

INTRODUCCIÓN

El campo magnético de la tierra ha cambiado con el tiempo, tanto en polaridad como en dirección e intensidad. Ésas son las características del campo magnético terrestre que se graban en las rocas cuando éstas se forman.

# Las Rocas como Brújulas Fósiles

Gloria ■ María ■ Sierra

Los que tienen que ver con la evolución de la tierra, de sus continentes o de sus montañas que luego pueden ser utilizados en la exploración del petróleo, en la prospección de depósitos minerales en la evaluación del riesgo volcánico y en muchas otras áreas. El paleomagnetismo es la ciencia que estudia el magnetismo fósil grabado en las rocas.

El paleomagnetismo ha tenido una participación decisiva en conceptos que han revolucionado el conocimiento geológico. Permite identificar el patrón de anomalías magnéticas observadas en el fondo del mar que luego contrastadas en forma independiente el concepto de la expansión de los fondos oceánicos; también permitió conocer las posiciones geográficas de los continentes en tiempos pasados y cuantificar el concepto de la tectónica de placas. Más recientemente los estudios paleomagnéticos dieron vida a un concepto nuevo y revolucionario: la tectónica

de placas. Este concepto revolucionario ha permitido explicar el origen de las montañas, la formación de los continentes y la evolución de la tierra. El paleomagnetismo es la ciencia que estudia el magnetismo fósil grabado en las rocas. Los que tienen que ver con la evolución de la tierra, de sus continentes o de sus montañas que luego pueden ser utilizados en la exploración del petróleo, en la prospección de depósitos minerales en la evaluación del riesgo volcánico y en muchas otras áreas. El paleomagnetismo es la ciencia que estudia el magnetismo fósil grabado en las rocas.

al polo sur y cuyo eje no coincide exactamente con el eje terrestre. Se acepta que el campo magnético terrestre se atribuye al núcleo central del núcleo terrestre que tendría una fuerte imantación de tipo ferromagnético. Aunque todavía están por definir las causas, es ya conocido que la orientación y la intensidad del campo magnético terrestre siempre ha sido la que hoy por hoy por lo contrario durante mas o menos la mitad de la historia de la tierra el norte magnético actual ha estado dirigido hacia el que hoy se conoce como sur magnético. El magnetismo en las rocas está inscrito en unos pocos minutos dentro de los cuales los más importantes son aquellos en cuya composición están presentes los

Las rocas pueden grabar algunas de las características del campo magnético terrestre existente en el momento de su formación; su lectura e interpretación en términos que permitan descifrar eventos geológicos significativos es el objetivo de un importante campo de la geología: **el paleomagnetismo**. En general, nuestro planeta se comporta como un gigantesco imán cuyo campo constituye el campo magnético terrestre. El origen del mismo está lejos de ser completamente esclarecido. En una primera aproximación es idéntico al de un dipolo situado en el centro de la tierra, orientado del polo Norte

Gloria María Sierra Lopera. Ingeniera Geóloga, Universidad Nacional sede Medellín. MA. en Geología en State University of New York. Profesora del departamento de Geología Universidad EAFIT.

al polo Sur y cuyo eje no coincide exactamente con el eje terrestre. Se acepta que el campo magnético terrestre se atribuye al cuerpo central del núcleo terrestre que tendría una fuerte imantación de tipo ferromagnético. Aunque todavía están por definir las causas, es ya conocido que la orientación y la intensidad del campo magnético terrestre no siempre ha sido la que hoy presenta y por el contrario durante mas o menos la mitad de la historia de la tierra el norte magnético actual ha estado dirigido hacia el que hoy se conoce como sur magnético. El magnetismo en las rocas está inscrito en unos pocos minerales dentro de los cuales los más importantes son aquellos en cuya composición están presentes los óxidos de hierro y titanio, como por ejemplo la magnetita y la hematita.

**El magnetismo en las rocas está inscrito en unos pocos minerales dentro de los cuales los más importantes son aquellos en cuya composición están presentes los óxidos de hierro y titanio, como por ejemplo la magnetita y la hematita.**

El paleomagnetismo es una herramienta que permite determinar la edad relativa de una Formación geológica, realizar correlaciones entre diferentes formaciones; localizar geográficamente los continentes en el pasado geológico además de la definición de latitudes de origen y posterior evolución de terrenos alóctonos; el paleomagnetismo es utilizado para la evaluación de movimientos relativos de fallas, la estimación de depósitos minerales y en la arqueología entre otras áreas. En Colombia ya se han realizado investigaciones paleomagnéticas con resultados que demuestran que esta técnica podría ayudar a resolver una gran cantidad de problemas prácticos que nuestro conocimiento geológico aún no ha resuelto.

## INTRODUCCIÓN

El campo magnético de la tierra ha cambiado con el tiempo, tanto en polaridad como en dirección e intensidad. Esos cambios no son cíclicos, no tienen una duración determinada y han afectado a la tierra desde hace varios centenares de millones de años. Las rocas tienen la capacidad de grabar algunas de las características del campo magnético existente en el momento de su formación y los geólogos tienen la posibilidad de leer ese magnetismo fósil impreso en las rocas.

A partir de dicha lectura se pueden descifrar aspectos que tienen que ver con la evolución de la tierra, de sus continentes o de sus montañas que luego pueden ser utiliza-

dos en la exploración del petróleo, en la prospección de depósitos minerales en la evaluación del riesgo volcánico y en muchas otras áreas. El **paleomagnetismo** es la ciencia que estudia el magnetismo fósil inscrito en las rocas.

El paleomagnetismo ha tenido una participación decisiva en conceptos que han revolucionado el conocimiento geológico. Permitió identificar el patrón de anomalías magnéticas observadas en el fondo del mar que luego confirmarían en forma independiente el concepto de la expansión de los fondos oceánicos; también permitió conocer las posiciones geográficas de los continentes en tiempos pasados y cuantificar el concepto de la tectónica de placas. Más recientemente los estudios paleomagnéticos dieron vida a un concepto nuevo y revolucionario: la existencia

de bloques o terrenos que se han desplazado grandes distancias y luego se detienen, causando el crecimiento de los continentes o el comienzo mismo de éstos. Este artículo tiene como objeto introducir al lector al campo del paleomagnetismo de sus aplicaciones a la solución de problemas geológicos; se resumen los trabajos más importantes que en este campo se han realizado en Colombia.

### CARACTERÍSTICAS DEL CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE Y SU ORIGEN

La aguja de una brújula inmóvil, después de oscilar, se orienta siempre en una misma dirección. El campo magnético terrestre representa un vector con una dirección y una magnitud definidas: la dirección está dada por la orientación de la aguja y la magnitud por el grado de oscilación que la aguja tenga antes de detenerse, más amplia para los campos más intensos. Por convención, la cabeza de ese vector apunta hacia el norte y el otro extremo hacia el sur, **Figura 1**.

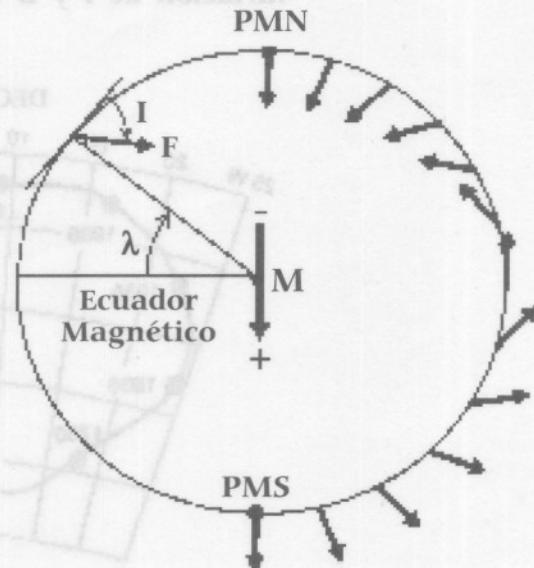
**FIGURA 1**  
Una aguja de una brújula simple apunta en la misma dirección del vector del campo geomagnético. F indica la dirección del campo magnético terrestre.



El vector magnético es horizontal solamente en el Ecuador; hacia el norte o hacia el sur se inclina hacia adelante o hacia atrás (positiva o negativamente), dando lugar a lo que se conoce como **inclinación magnética** (**Figura 2**). De hecho el polo norte magnético es definido como el punto de la superficie de la tierra donde el vector magnético tiene una inclinación de  $+90^\circ$  mientras que en el polo sur magnético el vector magnético tiene una inclinación de  $-90^\circ$ , (**Figura 2**); por este motivo las agujas de las brújulas que se usan en latitudes distantes del ecuador normalmente tiene un pequeño dispositivo para corregir su inclinación; si no se hiciera esta corrección la aguja pegaría contra el vidrio y no rotaría libremente.

**FIGURA 2**  
Dipolo magnético M al centro del círculo produce campos F mostrando a lo largo del círculo. I: inclinación magnética.

$\lambda$ : latitud magnética.  
PMN: polo magnético norte.  
PMS: polo magnético sur.



La aguja de una brújula apunta directamente al norte magnético, que coincide con el polo magnético, pero que es distinto al norte geográfico, el cual está alineado con el eje de rotación de la tierra, (Figura 3). El polo magnético se mueve alrededor del polo geográfico en forma irregular con variaciones en el tiempo que oscilan entre los 100 y los 10.000 años y que producen lo que se llama *variaciones seculares* del campo magnético, (Figura 4).

FIGURA 3

El círculo representa un corte transversal de la tierra. El campo magnético terrestre tiene su mejor representación en un dipolo geocéntrico inclinado con respecto al eje vertical. Los polos y el Ecuador geográfico no coinciden con los polos y el Ecuador magnético. (Butler, 1992)

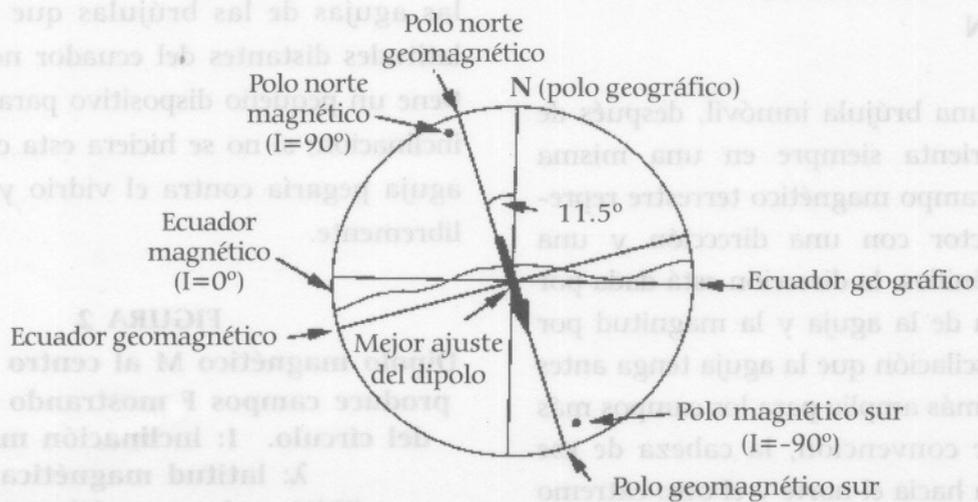
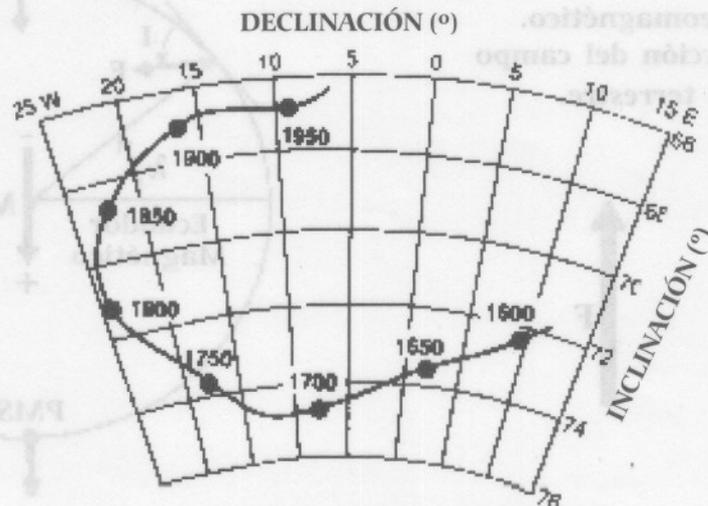


FIGURA 4

Variación de I y D en Inglaterra (Butler, 1992).



El paleomagnetismo es una herramienta que permite determinar la edad relativa de una formación geológica, realizar correlaciones entre diferentes formaciones; localizar geográficamente los continentes en el pasado geológico además de la definición de latitudes de origen y posterior evolución de terrenos alóctonos.

Un aspecto crítico con respecto a las propiedades del campo magnético terrestre es el hecho de que no siempre ha tenido la orientación que hoy se conoce. Durante más o menos la mitad de la historia de la tierra ha estado dirigido hacia el actual sur magnético. Se conocen como inversiones de polaridad magnética los cambios que se han dado de un período de polaridad normal (cuando la aguja se orienta hacia el norte magnético de hoy) a una polaridad inversa (cuando la aguja se dirige al sur magnético de hoy).

## ORIGEN DEL CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE

De acuerdo con la velocidad con la que se propagan las ondas sísmicas en el interior de la tierra, ésta se ha dividido en tres secciones que son concéntricas: el núcleo en la parte más interna, la astenosfera y la litosfera. Es generalmente aceptado que la parte más externa del núcleo, esta compuesto por un material conductor (Fe, Ni, principalmente), es parcialmente líquida; todas las teorías modernas suponen que el movimiento de este material es suficiente para generar el campo magnético que hoy se conoce. Aunque matemáticamente es posible explicar las inversiones del campo magnético, todavía no se sabe

a ciencia cierta como ocurre este fenómeno (Hailwood, 1989).

## ¿CÓMO GUARDAN LAS ROCAS EL CAMPO MAGNÉTICO?

El magnetismo en los minerales (compuesto químico cristalizado naturalmente) es producido por el momento generado por los electrones de ciertos elementos cuando giran alrededor del núcleo. Los átomos de hierro y en menor cantidad de níquel y cobalto son los principales elementos que tienen propiedades magnéticas.

Hay minerales que sin tener elementos con momentos magnéticos pueden, en respuesta a la aplicación de un campo magnético externo, adquirir un pequeño magnetismo inducido con dirección opuesta al campo externo. Estos minerales, como por ejemplo el cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) y las plagioclasas ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$  -  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ), se conocen como minerales **diamagnéticos** y su magnetismo inducido desaparece cuando el campo externo es cero.

Hay minerales que teniendo átomos con momentos magnéticos no tienen inicialmente propiedades magnéticas debido a la distribución errática de esos momentos. Si estos minerales, como piroxenos [ $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$ ], biotita ( $(\text{K,Mg,Fe})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ), granate [ $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_{12}$ ], cordierita [ $\text{Mg}_2\text{Al}_3\text{Si}_5\text{O}_{18}$ ] y anfíboles [ $\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ ], se encuentran en presencia de un campo externo, adquieren una magnetización inducida que es paralela al campo aplicado. A estos minerales se les conoce como minerales **paramagnéticos**.

Contrariamente a lo que ocurre con los minerales paramagnéticos, hay minerales cuyos

átomos con momentos magnéticos no tienen distribución errática; por el contrario sus momentos interactúan de tal forma que se suman y producen una magnetización que puede tener una magnitud mucho mayor que la de los minerales paramagnéticos en presencia de un campo magnético similar. A estos minerales se les llama **ferromagnéticos** y en general son aquellos en cuya composición están presentes óxidos de hierro y titanio como lo son las series magnetita-ulvoespínela ( $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-Fe}_2\text{TiO}_4$ ) y hematita-ilmenita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-FeTiO}_3$ ).

El magnetismo adquirido por las rocas ígneas es conocido como **Magnetización Termorremanente** no se debe al alineamiento de cristales magnéticos. La magnetización de estas rocas es un proceso que ocurre en estado sólido: aunque la orientación de los granos magnéticos permanece fija, la orientación de los momentos magnéticos cambia. Si se calienta un pedazo de roca a unos  $600^\circ\text{C}$  (la roca todavía está en el estado sólido) y se mide su magnetización se verá que ésta es nula debido a que los minerales magnéticos presentes han sobrepasado una temperatura crítica por encima de la cual no se adquiere ni se retiene magnetismo alguno (la temperatura en la cual el mineral pierde su magnetización es llamada temperatura de Curie). La magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), por ejemplo, tiene una temperatura de Curie de  $580^\circ\text{C}$  pero ésta puede bajar si dentro de la composición del mineral se incrementa el contenido de titanio. Si la roca que se ha calentado comenzara a enfriarse y se midiera la magnetización adquirida, se vería que entre  $580^\circ\text{C}$  y  $550^\circ\text{C}$  aproximadamente la roca se volvería fuertemente magnética y el magnetismo adquirido tendría una dirección que

correspondería con la dirección del campo externo aplicado. La mayor parte de las rocas ígneas se comporta en forma semejante; adquieren gran parte del magnetismo inmediatamente debajo de la temperatura de Curie y tienen la capacidad de conservarlo por varios millones de años siempre y cuando la roca no sea recalentada o alterada químicamente. En las rocas ígneas los granos permanecen fijos, mientras que los momentos magnéticos cambian y se alinean de acuerdo con el campo magnético externo.

El mecanismo de magnetización de las rocas sedimentarias, formadas a partir de la acumulación de fragmentos de roca, es completamente diferente al caso de las rocas ígneas, formadas a partir de un magma o de una lava.

En las rocas sedimentarias, conformadas por granos de diversas composiciones, se estima que apenas uno de cada 1000 está fuertemente magnetizado. Los granos más pequeños que  $1/16$  mm se comportan como imanes de tal forma que a medida que se van depositando se van orientando de acuerdo con el campo magnético externo. Los granos más grandes se orientan en forma errática por la turbulencia del agua y por la rapidez con la que se sedimentan. El registro del campo magnético en las rocas sedimentarias y conocido como **Magnetismo Remanente Depositional** queda guardado definitivamente una vez que la roca ha liberado el agua intersticial y los granos se han acomodado de tal forma que no puedan rotar. Bajo condiciones ideales este magnetismo puede ser conservado por millones de años.

Ciertas rocas de la corteza terrestre tienen en su composición minerales magnéticos que son producto de procesos químicos ocurridos durante su génesis o bien durante procesos geológicos posteriores y que son portadores de remanencias magnéticas adquiridas durante tales procesos, las cuales pueden ser muy estables a través del tiempo. Así, las rocas sedimentarias y los suelos y particularmente los llamados suelos rojos (lateritas) suelen contener óxidos de hierro formados químicamente a temperatura ambiente, ya sea durante su depositación o bien por otro proceso geológico, por la circulación y filtración de fluidos de composición adecuada. Estos óxidos de hierro pueden presentarse como cristales o bien como matriz o cemento entre las rocas sedimentarias. Además, las rocas cuando afloran en superficie están sometidas a los procesos de meteorización, en los cuales se originan o modifican químicamente minerales magnéticos. Durante todos estos procesos, los minerales magnéticos así formados adquieren un magnetismo bajo los efectos ordenadores del campo magnético terrestre, al que se conoce con el nombre de **Magnetismo Químico Remanente**.

## MEDIDA DEL MAGNETISMO

Luego de que la roca se ha formado y que el magnetismo existente en el momento de su formación (magnetismo primario) ha sido grabado, muchos hechos pueden alterar ese registro a lo largo de los millones de años de historia geológica. El objetivo del trabajo de laboratorio consiste normalmente en aislar el magnetismo primario de cualquier otro magnetismo que haya podido sobreimponerse. No siempre, sin embargo, el magnetismo

secundario es indeseable y en algunos casos puede convertirse en objetivo de investigación como se verá más adelante.

Las muestras para estudios paleomagnéticos deben tomarse siempre orientadas con la brújula magnética o para mayor seguridad con una brújula solar (con frecuencia los afloramientos pueden tener un magnetismo suficientemente alta como para desviar la brújula). El número de muestras que se toma en cada afloramiento y en cada unidad de roca investigada debe ser lo suficientemente grande como para poder realizar los análisis estadísticos necesarios.

En el laboratorio el magnetismo remanente de las rocas se mide con un magnetómetro. El magnetismo primario no siempre es recuperable en una roca e incluso con frecuencia es imposible recuperarlo; normalmente se aísla de cualquier otro magnetismo sobreimpuesto por procesos posteriores calentando la muestra en ausencia de un campo magnético externo de tal forma que diferentes minerales sean sometidos a temperaturas superiores a sus puntos de Curie (someter las rocas a los efectos de un campo alterno tiene los mismos efectos). La lectura del magnetismo remanente a diferentes temperaturas de enfriamiento permite eliminar cualquier magnetismo sobrepuesto y el resultado final es el aislamiento del magnetismo remanente primario.

## APLICACIONES DE LOS ESTUDIOS PALEOMAGNÉTICOS

El paleomagnetismo tiene un amplio campo de aplicación en la investigación geológica;

se aplica en la determinación de edades relativas de una formación y en correlaciones estratigráficas (magnetoestratigrafía), en la localización geográfica de los continentes en el pasado geológico (desplazamiento continental), en la definición de las latitudes de origen y posterior evolución de terrenos alóctonos, y en la evaluación de movimientos relativos de fallas; también tiene aplicación en arqueología y en la evaluación de depósitos minerales, entre otras.

El uso del paleomagnetismo en la determinación de edades y en correlaciones estratigráficas se basa en el hecho de que el campo magnético no es un fenómeno superficial de tipo local, ya que se origina en el núcleo del planeta y la aparición de las inversiones afecta en forma global a todas las rocas de la misma edad. Los estudios de las inversiones magnéticas en una secuencia de rocas de edad desconocida se comparan con estudios similares de una secuencia de edad conocida; el análisis de los resultados permite efectuar correlaciones y edades relativas.

Los estudios de tectónica de placas y evolución de terrenos se basan en la relación que existe entre la inclinación del vector magnético y las latitudes de formación de las rocas. Si una roca o unidad se formara en el ecuador, el vector magnético sería horizontal; si la misma roca se formara al norte o al sur del ecuador, el vector se inclinaría positiva o negativamente. En esta área los estudios paleomagnéticos determinan la inclinación del vector magnético con el que se definen las paleolatitudes de formación o de origen de la roca o unidad estudiada. Ejemplos importantes de este tipo

de investigaciones se encuentra en los estudios hechos sobre la evolución de la India y de Alaska y en Colombia sobre la de la isla Gorgona (Estrada, 1995).

Para determinar el movimiento relativo de fallas el paleomagnetismo se estudian las rotaciones de los vectores magnético tanto primarios como secundarios. Conociendo la edad de las rocas analizadas se determina la dirección del vector que debería estar inscrito en éstas, suponiendo que ningún fenómeno externo las hubieran afectado. Las diferencias entre los datos obtenidos y los que el estudio paleomagnético de la roca defina se utilizan en la interpretación de los movimientos relativos de las fallas.

**El paleomagnetismo tiene un amplio campo de aplicación en la investigación geológica; se aplica en la determinación de edades relativas de una formación y en correlaciones estratigráficas (magnetoestratigrafía), en la localización geográfica de los continentes en el pasado geológico (desplazamiento continental), en la definición de las latitudes de origen y posterior evolución de terrenos alóctonos, y en la evaluación de movimientos relativos de fallas; también tiene aplicación en arqueología y en la evaluación de depósitos minerales, entre otras.**

En arqueología se estudia el magnetismo primario o secundario del objeto que se estudia (ladrillos, vasijas, etc.) inducido durante la cocción. Comparando el vector magnético inscrito en el objeto con las variaciones seculares del campo magnético terrestre es posible trazar el origen y edad del objeto arqueológico.

## ESTUDIOS PALEOMAGNÉTICOS EN COLOMBIA

La mayor parte de los estudios paleomagnéticos en Colombia han sido de reconocimiento y tratan de evaluar, generalmente con pocas muestras, la presencia del magnetismo remanente primario. Muchos de estos no pasaron de la fase preliminar pero demostraron que hay unidades de roca con un magnetismo remanente primario lo suficientemente claro como para que se continúen investigaciones con aplicación en tectónica y estratigrafía. Algunos de estos estudios incluyen el trabajo de Creer (1970) en los estratos rojos del Jurásico de la Formación Girón; de MacDonald y Opdyke (1974a) en riolitas (Jurásico) y dioritas (cretáceas) en la Península de la Guajira; de Scott (1978) estudió los sedimentos triásicos de la Formación Luisa y sugirió que al menos parte de la Cordillera Central ha tenido un desplazamiento hacia el norte de unos  $25^\circ$  con una rotación de  $90^\circ$ ; de MacDonald y Opdyke (1984b) en estratos rojos y rocas volcánicas jurásicas de la Sierra Nevada; de Hargraves y otros (1984) en riolitas y andesitas cretáceas del Macizo de Santander; Espinosa y otros (1986) en las rocas básicas Cretáceas del Grupo Diabásico.

La mayor parte de los estudios paleomagnéticos en Colombia han sido de reconocimiento y tratan de evaluar, generalmente con pocas muestras, la presencia del magnetismo remanente primario. Muchos de estos no pasaron de la fase preliminar pero demostraron que hay unidades de roca con un magnetismo remanente primario lo suficientemente claro como para que se continúen investigaciones con aplicación en tectónica y estratigrafía.

MacDonald (1980) y posteriormente Estrada (1995) estudiaron una serie de cuerpos intrusivos (Mioceno tardío) de composición andesítica que afloran a lo largo de la cuenca del río Cauca al norte del municipio de la Virginia, con resultados similares en ambos estudios; que indican que las declinaciones son paralelas a la zona de falla de Romeral y las inclinaciones se encuentran dispersas en un plano vertical. Estrada (1995) sugirió rotaciones no coherentes a lo largo de un eje horizontal y coherentes al rededor de un eje vertical que ocurrieron durante períodos de alta presión de bloques acrecionados a lo largo de una zona marcada en el presente por la zona de falla de Romeral.

Estrada (1995) estudió las paleolatitudes de origen de las rocas básicas de la parte norte de la Cordillera Occidental, la Serranía de Baudó y la Isla Gorgona. De su investigación se concluye que contrariamente a lo sugerido en estudios previos (Gansser, 1950; Goossens y Rose, 1973) la Isla Gorgona no es la continuación al sur de la Serranía de Baudó. Mientras la Serranía de Baudó muestra paleolatitudes de origen cercanas al Ecuador la isla Gorgona se formó a unos  $25^\circ$  de latitud sur al frente de las costas de Chile; de esta forma la isla Gorgona parece haberse movido hacia el norte alrededor de 3100 km desde el Cretáceo temprano. Estos resultados también contradicen las correlaciones que se hacen entre la roca de la Isla Gorgona, la placa Caribe y un posible origen de esta isla en el punto caliente de la Isla Galápagos. El estudio paleomagnético de Gorgona sugiere que la isla se acrecionó al continente al sur cerca al Ecuador, (probablemente antes de Mioceno temprano) y que posteriormente se desplazó hacia el norte

por presión. Las rocas de la Cordillera Occidental parecen haberse formado en paleolatitudes cercanas al ecuador con evidencias que sugieren que son diferentes a las rocas de la Serranía de Baudó.

### ALCANCE DE LOS ESTUDIOS DE PALEOMAGNETISMO EN LAS ROCAS SEDIMENTARIAS TERCIARIAS DE LA CUENCA DE IRRA

Como se describió anteriormente, en el momento de la cristalización de las rocas ígneas y la sedimentación en las rocas sedimentarias, la orientación del campo magnético terrestre presente es conservada por los minerales magnéticos que hacen parte de la roca. Durante los millones de años siguientes a la formación, otros campos magnéticos generados posteriormente se superponen al magnetismo primario. Aunque para efectos del estudio de las latitudes de origen de un terreno este magnetismo superpuesto puede llegar a ocultar completamente el magnetismo primario, en muchos casos las direcciones de estas componentes magnéticas secundarias pueden utilizarse para descifrar eventos geológicos ocurridos posteriormente a la formación de la roca.

Un ejemplo de la utilización de la orientación de las componentes de magnetización primarias y secundarias se encuentra en el estudio (Sierra (1994); Sierra et.al (1995)) de los sedimentos terciarios de la cuenca de Irra; éstos se analizaron originalmente para evaluar las direcciones de flujo de los sedimentos volcanoclásticos, pero los resultados también permitieron descifrar movimientos relativos de las fallas que limitan la cuenca.

Sierra (1994) encontró dos componentes de magnetización: Una componente con polaridades normales e inversas conservada por minerales con bajas temperaturas de Curie (baja coercividad) que se superpone a una componente conservada por minerales con altas temperaturas de Curie (alta coercividad) que también presenta polaridades normales e inversas. Sierra (1994) concluyó que la componente de baja coercividad se formó antes del plegamiento y que la de alta coercividad se formó después del plegamiento de la misma secuencia.

Tomando los datos paleomagnéticos en conjunto con las observaciones de las estructuras geológicas, Sierra et. al (1995) interpretaron la evolución de la cuenca durante los últimos 5 millones de años mediante al menos cuatro cambios de movimiento relativo de las fallas del sistema Romeral:

1. La cuenca de Irra se formó sobre un **"right step-over"** durante un movimiento lateral derecho del sistema de Fallas de Romeral.
2. La cuenca de Irra se deformó y plegó durante un movimiento lateral izquierdo.
3. La componente magnética se correlaciona con un movimiento lateral derecho, que en el campo se manifiesta en pequeñas fallas normales asociadas a tobas.
4. La actividad sísmica actual en la zona de falla de Romeral indica un movimiento lateral izquierdo.

Otros cambios de movimiento relativo de la zona de Falla de Romeral anteriores a los

arriba descritos son factibles pero no fueron identificados en este estudio. Estos resultados indican las múltiples fases de evolución de una falla y abren un amplio campo de investigación no solamente para la zona de falla de Romeral mismo sino para sistemas de fallas similares.

## CONCLUSIONES

El paleomagnetismo como herramienta en geología se puede aplicar al estudio de las rocas ígneas, sedimentarias y aun metamórficas. Las observaciones paleomagnéticas se fundamentan en la recolección de datos estadísticamente analizados que permitan la evaluación de fenómenos en forma más cuantitativa que descriptiva. A través de esta técnica se puede obtener información en las rocas que de otra forma no podría observarse.

**El paleomagnetismo puede verse como una técnica extraña, de difícil entendimiento y de limitada aplicación, que sólo se utiliza en países desarrollados. La realidad es que paleomagnetismo es una técnica que podría ayudar a resolver una gran cantidad de problemas prácticos que nuestro conocimiento geológico aun no ha resuelto; con limitados recursos económicos se puede realizar el montaje de un laboratorio que con un correcto entrenamiento podría ser utilizado por cualquier geólogo.**

El paleomagnetismo ha demostrado ser una herramienta importante en la datación y correlación de secuencias estratigráficas, en el estudio de la evolución de continentes y terrenos geológicos, en la evaluación de direcciones de flujo en rocas sedimentarias y volcánicas, en el análisis de movimientos

relativos de fallas, y en muchos otros aspectos que tiene que ver con la mineralogía, la petrología, la arqueología, etc.

En Colombia los pocos estudios paleomagnéticos realizados han demostrado lo valioso de la técnica y el potencial que ésta tiene en la solución de problemas geológicos importantes.

El paleomagnetismo puede verse como una técnica extraña, de difícil entendimiento y de limitada aplicación, que sólo se utiliza en países desarrollados. La realidad es que paleomagnetismo es una técnica que podría ayudar a resolver una gran cantidad de problemas prácticos que nuestro conocimiento geológico aun no ha resuelto; con limitados recursos económicos se puede realizar el montaje de un laboratorio que con un correcto entrenamiento podría ser utilizado por cualquier geólogo.

## REFERENCIAS

- Butler, R.F. (1992). *Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes*. Blackwell Scientific Publications. Oxford. 319 p.
- Creer, K.M. (1970). A paleomagnetic survey of South American rocks formation: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 267, p. 534 - 551.
- Estrada, J.J. (1995). *Paleomagnetism and accretion events in the Northern Andes*. PhD thesis, Department of Geological Sciences, State University of New York, N.Y. 172 p.
- Espinosa, A., Hadley, I., and Wagner, J.J. (1986). *Paleomagnetism reconnaissance of the Grupo Diabásico Western Andes (Colombia): Geología Colombiana*, n. 15, p. 149 - 153.

- Gansser, A. (1950). Geological and petrographical notes on Gorgona Island in relation to northwestern South America: Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen, v. 30, p. 219 - 236.
- Goossens, P.J., and Rose, W.J. (1973). Chemical composition and age determination of tholeiitic rocks in the Basic Igneous Complex, Ecuador: Geological Society of America Bulletin, v. 84, p. 1043 - 1052.
- Hargraves, R.B., Shagan, R., Vargas, R., and Rodriguez, G.I. (1984). Paleomagnetic result from rhyolites (Early Cretaceous?) and andesitic dikes from two localities in the Ocaña area, Northern Santander Massif, Colombia. In Bonini, W. E., Hargraves, R.B., Shagan, R., The Caribbean - South American Plate Boundary and Regional tectonics. Geological Society of America Memoir 162, p. 299 - 302.
- Hailwood, E.A. (1989). Magnetostratigraphy: Geological society Special Report #19. Blackwell Scientific Publications, Oxford. 85 p.
- MacDonald, W.D. (1980). Anomalous paleomagnetic direction in late Tertiary andesitic intrusions of the Cauca depression, Colombia Andes: Tectonophysics, v.68, p. 339 - 348.
- MacDonald, W.D., and Opdyke, N. (1974a). Triassic paleomagnetism of Northern South America: The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v. 58. p. 208 - 215.
- MacDonald, W.D., and Opdyke, N. (1984b). Preliminary paleomagnetic result from Jurassic rocks of the Santa Marta Massif, Colombia. In Bonini, W. E., Hargraves, R.B., Shagan, R., The Caribbean - South American Plate Boundary and Regional Tectonics. Geological Society of America Memoir 162, p. 295 - 298.
- Scott, G.R. (1978). Translation of Accretionary Slivers: Triassic Results from the Central Cordillera of Colombia (abstract): Earth and Planetary Geophysical Union, v. 59, p. 1058 - 1059.
- Sierra, G.M. (1994). Structural and Sedimentary evolution of the Irra Basin, Northern Colombia Andes. Master thesis, Department of Geological Sciences, State University of New York, Binghamton N.Y., 102 p.
- Sierra, G.M., Estrada, J.J y MacDonald, W.D. (1995). Estudios Paleomagnéticos en rocas Terciarias en la Cuenca Del Río Cauca, Departamento de Caldas: Implicaciones tectónicas. Revista Universidad EAFIT n. 100, p. 79 - 110.