

# Análisis de propiedades magnéticas totales en rios de perforación, campo la Victoria, Apure herramienta alternativa en la prospección de hidrocarburos

M. Aldanal\*1, V. Costanzo'1, D. Vitiello2, G. Gómez-3

1 Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad Simón Bolívar, Apto 89000, Baruta, Valle de Sartenejas

2 BPX de Venezuela, Edif. Seguros Sudamérica piso 5, Av. Fco. De Miranda

3 PDV Pto. La Cruz, Edo Anzoátegui

## Resumen

Las anomalías detectadas en las propiedades magnéticas totales (e.g. susceptibilidad (SM) y magnetismo remanente natural (NRM)) medidas en estudios aeromagnéticos o en muestras de superficie sobre campos petrolíferos, han sido atribuidas en trabajos recientes a la presencia, en niveles someros de agregados esferoidales de magnetita autigénica, producto del ambiente reductor inducido por el reservorio subyacente. De verificarse la relación causa; entre las anomalías medidas en las propiedades magnéticas y la presencia de hidrocarburos, este tipo de estudio podría ser utilizado como una herramienta rápida, efectiva y económica para estimar la distribución de crudos en zonas en exploración- En este trabajo se realiza una validación de la técnica, utilizando muestras en profundidad de tres pozos (dos productores, uno no productor), pertenecientes al campo La Victoria, Edo. Apure, Venezuela. Los registros de SM y NRM correspondientes a niveles son-peros en los pozos estudiados (hasta 1500 metros de profundidad), se complementan con estudios de difracción de Rayos X y microscopía electrónica (de transmisión (TEM) y barrido (SEM)). Estos estudios confirman una relación causal entre la presencia de agregados submicrónicos de magnetita autigénica y las anomalías detectadas en las propiedades magnéticas totales. Los análisis de curvas de termoremanencia y remanencia magnética (IRM), realizados en estas mismas muestras, confirman una concentración mayor de magnetita, respecto a otros minerales magnéticos, en los niveles anómalos. Estos resultados estarían confirmando una relación causa; entre anomalías en las propiedades magnéticas y la presencia de hidrocarburos, causante de un ambiente reductor que favorece la nucleación y recristalización de agregados esferoidales de magnetita autigénica. Se sugiere así la potencialidad de este tipo de estudios como una herramienta para la exploración y posible evaluación de zonas prospectivas.

## Abstract

Anomalies detected in the bulk magnetic properties (e.g. susceptibility (MS) and natural remanent magnetization (NRM)) measured over oil fields have been hypothesized as the result of the presence, at near surface levels, of anomalous concentrations of authigenic magnetite, which seems to have a genetic relationship with the underlying reservoir. The confirmation of this hypothesis could validate the measurement of magnetic susceptibility anomalies at surface as an alternative technique that can be used in hydrocarbon exploration. We confirm this hypothesis by comparing results of three oil wells (two producers and a dry one) located at La Victoria Oil Field, Edo. Apure, Venezuela. The study of SM and NRM profiles at shallow depths (approximately 1500 in) is complemented with analyses of X-Ray diffraction patterns and electronic microscopy (scanning (SEM) and transmission (TEM)). The results obtained confirm a causal relationship between the magnetic anomalies detected in the bulk magnetic properties and the presence of characteristic spherical aggregates of submicronic crystals of authigenic magnetite. Analyses of thermoremanence curves and isothermal remanent magnetization (IRM) confirm an anomalous concentration of magnetite over other magnetic minerals at those levels where conspicuous peaks in the bulk magnetic properties have been measured. These results suggest a causal relationship between the anomalies measured in the magnetic properties and the presence of hydrocarbons, that induce a reducing environment that favors recrystallization and nucleation of the spherical aggregates of authigenic magnetite. Thus, it is possible to validate the measurement of anomalies in the bulk magnetic properties at surface as an alternative technique that could be used in hydrocarbon exploration.

## Introducción

En 1979, Donovan identificó anomalías aeromagnéticas pronunciadas sobre el campo petrolífero de Cement, Oklahoma, las cuales interpretó como el resultado de la presencia, en niveles cercanos a la superficie, de abundante magnetita autigénica producto de la alteración química de óxidos de hierro en un ambiente reductor inducido por el yacimiento. Como consecuencia de estos resultados, Donovan et al. (1984), Saunders et al. (1991) y Foote (1992) han propuesto reiteradamente que el estudio de anomalías en las propiedades magnéticas totales (Susceptibilidad y Magnetismo Remanente, entre otras), podría ser utilizado como un método alternativo y económico para la exploración, explotación e incluso evaluación de yacimientos petrolíferos. Por otra parte, estudios realizados por Benthien y Elmore (1987), McCabe et al. (1987) y Elmore et al. (1987) en muestras de bitumen sólido y espeleotemas con inclusiones de hidrocarburos, identifican, utilizando microscopía electrónica de barrido, la presencia de agregados esferoidales de cristales submicrónicos de magnetita, cuya precipitación parece estar asociada directamente a la biodegradación del crudo. Estamos, entonces, en presencia de dos líneas paralelas de investigación.

Las anomalías en las propiedades magnéticas totales de un horizonte sedimentario pueden ser, sin embargo, consecuencia de otros factores no relacionados genéticamente con la acumulación de hidrocarburos. Éstas pueden ser consecuencia de procesos naturales o antropogénicos no asociados a la presencia de un yacimiento subyacente (Machel and Burton (1991)), tales como la depositación sedimentaria de minerales magnéticos que se han formado en otras áreas (Reynolds (1982)).

El objetivo básico del presente trabajo consiste en combinar las dos vertientes de investigación indicadas a objeto de validar el método utilizando muestras procedentes de los primeros 1500 metros de perforación de tres pozos ubicados en el campo La Victoria, Venezuela. Se busca determinar la presencia restrictiva de magnetita autigénica en aquellos niveles en profundidad que presenten anomalías en sus propiedades magnéticas totales. Para reconocer las mineralogías magnéticas asociadas con niveles anómalos en las propiedades magnéticas totales, los perfiles de SM y NRM se complementan con análisis de SEM y TEM, curvas de IRM y curvas de Termoremanencia.

### Ubicación Geográfica y Geología del Área de Estudio

El Campo La Victoria, localizado al suroeste de Venezuela en el estado Apure, es un anticlinal de rumbo norte-sur, limitado hacia el este por una falla inversa que supera los 120 metros de desplazamiento (ver figura 1). Esta estructura se encuentra ubicada en la ribera Norte del Río Arauca, al suroeste de la cuenca Barinas-Apure.



Análisis geoquímicos realizados en diferentes pozos de Barinas y Apure, indican que las formaciones Cretácicas Quevedo y La Montaña y determinadas áreas de la formación Escandalosa poseen kerógeno tipo III (Chigné (1985)). El contenido de carbono total aumenta en dirección oeste-este para estas formaciones, con inflexiones coincidentes con la posición actual que ocupan los arcos de Mérida y Arauca. Simulaciones matemáticas realizadas en el área (Chigné (1985)), indican que el petróleo comenzó a generarse en la parte profunda del área, en el sector sur-occidental, hace unos 12 millones de años durante el Mioceno medio. El pico de la generación de petróleo se alcanzó en la misma área hace 3.8 millones de años, en el Plioceno, cuando la sección sedimentaria tenía unos 6600 metros de espesor. El petróleo debió migrar unos 70 Kms. hacia los altos estructurales presentes en el arco de Arauca, a través del medio poroso de las rocas recipientes ubicadas en la parte profunda y/o a lo largo de las discordancias regionales como, por ejemplo, la discordancia de la base del Terciario, sin perder gran parte de sus componentes volátiles (Kiser (1989)).

Se estudiaron tres pozos de este campo, Lvt-4x, Lvt-1x y Lvt-2x (ver figura 2). El pozo Lvt-4x perforado a finales del año 1985 en el ápice del anticlinal probó más de 5300 PBD de 39° API en la formación Escandalosa (Cretáceo). El pozo Lvt-1x probó 3000 barriles de petróleo de 36° API en el Cretáceo y de 30° API en un intervalo arenoso del Terciario basal. El pozo Lvt-2x pretendió evaluar acuíferos estratigráficos en el flanco de la estructura, cayendo buzamiento abajo y resultando no productor (Chigné (1985)).

Se analizaron ripios de perforación, tomados de los primeros 1500 metros de profundidad a intervalos aproximados de 15 metros. Estas muestras corresponden a las molasas del Grupo Guayabo Formación Río Yuca-Parángula, que representan el relleno de la cuenca Barinas-Apure ocurrido durante el levantamiento de la cadena Andina. La edad del Grupo Guayabo se ha estimado entre el Mioceno medio y Pleistoceno y consiste, principalmente, de sedimentos arenosos-lutíticos de ambiente fluvio deltaico.

### Resultados Experimentales y Discusión Perfiles de SM y NRM

Las medidas de SM se realizaron utilizando un puente de inductancia de susceptibilidad magnética Sapphire SI-2. Las



medidas de NRM se obtuvieron con una magnetómetro de giro Schonstedt SSN-1A.

Los perfiles de SM y NRM en función de la profundidad obtenidos para los pozos analizados se presentan en la figura 3.

El pozo productor Lvt4x muestra dos anomalías pronunciadas en las propiedades magnéticas totales, correspondientes a los niveles 534-579 y 625-655 metros, tal como se aprecia en la figura 3a. El pozo productor Lvt-1x presenta una anomalía pronunciada en el intervalo 750-810 metros (figura 3b), y el pozo no productor Lvt-2x muestra una anomalía en el intervalo 610-625 metros (figura 3c).

Es interesante notar que las anomalías se presentan en niveles de profundidad muy localizados. Esto, en principio, descartaría la existencia de estas anomalías como resultado de una posible contaminación de las muestras debido, por ejemplo, a la mocha de perforación. Si esta fuera la causa se esperaría, en todo caso, anomalías en varios niveles de profundidad y, por tanto, un espectro ruidoso. Éste, definitivamente no es el caso. Restos de la mecha de perforación fueron identificados por análisis de SEM sólo en dos de las muestras analizadas, observándose como hilos finos que representaban tan sólo el 0.01% en peso de la muestra total. Por otra parte, el lodo de perforación consiste de una mezcla de bentonita y agua, que en ningún momento produciría contaminación magnética de las muestras.

En base a lo anterior, pareciera que estas anomalías podrían obedecer a la presencia de cantidades anómalas de minerales magnéticos, tales como sulfuros de hierro o magnetita autigénica.

En este punto es importante destacar la intensidad relativa de las anomalías observadas. Si bien en todos los pozos se observan picos localizados en los perfiles de SM y NRM, la intensidad mayor de éstos corresponde a los pozos productores, Lvt-4x y Lvt-1x, y la anomalía medida en el primero es 4 veces más intensa. Al comparar la anomalía observada en el pozo Lvt-4x con la medida en el Lvt-2x, el factor es aproximadamente igual a 20. Este resultado, en principio, pareciera indicar una conexión entre intensidad de la anomalía y productividad del pozo, siendo el pozo Lvt-4x el de mayor productividad, conforme a análisis previos del área, y el Lvt-2x no productor, tal como se indicó anteriormente.



Si, efectivamente, las anomalías observadas están asociadas a la presencia restrictiva de cantidades mayores de minerales magnéticos, esperaríamos encontrar una concentración más grande de éstos en los niveles anómalos del pozo Lvt-4x respecto a aquellos del pozo no productor Lvt-2x.

#### Análisis de SEM

Las anomalías observadas en los perfiles de propiedades magnéticas totales podrían obedecer a factores tales como contrastes litológicos, no asociados con la presencia de un yacimiento subyacente. A objeto de validar la técnica, es importante encontrar evidencia clara que asocie estas anomalías, debidas posiblemente a acumulaciones de minerales magnéticos, con la presencia de hidrocarburos. Trabajos previos en muestras de superficie, tales como bitumen y espeleotemas con inclusiones de hidrocarburos (Benthien y Elmore (1987), McCabe et al (1987), Elmore et al (1987)), identifican asociaciones esferoidales de cristales submicrónicos de magnetita, al paro= de carácter autigénico. La naturaleza autigénica de estos agregados estaría indicada por la forma euhedral perfecta y la ausencia casi total de Titanio. La presencia de magnetita secundaria en forma de inclusiones dentro del bitumen sólido, sugiere (McCabe et al. (1987)). una relación entre la biodegradación del crudo y el desarrollo de dicho mineral en las muestras. Estos autores infieren que la magnetita secundaria en otros ambientes geológicos también puede estar relacionada con la presencia de hidrocarburos.

Análisis de SEM se llevaron a cabo en separados magnéticos de algunas muestras seleccionadas, correspondientes tanto a niveles no anómalos como anómalos de los pozos estudiados.

Estos análisis mostraron la presencia restrictiva de agregados esferoidales, similares a los encontrados previamente en muestras en superficie (McCabe et al (1987)). sólo en aquellos niveles en los que se detectó una anomalía en las propiedades magnéticas totales. Las figuras 4, 5 y 6 muestran los agregados esferoidales observados en los niveles anómalos de los pozos Lvt-4x, Lvt-1x y Lvt-2x, respectivamente. Se encontró, además, una concentración relativa mayor (~3) de estos agregados esferoidales en los niveles anómalos de los pozos productores respecto al pozo no productor.



Los minerales magnéticos observados por SEM en los niveles no anómalos, no presentaban forma característica alguna, tal como se aprecia en la figura 7 para un nivel no anómalo del pozo Lvt-4x.

Los espectros de dispersión de rayos X muestran que estos agregados esferoidales están compuestos básicamente por hierro e indican la ausencia total de Titanio. Este hecho, junto con la forma euhedral perfecta, descartan un posible origen detrítico.

La superficie de los agregados esferoidales observados en los niveles anómalos de los pozos productores muestra un aspecto granular, tal como se observa en la figura k el cual contrasta con la superficie de los agregados observados en el pozo no productor, de apariencia más consolidada (ver figura 8b). En base a esta observación, de naturaleza netamente cualitativa, sugerí~ que la disimilitud en las texturas podría estar indicando que el proceso de nucleación y crecimiento de los agregados esferoidales en los pozos productores se sucede en la actualidad, como consecuencia de la presencia del yacimiento subyacente; en el pozo no productor, sin embargo, estamos observando la documentación fósil, debida a la migración del crudo hacia el yacimiento actual La posible vía de migración, sugerida por esta diferencia de texturas y por la intensidad relativa de las anomalías, se muestra en la figura 2.

Análisis de TEM. Curvas de Termoremanencia y de IRM.

A objeto de identificar con mayor precisión las mineralogías magnéticas de los agregados esferoidales observados por SEM, se realizaron análisis de microscopía electrónica de transmisión y curvas de termoremanencia, en separados magnéticos de las muestras, así como experimentos de IRM en las muestras totales.

El patrón de difracción obtenido para los separados magnéticos correspondí~ al nivel anómalo del pozo Lvt-4x se muestra en la figura 9. Los patrones obtenidos en los niveles anómalos de los tres pozos permitieron identificar la presencia de magnetita (cristal de cara centrada (fcc), con parámetro de la red igual a 8.3 IRA, 8.37A y 8.25A, para los niveles anómalos de los pozos Lvt-4x, Lvt-1x y Lvt-2x, respectivamente).

Las curvas de termoremanencia y de IRM obtenidas para los niveles anómalos, confirman la presencia de magnetita en éstos. La figura 10 muestra la curva de termoremanencia y de IRM correspondiente al nivel 625-640 metros del pozo Lvt-4x. Como se observa, la curva de IRM satura a campos superiores a los 200 mT, lo que estaría indicando la presencia de un mineral de baja coercividad, posiblemente magnetita. La curva de termoremanencia muestra una disminución considerable de la magnetización alrededor de 580°C, lo que estaba confirmando los resultados indicados por las curvas de IRM.

Resultados similares se observaron para los niveles anómalos de los pozos Lvt-1x y Lvt-2x, es decir, saturación de las curvas de IRM a bajos campos, alrededor de 100 mT en ambos casos.

Se realizaron también análisis de IRM en muestras totales de los niveles no anómalos de los pozos estudiados. La figura 11 presenta la curva de IRM correspondiente al nivel 915-930 del pozo Lvt-4x. Esta curva no muestra saturación, incluso a campos tan altos como 600 mT indicando para este nivel la presencia de un mineral de alta coercividad posiblemente hematita. El mismo comportamiento se observó en los niveles no anómalos de los otros pozos analizados. Aunque estas curvas parecen estar indicando la co-existencia de magnetita, ésta debe ser de origen detrítico, ya que en estos niveles no se encontraron los agregados esferoidales característicos observados por SEM en los niveles anómalos.

## Conclusiones

Los resultados obtenidos indican una relación causa] entre la presencia de agregados esferoidales de magnetita autigénica, producto de] ambiente reductor inducido por el yacimiento subyacente, y las anomalías medidas en las propiedades magnéticas totales, en niveles cercanos a la superficie en pozos del campo la Victoria, Edo. Apure. La intensidad de las anomalías, además, parece estar relacionada con la productividad del pozo. Esta observación permitió trazar una posible ruta de migración de hidrocarburos en el área estudiada, e indica la potencialidad de ~os geoestadísticos en áreas prospectivas. Estudios de esta naturaleza permitirían generar mapas de intensidad de la anomalía, entre otras propiedades magnéticas, como información pozo a pozo, los cuales ayudarían a caracterizar el reservorio en superficie.

## Bibliografía

Benthien, R.H., Elmore, R.D., Origin of magnetization in the Phosphoria Formation at Sheep Mountain, Wyoming: a

possible relationship with hydrocarbons, *Geophysics Research Letters*, 14, 323-326, 1987

Donovan, T.J., Forgy, R.L., Roberts, A.A., Aeromagnetic detection of diagenetic magnetite over oil fields, *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 63, 245-248, 1979

Donovan, T.J., Hendricks, J.D., Roberts, A.A., Eliason, P.T., Low-altitude aeromagnetic reconnaissance for petroleum in the Artic National Wildlife Refuge, Alaska, *Geophysics*, 49, 1338-1353, 1984

Elmore, R.D., Engel, M.H., Crawford, L., Nick, K., Imbus, S., Sofer, S., Evidence for a relationship between hydrocarbons and authigenic magnetite, *Nature*, 325, 428-430, 1987

Foote, R.S., Use of magnetic fields aids oil search, *oil & Gas Journal*, 4, 137-141, 1992

Kiser, G.D., Relaciones estratigráficas de la Cuenca Apure/Llanos con áreas adyacentes, Venezuela Suroeste y Colombia oriental Monografía I, *Sociedad Venezolana de Geólogos*, 1989

Lowrie, W., Identification of ferromagnetic minerals in a rock by coercivity and unblocking temperature properties, *Geophysical Research Letters*, 17, 159-162, 1990

McCabe, C., Sassen, R., Saffer, B., Occurrence of secondary magnetite within biodegraded oil, *Geology*, 15, 7-10, 1987



Machel, H.G., Burton, E.A., Chemical and microbial processes causing anomalous magnetization in environments affected by hydrocarbon seepage, *Geophysics*, 56, 598-605, 1991

Reynolds, R.L., Post-depositional alteration of titanomagnetite in a Miocene sandstone, south Texas (USA), *Earth and Planetary Science Letters*, 61, 381-391, 1982

Saunders, D.F., Burson, K.R., Thompson, C.K., Observed relation of soil magnetic susceptibility and soil gas hydrocarbon analyses to subsurface hydrocarbon accumulations, *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 75, 389-408, 1991

## Reconocimientos

Quisiéramos agradecer a PDVSA Exploración, anteriormente Corpoven, S.A., por haber financiado este proyecto, suministrar las muestras e información de los pozos estudiados. Quisiéramos agradecer muy especialmente a Pable Frías y Andrés Patiño, del Instituto de Ingeniería, por los análisis de TEM y SEM. A Wyn Williams y Oscar Mirón le agradecemos por los resultados de termoremanencia aportados. Lourdes Colmenares cedió gentilmente el resultado de SEM correspondiente al pozo Lvt-1x, incluido en su trabajo especial de grado.





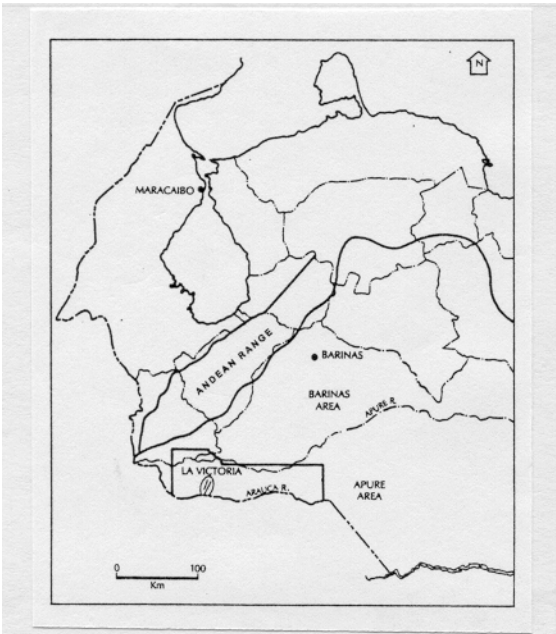


Figura 1.- Mapa de ubicación del área de estudio

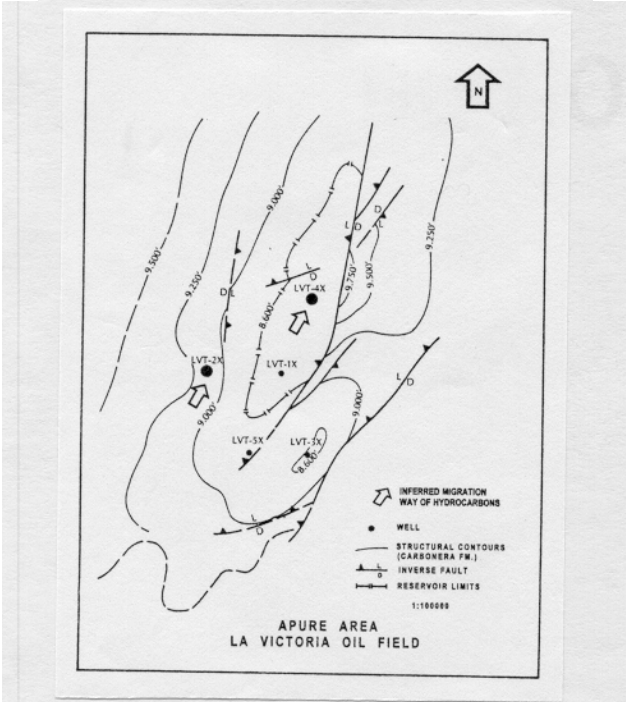
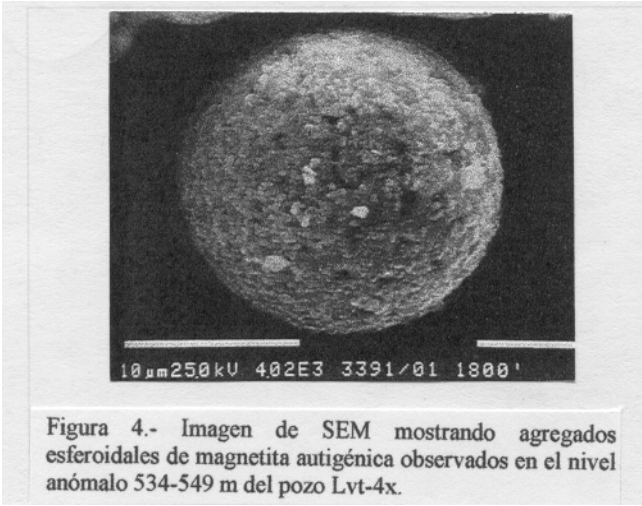
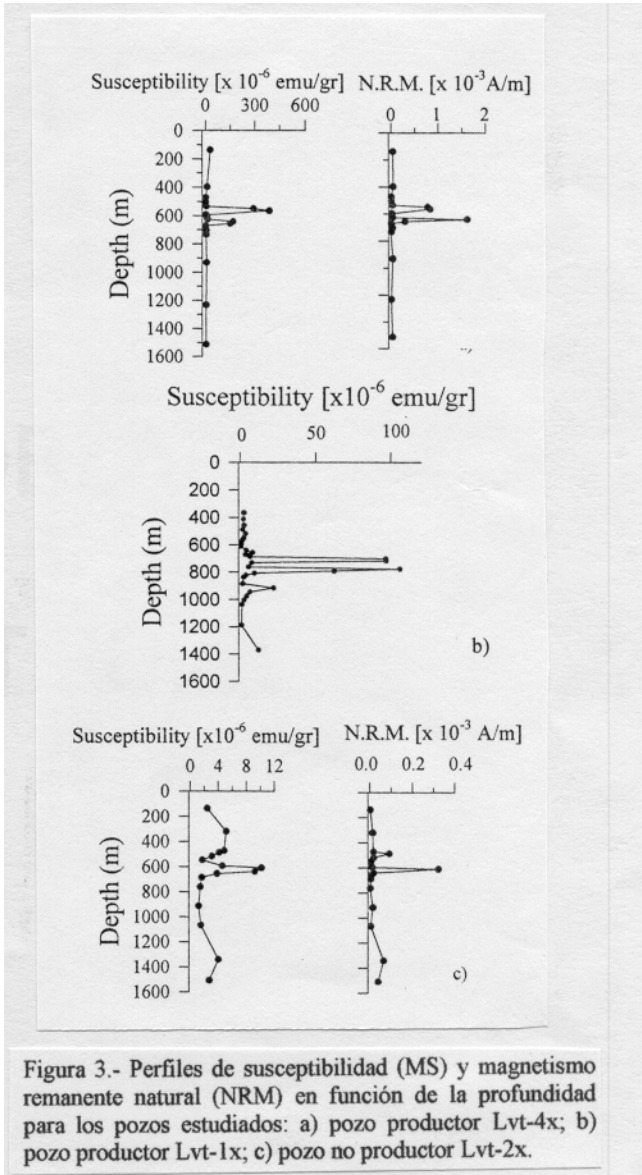


Figura 2.- Mapa estructural del campo La Victoria (modificado de Chigné (1985)), mostrando la localización de los pozos Lvt-1x, Lvt-2x y Lvt-4x. Se muestra también la ruta de migración inferida.



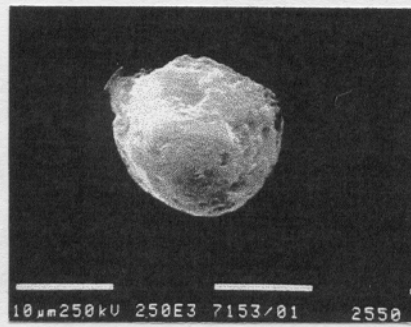


Figura 5.- Imagen de SEM mostrando agregados esferoidales de magnetita autigénica observados en el nivel anómalo 765-780 m del pozo Lvt-1x.

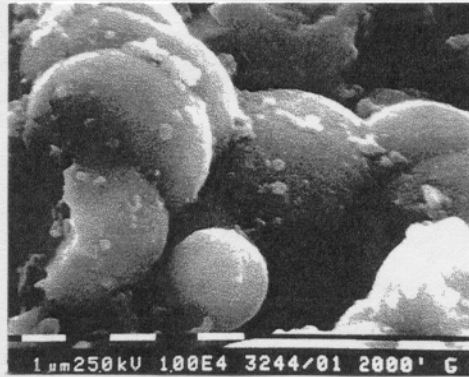


Figura 6.- Imagen de SEM mostrando agregados esferoidales de magnetita autigénica observados en el nivel anómalo 610-625 m del pozo Lvt-2x.

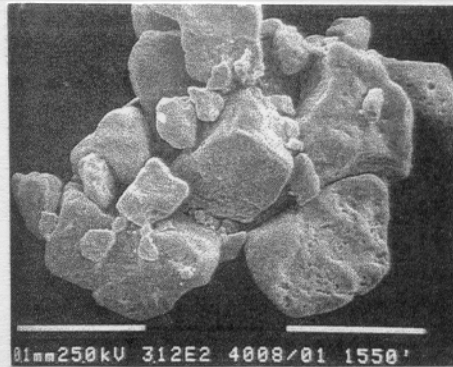
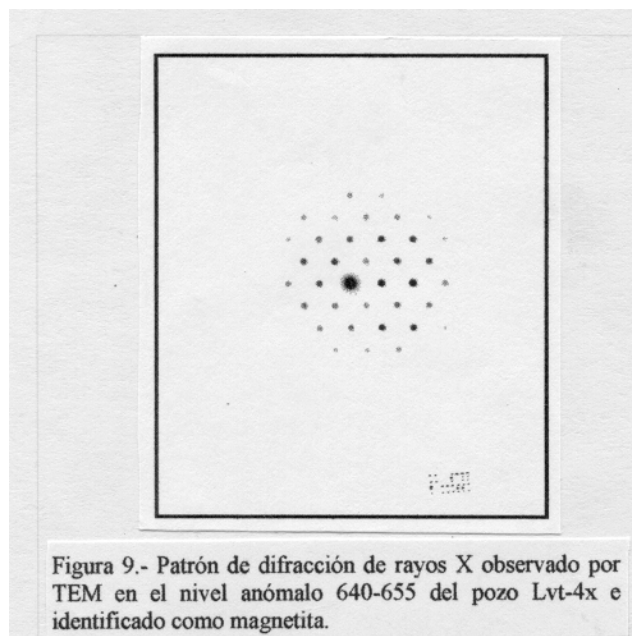
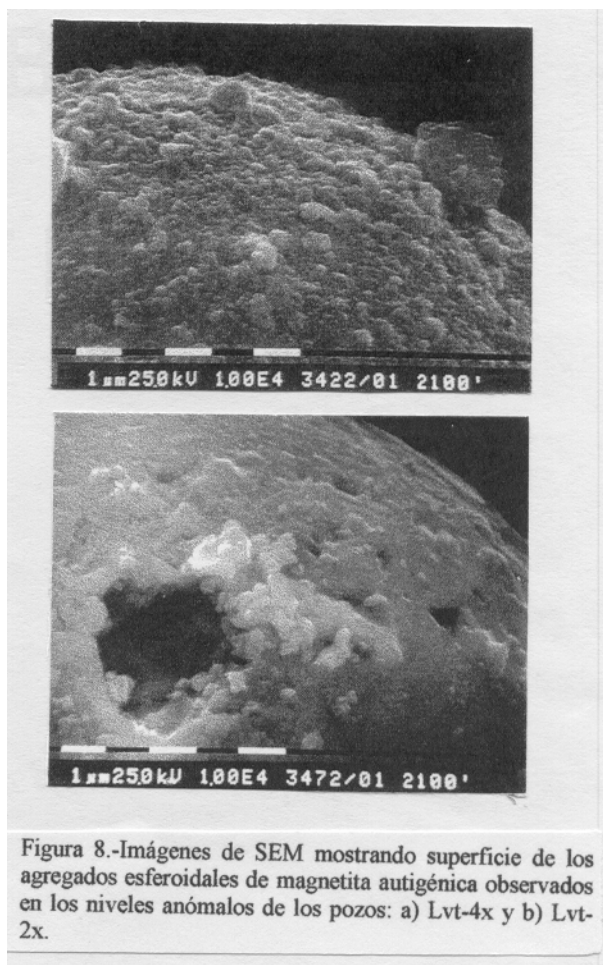


Figura 7.- Imagen de SEM mostrando conglomerado de minerales magnéticos observados en el nivel no anómalo 457-472 m del pozo Lvt-4x.





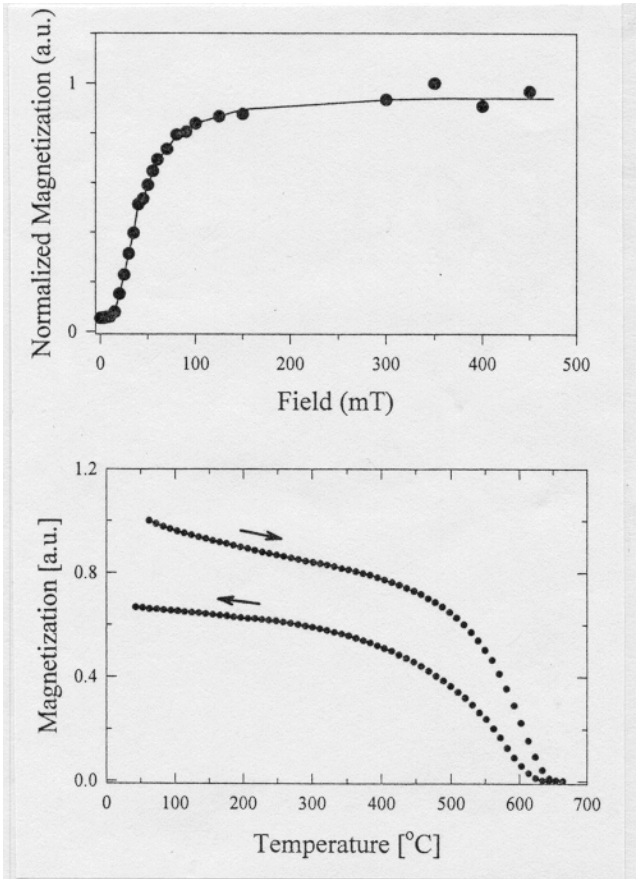


Figura 10.- Curvas de IRM y termoremanencia correspondientes al intervalo anómalo 625-640 m del pozo Lvt-4x.

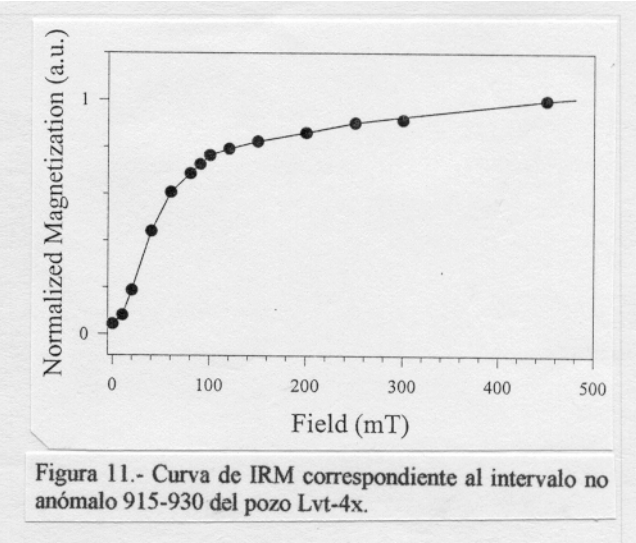


Figura 11.- Curva de IRM correspondiente al intervalo no anómalo 915-930 del pozo Lvt-4x.



