

# Exploración geotérmica utilizando imágenes de satélite en Los Humeros, Puebla, México

R. M. Prol-Ledesma\*, A. Alcántara\*\* y M. Chávez\*\*

\**Instituto de Geofísica, UNAM, México*

\*\**Ahora en: Centro de Ecología, UNAM, México*

Recibido: 14 de enero, 1992; aceptado: 21 de agosto, 1992.

## RESUMEN

Dentro de un campo geotérmico es posible efectuar la caracterización de áreas con un potencial importante para la explotación de energía eléctrica utilizando imágenes Landsat MSS, modelos digitales de elevación del terreno, así como mapas geológicos y tectónicos. Con este fin se eligió al campo geotérmico de Los Humeros, ya que actualmente se cuenta con suficientes datos para corroborar los resultados obtenidos con el procesamiento de las imágenes. La identificación de lineamientos no reportados se obtuvo al efectuar el filtrado direccional de una imagen MSS conjuntamente con la iluminación artificial del modelo de elevación del terreno. Algunos de estos lineamientos fueron identificados como fallas por reportes de geología de detalle de la Comisión Federal de Electricidad. Al correlacionar estos resultados con el patrón de drenaje, se observó la relación entre algunas de estas fallas y las zonas de producción en algunos pozos. Los modelos de las principales zonas de descarga del yacimiento basados en la presencia de algunos minerales hidrotermales y datos de inclusiones fluidas coinciden con nuestros resultados al señalar las zonas de recarga y las fallas y fracturas que sirven como importantes canales de descarga. La mayor parte de estas fallas están relacionadas con el colapso de la caldera y con la tectónica regional.

**PALABRAS CLAVE:** Geotermia, percepción remota, exploración, procesamiento de imágenes.

## ABSTRACT

The characterization of an area with a high geothermal potential is attempted using Landsat MSS images, digital elevation models, geologic and tectonic maps for Los Humeros geothermal field (Mexico), where exploration studies are in an advanced stage. The location of unreported lineaments was obtained by directional filtering of an MSS image and the artificial illumination of a digital elevation model; some lineaments were confirmed as faults by ground geology. Combining these results with the drainage pattern, unreported faults related to production wells were identified. Models of reservoir outflow based on the occurrence of hydrothermal minerals and of fluid inclusion data agree with the main local recharge areas and the major faults and fractures that were identified. Most of these faults and fractures are related to caldera collapse or to regional tectonics.

**KEY WORDS:** Geothermal, remote sensing, exploration, image processing.

## INTRODUCCION

Las imágenes de satélite se usan principalmente para las etapas de reconocimiento en la exploración geotérmica debido a la capacidad de cubrir áreas grandes con una sola imagen para determinar características superficiales como contactos geológicos, anomalías topográficas y zonas con alteración hidrotermal. Durante las etapas avanzadas de exploración y en las de explotación las técnicas de procesamiento de imágenes se pueden usar en correlación con otros datos geológicos, geofísicos y geoquímicos en los estudios de factibilidad de un campo. El procesamiento de imágenes es especialmente importante en los estudios estructurales de los campos, para determinar fallas y fracturas relacionadas con la permeabilidad secundaria de las rocas del yacimiento. Además en las etapas iniciales la evaluación preliminar de un campo requiere conocer la descarga natural del sistema basada en el mapeo de las manifestaciones superficiales. Las firmas espectrales de los minerales de alteración (Hunt, 1979) proporcionan información adicional para detectar y cuantificar el área cubierta por alteración hidrotermal, además de clasificar el tipo a que corresponde y su intensidad.

En este trabajo presentamos una aplicación de las técnicas de percepción remota para la evaluación del sistema geotérmico de Los Humeros. La permeabilidad del yacimiento está relacionada con fallas y fracturas y no con porosidad primaria. Para determinar los rasgos estructurales relacionados con la permeabilidad del yacimiento, se combinaron datos del procesado de la imagen Landsat MSS con imágenes sintéticas obtenidas a partir de datos topográficos. Los resultados se compararon con la densidad del patrón de drenaje y las zonas de producción en los pozos.

En este estudio no se incluyó el procesado necesario para detectar minerales hidrotermales (cocientes de bandas), ya que en el campo de Los Humeros se presenta únicamente una área pequeña de unos pocos metros de roca caolinizada que no puede ser detectada debido a la baja resolución de las imágenes MSS (56 m x 79 m por cada pixel) (Lechi, 1983). Al aplicar este método en otro campo geotérmico, la alteración hidrotermal superficial será un parámetro adicional que incrementará la confiabilidad de los resultados.

El área en estudio se eligió tomando en cuenta el estado avanzado de exploración y desarrollo del campo, así como el hecho de que la permeabilidad del yacimiento es principalmente secundaria. También se consideró como un factor importante la escasa cubierta vegetal y la gran cantidad de pozos de exploración perforados, ya que éstos servirían para confirmar la eficiencia del modelo producido para indicar las zonas más permeables. En Los Humeros, la exploración comenzó en los años sesenta y el campo está por comenzar la etapa de producción. Se cuenta con más de 20 pozos perforados con datos de litología, geoquímica y zonas de producción del fluido geotérmico.

### GEOLOGIA SUPERFICIAL Y LITOLOGIA DE LOS POZOS DE EXPLORACION

Los Humeros es el segundo campo geotérmico en la Faja Volcánica Mexicana en producir energía eléctrica. El primero fue el de Los Azufres donde ya se tiene una planta de 55 MW, además de varias plantas de 5MW a boca de pozo. El campo geotérmico de Los Humeros se localiza en el extremo oriental de la Faja Volcánica (Figura 1), dentro de una estructura compleja formada por tres calderas: Los Humeros, Los Potreros y el Xalapasco. De acuerdo con su historia eruptiva (Ferriz y Mahood, 1984), la actividad volcánica comenzó aproximadamente hace 500,000 años y se mantuvo en forma continua hasta hace aproximadamente 20,000 años. Esta actividad produjo la formación de las tres calderas, de las cuales Los Humeros contiene a la de Los Potreros y El Xalapasco y tiene un diámetro de casi 16 km.

De acuerdo con los datos de pozos de exploración (Figura 2), la litología incluye una secuencia de flujos de lava y piroclastos. Las rocas observadas en el área tienen una composición que va desde riolítica hasta basáltica; sin embargo las rocas de composición andesítica son las más abundantes. Las manifestaciones superficiales de actividad hidrotermal se encuentran restringidas a las fallas principales y se reducen a zonas de caolinización relacionadas con descarga de vapor.

Los principales sistemas de fallas muestran una dirección NW-SE en los rasgos más antiguos, los cuales se encuentran cruzados perpendicularmente por sistemas más jóvenes. A una escala regional, los sistemas más recientes tienen una dirección que varía de NNE a NNW (Cendejas, 1987). La actividad volcánica en Los Humeros se encuentra aparentemente relacionada con el sistema más joven.

Los movimientos verticales relacionados con el colapso de las calderas produjeron fallas muy profundas, las cuales actúan como canales para el transporte del fluido geotérmico, como lo muestran los datos de descarga de los pozos (Gutiérrez-Negrín, 1982a, c). En algunos casos, estas fallas sirven también como canales de recarga de agua fría, como se observa de los perfiles de temperatura del pozo PH-4 en su intersección con la falla de Los Humeros, en donde se localiza un decremento en la temperatura por debajo de los 1000 m de profundidad (Gutiérrez-Negrín, 1982b). Por otra parte, en el pozo PH-8 los datos de inclusiones fluidas indican también la presencia de enfriamiento relacionado con la falla de Los Humeros (Prol-Ledesma y Browne, 1989).

La forma de las isotermas a profundidad y la presencia de minerales hidrotermales característicos de alta temperatura sugieren que las principales descargas del sistema están localizadas en la zona del colapso central (Prol-Ledesma y Browne, 1989) y en el Xalapasco (Viggiano y Robles, 1988). También se observa una elongación de los contornos de temperatura hacia el Este; esta elongación se podría relacionar con fallas profundas que incrementan la permeabilidad de las rocas del yacimiento y provocan el ascenso del fluido geotérmico a los estratos más superficiales donde son intersectados por los pozos de exploración.

La Comisión Federal de Electricidad nos proporcionó material no publicado acerca de los datos de producción de algunos pozos en Los Humeros (Tabla 1). De acuerdo con esos datos, los pozos con la producción más alta son: PH-1, PH-6, PH-7, PH-8, PH-9, PH-10, PH-11, PH-12, PH-13, PH-15, PH-16, PH-17, PH-18, PH-20 y PH-27. Los

Tabla 1

POZO	PROF. (m)	Qv (ton/h)	Qt (ton/h)	ENTALPIA (Kj/Kg)
PH-1	1458	27.23	78.21	1177.3
PH-6	2543	31.64	34.62	2466.6
PH-7	2340	41.65	44.07	2537.2
PH-8	2388	20.24	24.72	2249.9
PH-12	3104	53.91	64.00	2303.1
PH-13	2414	16.77	30.54	1635.1
PH-15	1973	21.48	27.39	2171.3
PH-16	2048	30.68	39.05	2174.3
PH-17	2265	11.32	11.32	2662.2
PH-20	2400	38.98	39.97	2605.9

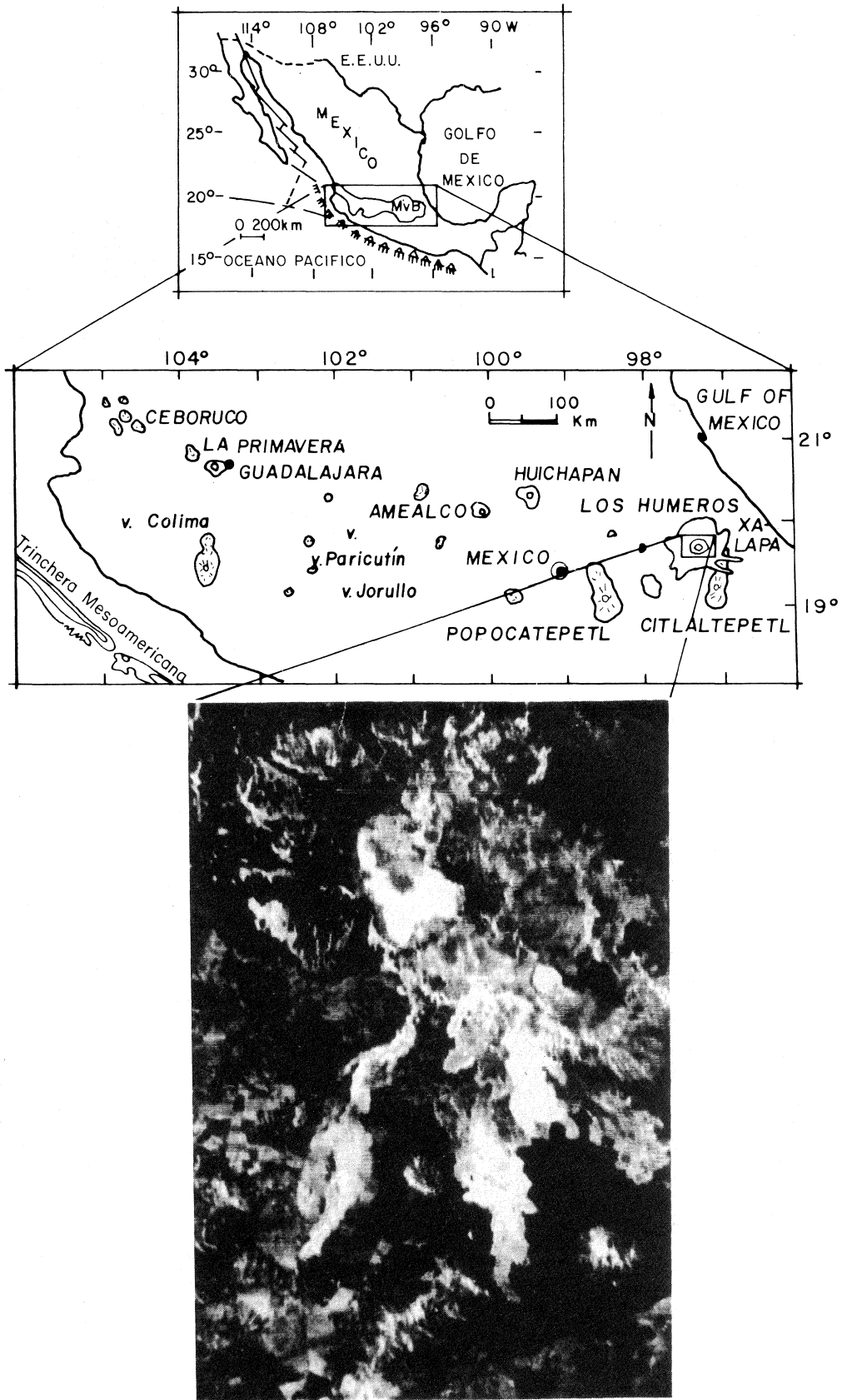


Fig. 1. Localización del campo geotérmico de Los Humeros en la Faja Volcánica Mexicana y la impresión del negativo de la banda 7 de la imagen Landsat MSS.

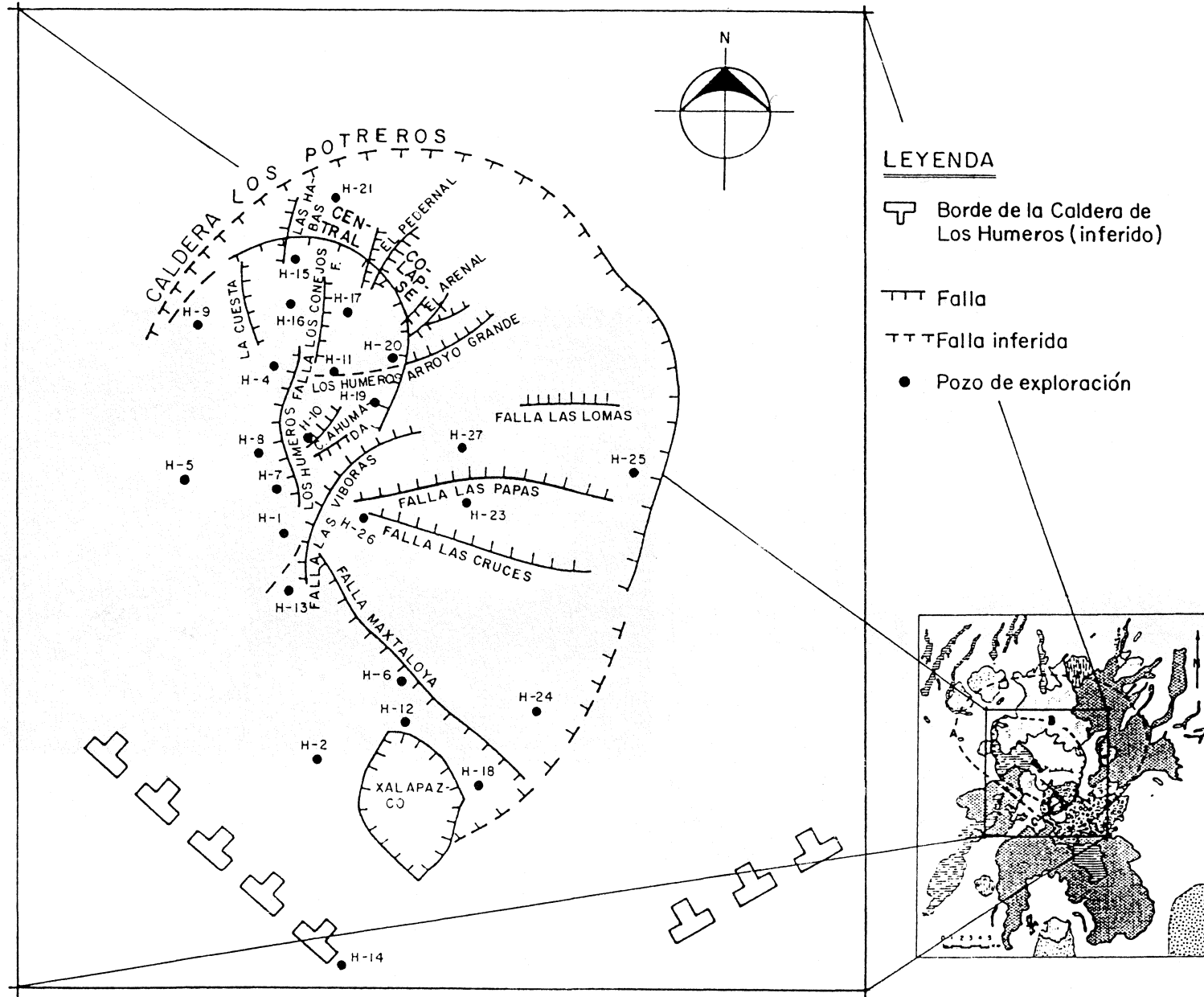


Fig. 2. Fallas principales dentro de la Caldera de Los Hornos y pozos de exploración (basado en los reportes de CFE).

pozos PH-1 y PH-12 tienen las mayores descargas de masa: de 38.21 y 64.00 ton/h respectivamente, y la más alta entalpía de descarga: 2662.19 la tiene el pozo con la menor descarga de masa (PH-17). Por otro lado, la más alta presión de descarga (5.59 MPa abs) corresponde al pozo PH-12. De estos datos es evidente que los pozos con la producción más alta se encuentran dentro o en las cercanías del Colapso Central, o bien asociados a las fallas principales, como son Los Humeros y Mastaloya.

### MODELO DE ELEVACION DEL TERRENO Y PATRON DE DRENAJE

Además de la imagen MSS del área de Los Humeros (Figura 1), también se utilizó una imagen sintética que contenía los datos topográficos (MET). Para obtener esta imagen se digitizó el mapa topográfico a escala 1:50,000 usando una red de 62m x 62m (Figura 3). Esta imagen contiene información importante acerca de los rasgos superficiales (lineamientos) de las estructuras profundas relacionadas con la permeabilidad del yacimiento y también es muy útil para identificar los bajos estructurales que pueden estar relacionados con zonas de descarga del sistema hidrotermal.

Los patrones de drenaje en el área se obtuvieron a partir de la imagen MSS y los mapas topográficos. El drenaje está determinado directamente por las rocas superficiales; sin embargo, en este trabajo lo relacionamos también con las fallas activas, permitiéndonos de esta forma identificar las zonas de descarga. Las líneas de drenaje siguen el gradiente hidráulico hasta desaparecer en las fallas que sirven como recarga del sistema. En el caso de que las fallas se encuentren selladas, el drenaje continúa sobre ellas indicando que no existe ninguna recarga.

### TECNICAS DE PROCESAMIENTO DE IMAGENES

Una parte de la imagen MSS de la Caldera de Los Humeros fue procesada para el estudio estructural del campo geotérmico (Figura 1). La banda 7 fue la que se usó principalmente en la interpretación ya que la radiación en el infrarrojo cercano tiene una menor interferencia atmosférica. La sección empleada contiene la Caldera de Los Humeros y cubre una área de 18km x 18km con una resolución de 56m x 79m por pixel. El procesado digital de la imagen incluyó el filtrado direccional (Moore y Waltz, 1983; Chávez y Alcántara, 1988) y componentes principales. Simultáneamente al procesado de la imagen se procesó también el modelo de elevación del terreno con la técnica de iluminación artificial (Chávez *et al.*, 1988). Las imágenes obtenidas como resultado del procesamiento se correlacionaron con mapas conteniendo información acerca de geología superficial, patrón de drenaje, sistemas de fallas y datos de los pozos de exploración.

### RESULTADOS

En la Figura 4 se muestra la aplicación del filtrado direccional a una imagen MSS (banda 7). La técnica de ilu-

minación artificial se aplicó al MET (Figuras 5 y 6). La comparación entre los resultados obtenidos del procesamiento de la imagen MSS y el MET muestra que el solo uso de la imagen MSS no proporciona suficiente información para identificar un gran porcentaje de los lineamientos. Con la inclusión de los datos del MET sí fue posible determinar todos los principales sistemas de fallas reportados dentro de la caldera (Figura 7). Dos de ellos corresponden a los sistemas regionales reportados por Campos-Enríquez y Garduño-Monroy (1987) con direcciones NW-SE y NE-SW. El sistema de fallas reportado por Cendejas (1987), el cual presenta direcciones entre NNE y NNW, también fue identificado con la iluminación artificial del MET. El tercer sistema observado dentro de la caldera parece ser local, tiene dirección N-S y está asociado con el colapso de la caldera. También fue posible definir los lineamientos asociados con fallas locales dentro de áreas donde se localizan los pozos de producción. Las zonas principales de descarga coinciden con zonas de mayor densidad de fallas locales (Figura 7) y con bajos estructurales (Figura 3), como por ejemplo el Colapso Central y el Xalapasco.

La interrupción del patrón de drenaje hacia el NW del Colapso Central (Figura 8) sugiere que existe recarga en la parte norte de la falla de Los Humeros. Esta recarga puede proporcionar la entrada de agua fría que se ha detectado en los pozos PH-4 y PH-1. El mismo mecanismo se observa en la sección oriental de la falla Las Papas (Figuras 2 y 8), aunque la falta de pozos de exploración en esta zona no permite corroborar la existencia de un efecto de enfriamiento a profundidad.

La combinación de los métodos utilizados permitió ampliar los resultados obtenidos. La aplicación de iluminación artificial al MET clarificó los resultados de la sola aplicación del filtrado direccional a la banda 7 de la MSS, como por ejemplo la traza de las fallas Mastaloya y Las Papas (Figuras 4, 5, 6 y 7).

### DISCUSION

La identificación de lineamientos en las imágenes procesadas requiere de la combinación de todos los resultados, ya que se ha demostrado que la información de una imagen se complementa con los datos de la otra (por ejemplo las Figuras 4, 5 y 6). Por otra parte, la identificación de los lineamientos que se observan repetidamente en las diferentes imágenes se puede considerar como más confiable. De los resultados se observó que la técnica de iluminación artificial es un procedimiento eficiente para realzar los lineamientos perpendiculares a la dirección de iluminación. La iluminación se aplicó para varios ángulos y los mejores resultados para este caso en particular se obtuvieron para una declinación de 0° y 144° con una inclinación de 30° (Figuras 5 y 6).

Una vez que los lineamientos principales fueron identificados en las imágenes iluminadas artificialmente, la correlación con el patrón de drenaje indica la importancia de los lineamientos en la permeabilidad del yacimiento. La

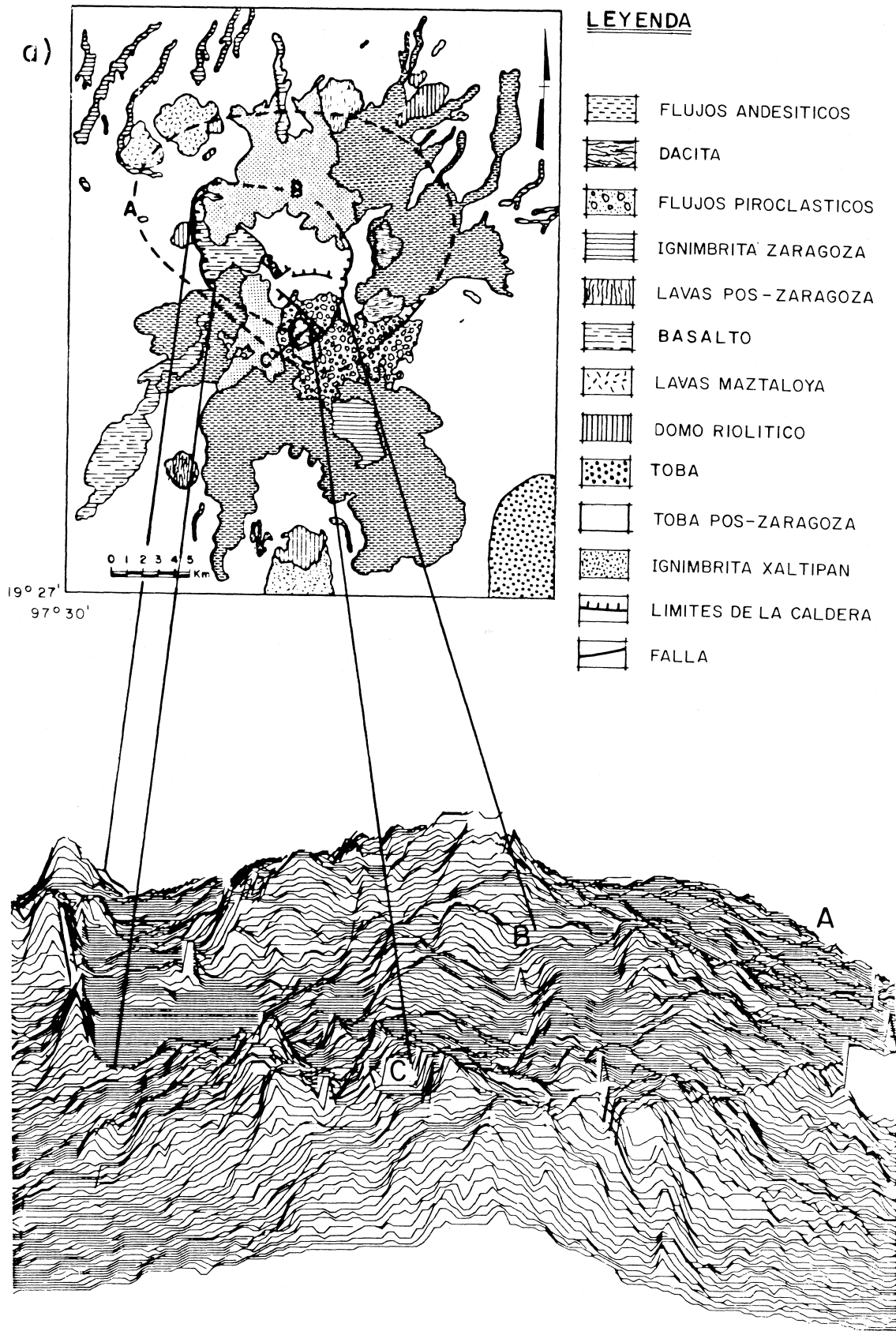


Fig. 3. a) Mapa geológico de Los Humeros (tomado de Ferriz y Mahood, 1984). b) Representación tridimensional del modelo digital de la elevación del terreno (MET). A-Caldera Los Humeros, B-Caldera Los Potreros, C-Xalapasco.

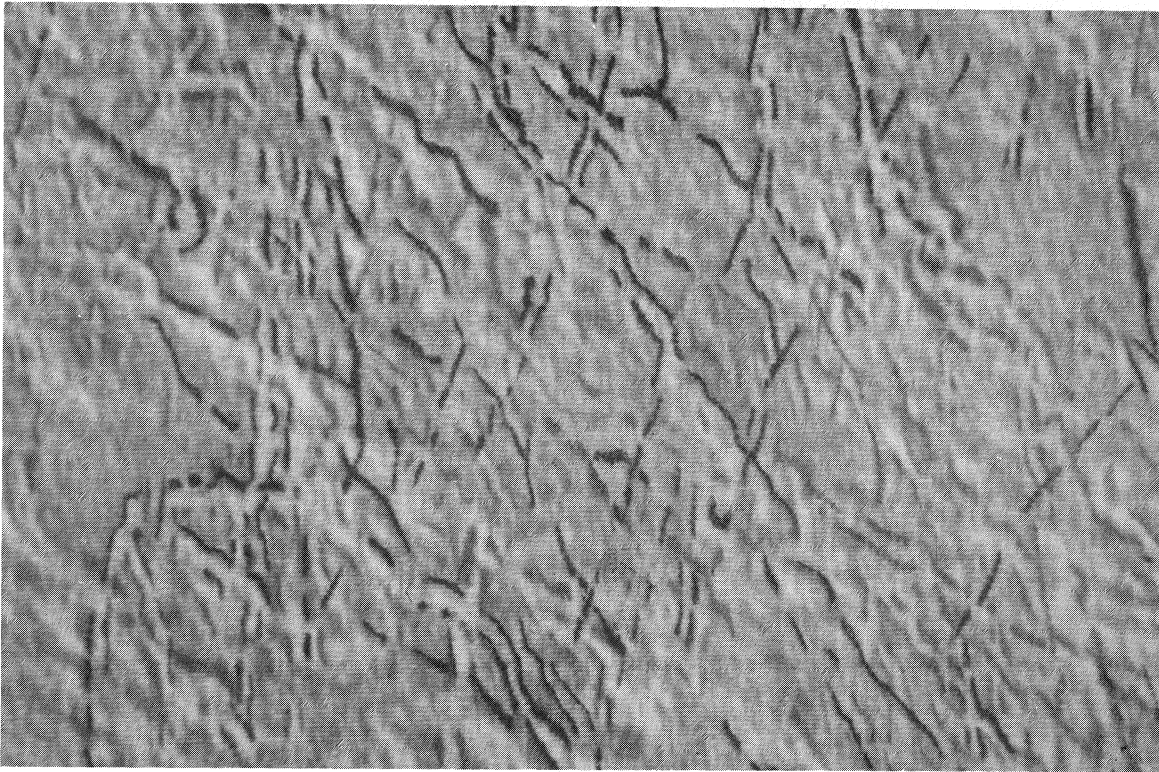


Fig. 4. Filtrado direccional de la imagen MSS de la Caldera Los Humeros (banda 7-infrarrojo cercano: 0.8 a 1.1 micras) resaltando los rasgos lineales en la dirección NE-SW.

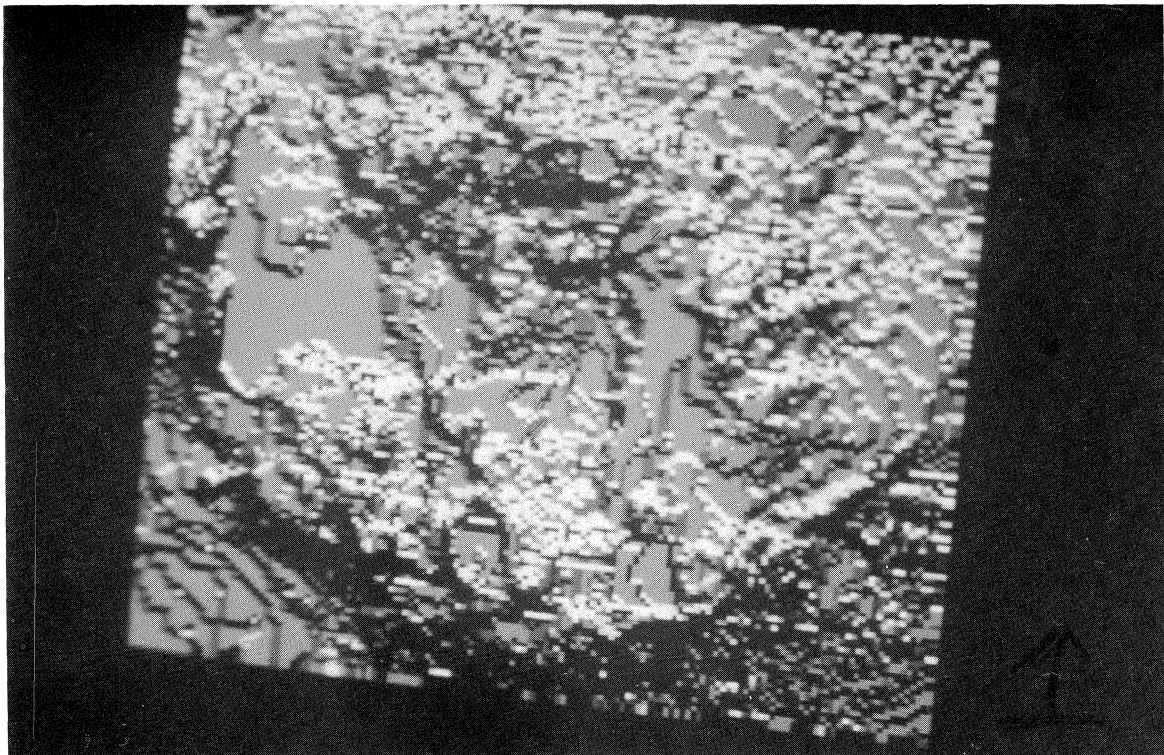


Fig. 5. Imagen sintética de Los Humeros Caldera después de aplicársele el procesado de iluminación artificial al MET con una inclinación de  $30^{\circ}$  y una declinación de  $0^{\circ}$ .

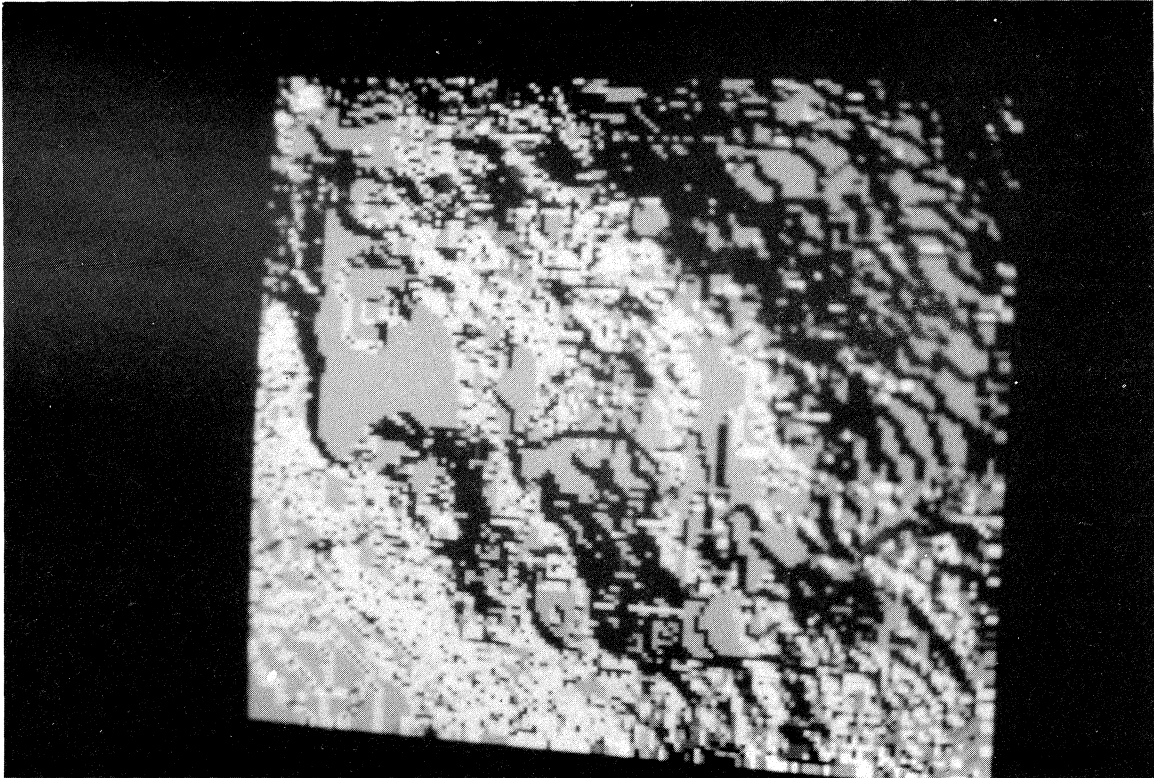


Fig. 6. Imagen sintética de Los Humeros mostrando los resultados de la aplicación de la iluminación artificial al MET con una inclinación de  $30^\circ$  y una declinación de  $144^\circ$ .

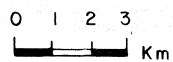
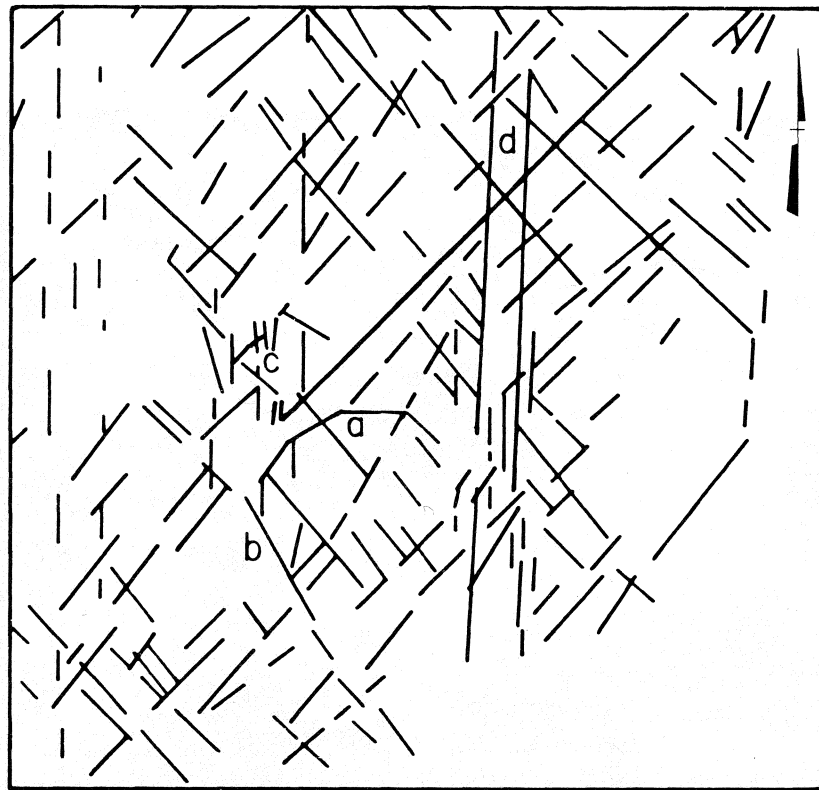


Fig. 7. Principales sistemas de fallas, obtenidos a partir de la aplicación de iluminación artificial al MET. Fallas reportadas en los estudios de CFE: a) Las Papas, b) Mastaloya, c) Los Humeros. Lineamientos no reportados por CFE indicados como d).



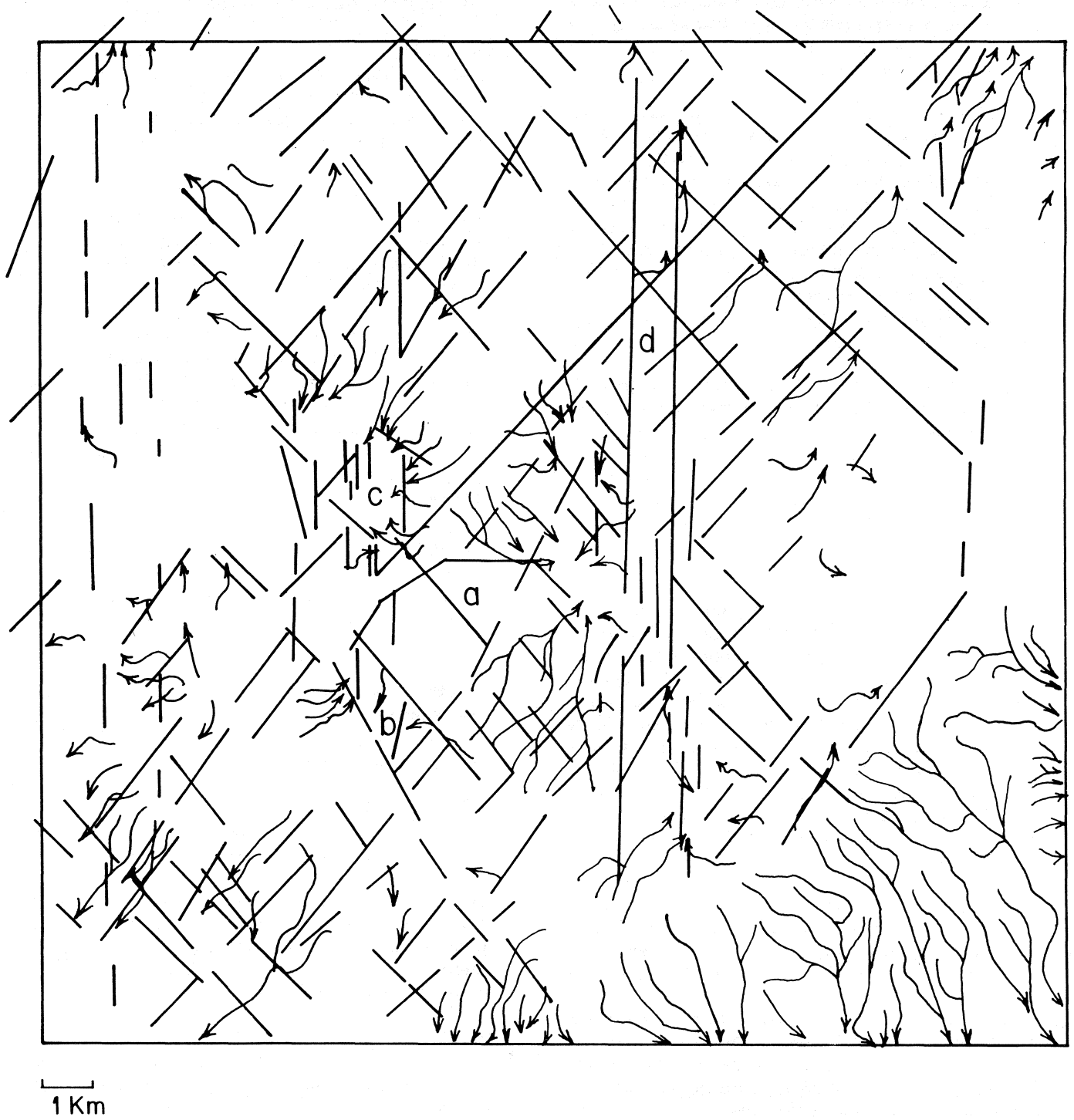


Fig. 8. Superposición del patrón de drenaje y los principales sistemas de fallas en la Caldera de Los Humeros. Los símbolos a), b), c) y d) igual que en la Figura 7.

combinación de una alta densidad de lineamientos con un mínimo en el patrón de drenaje sirve como indicador de áreas con mayor permeabilidad. A estas áreas se les puede relacionar con zonas de recarga o descarga del sistema. De las Figuras 2, 7 y 8, se observa que el Colapso Central y sus alrededores están caracterizados por una alta densidad de lineamientos, una baja densidad del patrón de drenaje y se relacionan con bajos estructurales. Estas áreas contienen la mayor parte de los pozos con la más alta producción.

Además de las zonas productoras ya conocidas, es posible proponer por lo menos una área más donde el patrón de fallamiento y la topografía indican la existencia de buenas condiciones para el movimiento ascendente del fluido geotérmico, esta zona se localiza al sur de la falla Las Papas y los resultados del único pozo de exploración en las cercanías indican la probable presencia de un flujo lateral importante (Figura 8). Esta hipótesis se apoya también en la forma de las isotermas trazadas con base en los datos de temperatura de pozos y la alteración hidrotermal (Viggiano y Robles, 1988).

La correlación obtenida indica la utilidad del procesamiento de imágenes para identificar (en las etapas tempranas de exploración) las áreas de descarga o recarga local dentro de un campo geotérmico, suponiendo que la permeabilidad del yacimiento es secundaria, como es el caso en la mayoría de los campos geotérmicos de la Faja Volcánica Mexicana.

### CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos por el método presentado son aplicables al análisis estructural de un campo geotérmico para indicar las áreas con mayor probabilidad de tener una alta permeabilidad secundaria. En el caso de Los Humeros, así como en otros muchos campos geotérmicos, la permeabilidad de las rocas del yacimiento es secundaria. Por lo tanto, las áreas señaladas con nuestro método están relacionadas con fenómenos de recarga o descarga; ésto es, las estructuras identificadas actúan como canales en el ascenso o descenso de fluido. Este hecho puede ser usado en una escala regional para identificar las áreas de recarga de un sistema geotérmico.

Con objeto de generalizar el método a la identificación de zonas de alta temperatura-alta permeabilidad en el yacimiento, sería necesario correlacionar los resultados de la iluminación artificial del MET, el filtrado direccional de la imagen MSS y el patrón de drenaje con otros datos geofísicos, como por ejemplo los contornos de resistividad. Sin embargo, este tipo de análisis queda fuera del objetivo principal de este estudio que es demostrar que el método presentado es útil para señalar las áreas de mayor permeabilidad con base en las estructuras identificadas.

### BIBLIOGRAFIA

CAMPOS-ENRIQUEZ, J. O. y V. H. GARDUÑO-MONROY, 1987. The shallow structure of Los

Humeros and Las Derrumbadas Geothermal Fields, Mexico. *Geothermics*, 16, 539-554.

CENDEJAS, F. A., 1987. Análisis de sensibilidad para la generación de 55 MW del yacimiento geotérmico de Los Humeros, Puebla. *Geotermia*, 3, 77-92.

CHAVEZ, M. y E. A. ALCANTARA, 1988. Detección de patrones lineales en imágenes LANDSAT. Programa LINEAM. Comunicación Técnica No. 23. Serie Datos, Instrumentación y Desarrollo. Instituto de Geofísica, México, 21 pp.

CHAVEZ, M., G. JUAREZ y A. R. ALCANTARA, 1988. Generación de imágenes en relieve a partir de datos geofísicos. Comunicación Técnica, No. 19. Serie Datos, Instrumentación y Desarrollo. Instituto de Geofísica, México, 13 pp.

FERRIZ, H. y G. A. MAHOOD, 1984. Eruption rates and compositional trends at Los Humeros Volcanic Center, Puebla, Mexico, *J. Geophys. Res.*, 89, 8511-8524.

GUTIERREZ NEGRIN, L. C. A., 1982a. Petrografía del pozo H-2 del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla. Informe 22-82, Comisión Federal de Electricidad. México, 39 pp.

GUTIERREZ NEGRIN, L. C. A., 1982b. Litología y zoneamiento hidrotermal en los pozos H-1 y H-2 del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla. Informe 23-82, Comisión Federal de Electricidad. México, 46 pp.

GUTIERREZ NEGRIN, L. C. A., 1982c. Litología y zoneamiento hidrotermal en el pozo H-4 del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla. Informe 55-82, Comisión Federal de Electricidad. México 39 pp.

HUNT, G. R., 1979. Near-infrared (1.3-2.4 microns) spectra of alteration minerals - Potential for use in remote sensing. *Geophysics* 44, 1974-1986.

LECHI, G., 1983. Earth Resources Satellites (LANDSAT, THEMATIC MAPPER, SPOT). In: Report of the VIII International Training course on applications of satellite remote sensing to water resources. FAO, Rome, 19 Sept. to 7 Oct. 49 pp.

MOORE, K. G. y F. A. WALTZ, 1983. Objective procedures for Lineament Enhancement and Extraction. *Photogrametric Engineering and Remote Sensing*, 49, 641-647.

PROL-LEDESMA, R. M. y P. R. L. BROWNE, 1989. Hydrothermal alteration and fluid inclusion geothermometry of the Los Humeros geothermal field. *Geothermics*, 18, 677-690.

VIGGIANO, J. C. y J. ROBLES, 1988. Mineralogía hidrotermal en el campo geotérmico de Los Humeros, Puebla. II: Geometría del yacimiento. *Geotermia*, 4, 29-40.

---

R. M. Prol-Ledesma, A. Alcántara\* y M. Chávez\*  
*Instituto de Geofísica, UNAM*  
*Cd. Universitaria*  
*Delegación Coyoacán*  
*04510 México, D. F.*

*\*Ahora en: Centro de Ecología, UNAM*  
*Cd. Universitaria*  
*Delegación Coyoacán*  
*04510 México, D.F.*

