) 2 m de profundidad, (b) 3 m de profundidad. Las tendencias se marcan con líneas punteadas; en el último no se sobrepuso el mapa magnético ya que prácticamente la magnética no penetra hasta esa profundidad.

BASÍLICA DE
NTRA. SRA.
DE LA
SALUD,
PÁTZCUARO

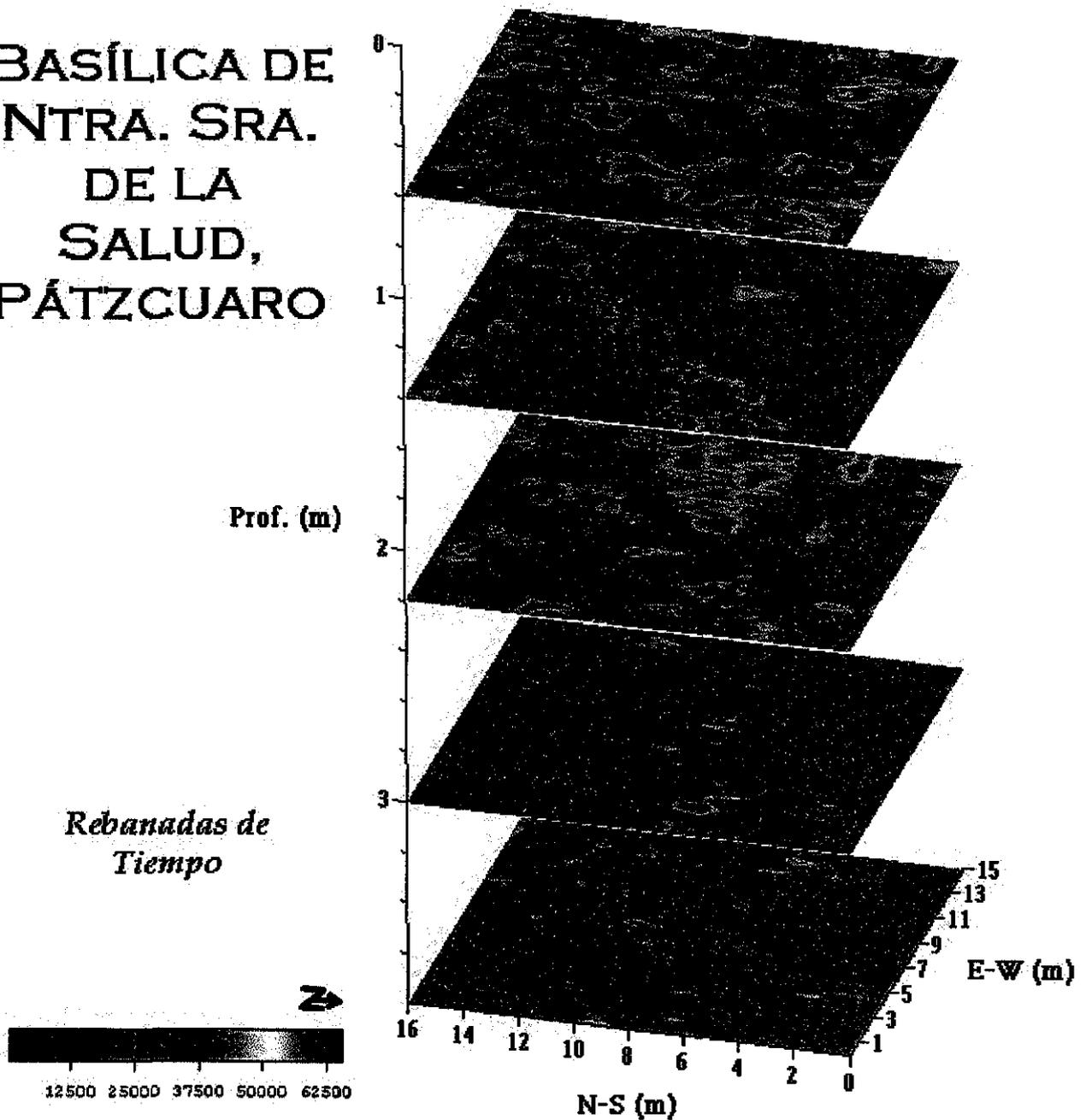


Fig. 39: Repetidos cortes horizontales a diferentes profundidades, *time slices*, con un espaciamiento de 80 cm entre cada uno. En esta figura se puede apreciar como es la variación temporal de las anomalías de interés. Después de los 3 m de profundidad prácticamente se llega al estrato natural.