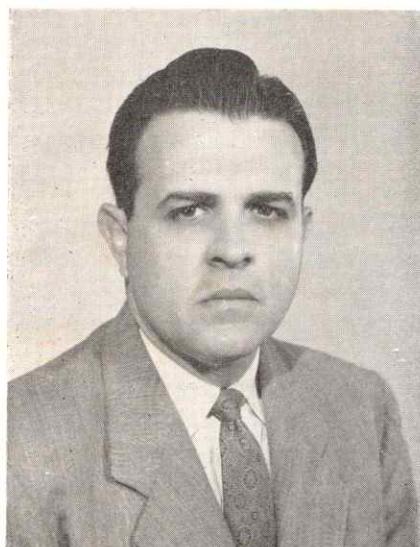


GEOLOGIA DEL PETROLEO

Por Dr. Guillermo Rodríguez Eraso



El Dr. Guillermo Rodríguez Eraso nació en Chacao, Edo. Miranda, Venezuela, el 24 de noviembre de 1923. Hizo sus estudios de Primaria y de Secundaria en el Colegio San Ignacio de Caracas. Graduóse de Geólogo en la Universidad Central de Venezuela en octubre de 1945, año en el que ingresó a la Creole Petroleum Corporation.

Realizó estudios de Post-Graduado en la Stanford University hasta alcanzar el título de Master of Sciences.

Ha desempeñado, dentro de la Creole, los cargos siguientes: Geólogo de Campo y Geólogo de Investigación. En la actualidad es Geólogo de Reservas.

La Geología es aquella rama de las ciencias naturales que se ocupa de la historia de la tierra, del estudio de sus rocas y minerales, de las formas de los continentes y mares, y aplica todos estos conocimientos a la búsqueda de minerales y productos útiles al hombre como minerales metálicos, petróleo, sal, azufre, etc.

Esto no es tarea fácil debido a la gran antigüedad del globo terráqueo y a la complejidad de los fenómenos naturales

que es necesario interpretar. La edad de las rocas más primitivas de nuestro planeta se ha calculado (por métodos radioactivos) en 2.000.000.000 de años. De los primeros 1.500 millones no conocemos mucho debido a la carencia de vida. De los 500 millones restantes tenemos un mejor conocimiento de la secuencia cronológica de los sucesos más importantes. Para darles a ustedes una mejor idea de los hechos transcurridos, vamos a comparar estos 500 millones de años con un día de 24 horas, en el cual cada minuto de tiempo sería igual a 350.000 años.

Medianoche a 4 a.m.: Formas prehistóricas marinas

7:35 a.m.: Primeros Peces

9:40 a.m.: Primeras Plantas

11:30 a.m.: Primeros animales terrestres

4 p.m.: Primeros mamíferos

9 p.m.: Era de los reptiles y aparición
primeras aves.

11:30 p.m.: Andes, Alpes, Himalayas, Rocosas.

11:59 p.m.: Aparición del hombre

De ahora en adelante nos ocuparemos primordialmente de la aplicación de la Geología a la búsqueda del petróleo. Primero describiremos a grandes rasgos la corteza terrestre y las rocas contenidas en ella. Luego estudiaremos las relaciones del petróleo con las rocas de la corteza terrestre e insistiremos de manera amplia sobre su origen y modos de aparición. Finalmente, nos dedicaremos a los métodos de exploración usados con más frecuencia en la localización de yacimientos petrolíferos.

Corteza Terrestre

La corteza terrestre se halla formada, como sabemos, por rocas que a su vez están compuestas de minerales. Tres tipos de rocas pueden ser distinguidos: ígneas, sedimentarias y metamórficas. Las ígneas provienen de las profundidades de la corteza y son intrusivas y extrusivas o volcánicas. Las sedimentarias provienen de la erosión y descomposición química de otras rocas de cualquier tipo y luego su deposición bien sea bajo el agua, en mares y lagos, o en la superficie por medio de ríos o el viento. Las rocas metamórficas provienen de las ígneas o sedimentarias y deben su origen a los procesos diná-

micos de presión, temperatura y otros cambios que afectan el aspecto y composición química de las rocas primitivas de donde se derivaron.

De ahora en adelante sólo nos ocuparemos de las rocas sedimentarias, únicas que tienen interés en lo que respecta al petróleo. Los agentes físico-químicos de la atmósfera y principalmente las lluvias van desnudando y erosionando la superficie de la tierra. Las rocas son gradualmente descompuestas y las pequeñas partículas de material rocoso son luego transportadas por el agua o el viento hasta que al fin van a depositarse o sedimentarse al final de este largo viaje. La mayoría de estos millones de toneladas de detritos que son movidos a diario por los agentes naturales, caen al mar donde después de muchas vicisitudes y movimientos, encuentran finalmente un sitio donde los agentes naturales ya no actúan con violencia y se van depositando capa por capa, una encima de la otra, hasta alcanzar espesores espectaculares.

Al llegar al mar los detritos rocosos, y una vez que empieza su deposición, hay una serie de materias que les son incorporadas en su seno y que son producto del medio ambiente marino. De estos materiales nuevos los dos más importantes son los orgánicos y los químicos. El material orgánico proviene de los millones o trillones de organismos que a diario mueren en los mares y que lógicamente se hunden hasta el fondo y así con lentitud se van uniendo a los detritos rocosos y son los que luego aparecen más tarde en la forma de fósiles. Los productos químicos ofrecen una gran variedad y en general se deben a la precipitación química de las sales o iones que se hallan en solución en las aguas del mar. Entre ellos los más importantes son los productos calcáreos y silíceos los cuales pueden formar grandes depósitos por sí solos o pueden cementar efectivamente los granos o detritos rocosos.

La cantidad de partículas rocosas que llega a los mares abiertos muy distantes de tierra firme es insignificante, y en consecuencia la sedimentación procede con lentitud, no alcanzando nunca mayores espesores. En contraste, a la zona adyacente a las costas, en especial a las bahías, golfos y mares más cerrados, libres de grandes corrientes marinas, llega una cantidad enorme de detritos, y, lo que es más importante, estos

detritos debido a la tranquilidad relativa de las aguas pueden ser depositados y conservados a través del tiempo geológico. Es en este tipo de sedimentación que estamos de veras interesados en lo que respecta al petróleo y a él nos vamos a dedicar. Los sedimentos que se depositan son compactados poco a poco por la adición de peso de las capas suprayacentes. Multitud de cambios físico-químicos se suceden hasta que finalmente llegamos a la formación de las verdaderas rocas sedimentarias en sus tres tipos dominantes: ARENISCAS, LUTITAS Y CALIZAS. Las areniscas son simples agregados de partículas rocosas del tamaño aproximado de granos de arena. Las lutitas son como un fino lodo solidificado y constituyen agregados de partículas más finas del tamaño de partículas microscópicas de arcilla. Las calizas son agregados de finísimo lodo junto con una cantidad apreciable de carbonato de calcio finamente precipitado. A medida que procede la historia de deposición de una de estas cuencas, la cuenca a pesar de los hundimientos que ocurren termina por llenarse y, las rocas que en su origen fueron lodos y precipitados químicos son ahora rocas sólidas y quedan expuestas a los embates de los agentes naturales. A medida que la cuenca deposicional se rellena, fuerzas tectónicas pliegan y quiebran los estratos depositados bajo las aguas y finalmente son las responsables de la elevación o levantamiento de lo que era un área deprimida. El resultado de relleno y la deformación de los estratos es, pues, el levantamiento de la región, formándose un altiplano, una cadena montañosa o una región llana de poca elevación sobre el nivel del mar, todo lo cual depende de la intensidad de las fuerzas y movimientos deformadores.

Cuencas Sedimentarias Venezolanas

El territorio venezolano situado al norte del río Orinoco estuvo ocupado durante millones de años, especialmente durante el Jurásico y el Cretáceo (70.000.000 de años atrás) por las aguas del océano, y luego durante el Terciario por brazos de mar cuyas aguas avanzaban o se retiraban siguiendo los movimientos de esa parte de la corteza terrestre. Parece que en esas aguas, dadas las óptimas condiciones de temperatura, la vida animal y vegetal alcanzó un gran desarrollo, y que otras

condiciones permitieron el almacenamiento de grandes cantidades de restos orgánicos en capas sedimentarias depositadas en el lecho de esos mares.

Por esas razones se formaron en nuestro país tres grandes cuencas sedimentarias (ver fig. 1) favorables a la existencia de petróleo en ellas: la del Lago de Maracaibo, que abarca el Estado Zulia y parte de Falcón, de la cual se extrae en la actualidad el 70% aproximadamente de la producción nacional; la cuenca del Orinoco, que comprende regiones de los Estados Guárico, Anzoátegui, Monagas, Sucre y del Territorio Delta Amacuro, la cual produce hoy el 30% restante de la producción venezolana; y por último, la cuenca del Apure, integrada por zonas de Apure, Barinas y Portuguesa, que todavía no ha entrado en desarrollo comercial.

El área total de esas cuencas es de un poco más de 30 millones de hectáreas; de esta superficie, 6 millones están bajo concesiones, de los cuales sólo 300.000 hectáreas son productivas.

Terminada esta introducción, diremos que el petróleo es un constituyente normal de los sedimentos así como lo puede ser el carbonato de calcio, los granos detriticos de cuarzo o de arcilla o los restos de organismos. De este hecho simple, arranca la asociación del petróleo con las rocas sedimentarias y con todo lo que afecta la formación y transformación de estas rocas desde que son separadas por los agentes naturales de las rocas preexistentes en la superficie hasta su deposición en los mares y luego su transformación en rocas consolidadas.

Origen y Formación del Petróleo

Ocupémosnos, pues, de ese constituyente tan importante de las rocas sedimentarias. Lo primero que salta a la vista es considerar su origen y formación. En este punto ha existido multitud de opiniones y todavía hoy no se sabe a ciencia cierta cuáles substancias son las originadoras del petróleo ni por cuáles métodos o procesos físico-químicos se llega finalmente al petróleo como lo conocemos en las rocas. Las teorías sobre el origen del petróleo se pueden dividir en dos grandes grupos: Teorías inorgánicas y teorías orgánicas. Las teorías inorgánicas fueron las primeras en ser propuestas y las tres princi-

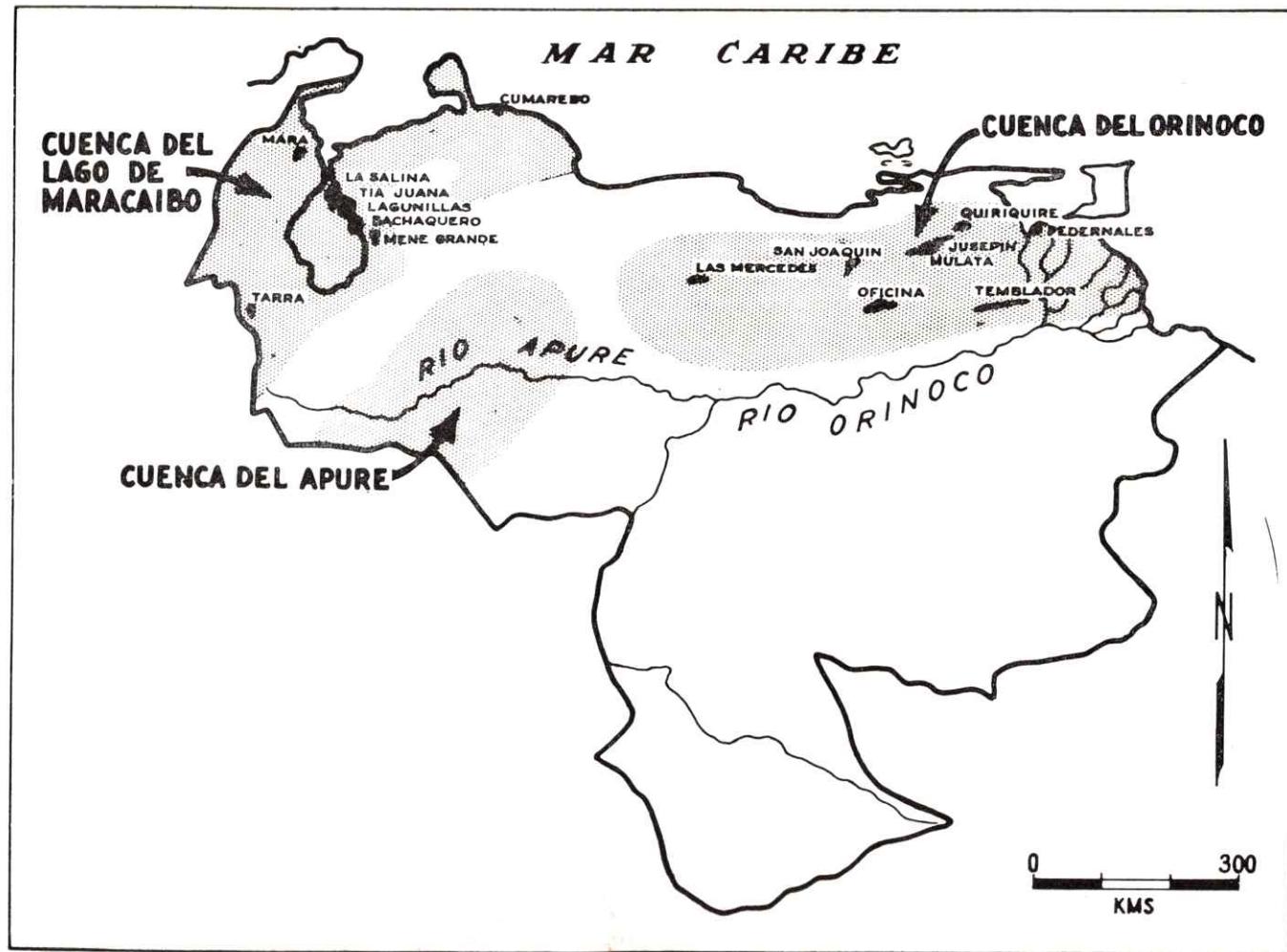


Figura 1

pales son: 1) La teoría de los metales alcalinos; 2) La de los carburos metálicos; y 3) La de las emanaciones volcánicas. La de los metales alcalinos enunciada por Berthelot en 1866 supone la existencia de metales alcalinos libres en la tierra, los cuales reaccionan con CO_2 a altas temperaturas produciendo carburos, los cuales al reaccionar con agua producirán acetileno. Del acetileno se podrían derivar infinidad de hidrocarburos más complejos por medio de temperatura. La de los carburos metálicos o de Mendelejeff supone la existencia de carburos de hierro en las profundidades de la tierra los cuales pueden reaccionar con aguas infiltrantes y así formar hidrocarburos. Otros autores han lanzado la teoría de que el petróleo tiene un origen volcánico basándose en la asociación rara y esporádica que ciertos yacimientos petrolíferos parecen guardar con áreas ígneas o volcánicas. En general, las teorías inorgánicas no son aceptadas por los científicos modernos debido a que suponen condiciones que en realidad no existen en nuestro planeta. Ellas no explican la asociación del petróleo con las rocas sedimentarias ni la variabilidad en la composición de los petróleos.

La teoría orgánica es la que hoy se acepta en los círculos científicos aunque como ya se ha dicho quedan muchos problemas dentro de ella que están todavía por resolverse. Se cree que el petróleo se derivó de materiales orgánicos bien sea animales o vegetales y se formó merced a una serie de complicados y poco entendidos procesos físico-químicos y biológicos. La naturaleza exacta del material orgánico original no se conoce; pero los estudios hasta ahora hechos indican que la substancia generadora del petróleo en los sedimentos, es una substancia orgánica, compleja, de bajo contenido de oxígeno y no grasa. El proceso de cómo se cambia la materia orgánica original en petróleo, es pues, casi en su totalidad una incógnita para nosotros; pero una vez descontado el hecho de que el petróleo es de origen orgánico, a los geólogos lo que más nos interesa es dilucidar qué tipo de condiciones crea un medio ambiente favorable para que la misteriosa transformación se efectúe. En este sentido sabemos que la materia orgánica que cae al fondo del mar es rápidamente oxidada por la presencia de oxígeno a CO_2 destruyéndose de esta manera la mayor parte

de ella. También sabemos que el fondo del mar está habitado por multitud de animales necrófagos que se alimentan de materia orgánica muerta constituyéndose en otro enemigo de peso de la materia orgánica que a nosotros nos interesa sea preservada en los sedimentos para que luego sea lentamente convertida en petróleo. De modo que estamos interesados en ambientes reductores o no oxidantes o anaeróbicos o donde los materiales orgánicos no sean destruidos por los organismos necrófagos y bacterias aeróbicas que pululan en los mares donde hay suficiente oxígeno. ¿En dónde, pues, encontramos estas condiciones? En las cuencas o depresiones sedimentarias estancadas, es decir, en aquellas cuencas que por su configuración especial no permiten una circulación y consecuente mezcla de las aguas superficiales ricas en oxígeno con las aguas tranquilas profundas deficientes en oxígeno. Una vez asegurada la preservación del material original, vienen la serie de cambios y transformaciones aludidas y que caen mejor dentro del campo de la química y de la biología. Llegamos así a la primera clave que tiene el geólogo para la búsqueda del petróleo o sea buscar cuencas sedimentarias y en ellas indicios de conservación de vida orgánica, que es la substancia madre de todo el petróleo.

Trampas Petrolíferas

Suponiendo que son llenados todos los requisitos de ambiente y que el petróleo se ha generado, ¿qué cambios sufre este nuevo material hasta acumularse en los yacimientos en que hoy lo encontramos? El petróleo poco a poco es expulsado de las rocas generadoras por el peso de los sedimentos depositados encima y también por diferencias de presión de origen tectónico. Este petróleo así expulsado se va concentrando en los poros o cavidades o fracturas de las rocas y comienza a migrar de las partes más profundas de las cuencas hacia los flancos. El petróleo siempre sube al punto más alto posible y en teoría migraría hasta la superficie, como sucede en los menes o manantiales de petróleo, (ver fig. 2) si no se le interpusieran barreras en su camino. Estas barreras o trampas, como son llamadas, pueden ser de muchos tipos; pero en general son dos los más destacados: ESTRUCTURALES Y ESTRATIGRAFICAS. Las trampas estructurales se deben a cambios en

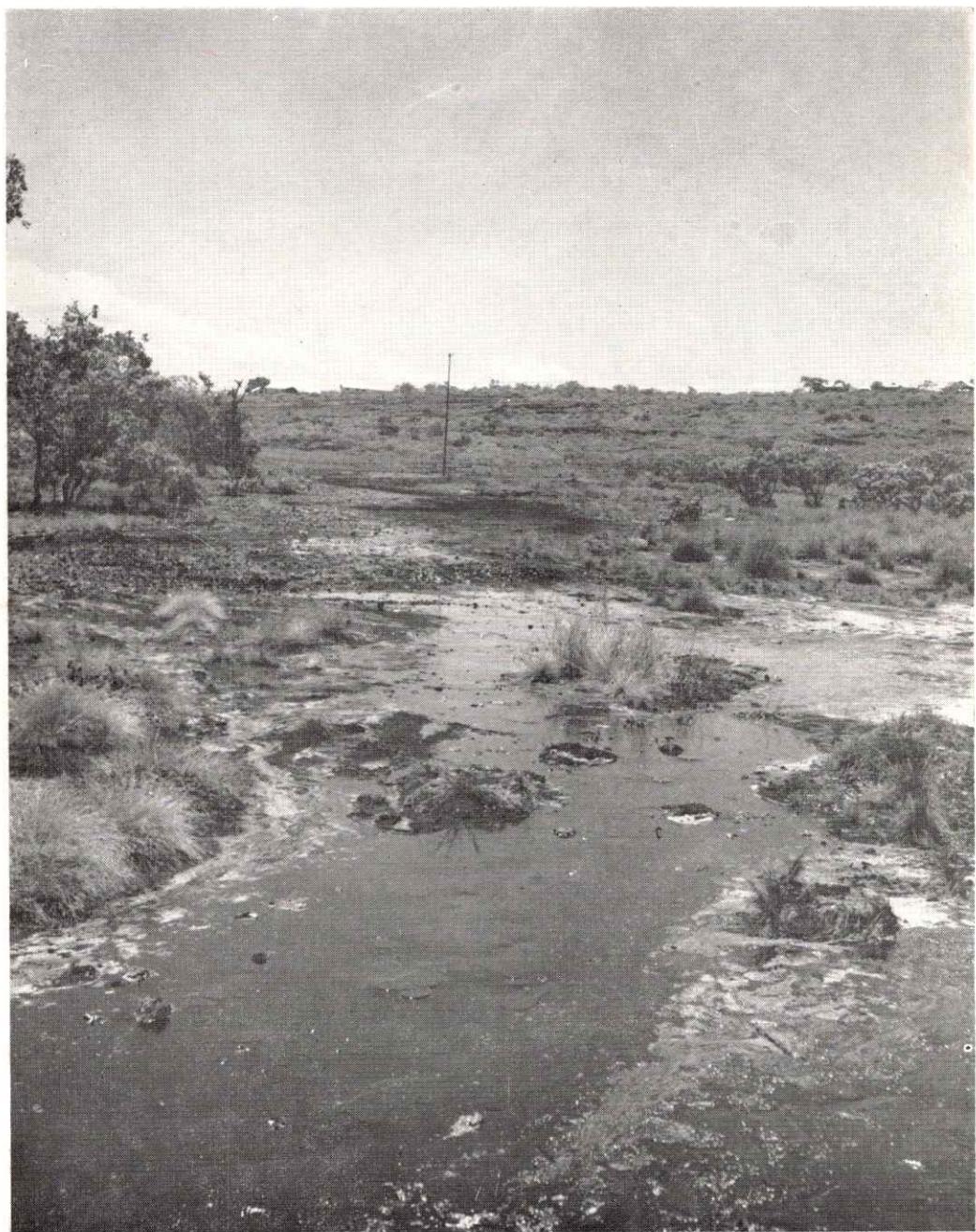
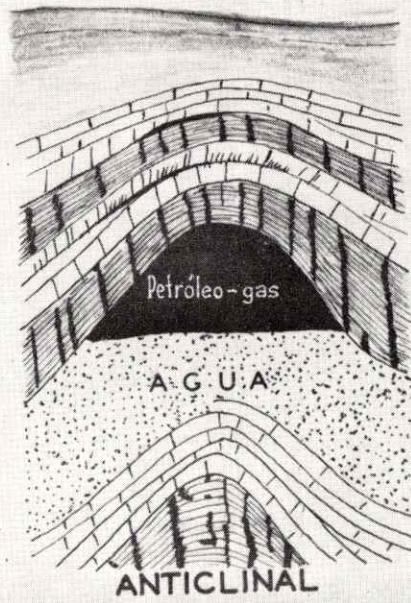


Figura 2

TRAMPAS ESTRUCTURALES



TRAMPA ESTRATIGRAFICA

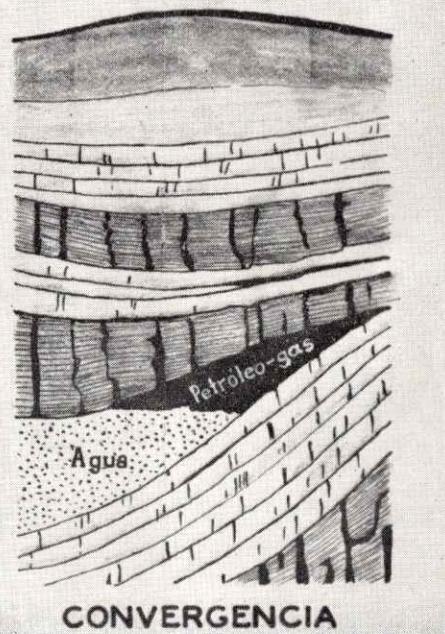


Figura 3

la estructura o arquitectura de los estratos. Las fuerzas tectónicas quiebran o pliegan las capas originalmente horizontales y crean así interrupciones en las capas o regiones de alto relieve estructural. En ambos casos el petróleo que va migrando por las capas al llegar a estas deformaciones obstaculizantes cesa su migración y comienza entonces el proceso de acumulación en contra de la barrera o tratando de ganar más altura y contemplamos así el nacimiento de un yacimiento petrolífero. Todo petróleo que va llegando a la zona deformada no sigue su lento viaje sino que se queda entrampado y cada vez se añade más y más petróleo al yacimiento, el cual puede ser más o menos grande dependiendo de la cantidad de petróleo que a él llegaba y de la magnitud y extensión de la barrera o área elevada. Las trampas estratigráficas son el resultado de cambios en el tipo de roca a lo largo de una determinada capa y son causadas por la peculiar deposición de los mismos sedimentos y no por fuerzas tectónicas deformadoras como en el caso de las trampas estructurales (ver fig. 3).

Dicho esto, resulta lógico que el segundo problema del geólogo es localizar las áreas donde existen esas trampas de que hemos hablado y luego probarlas por medio de perforaciones con el objeto de saber si en verdad contienen yacimientos comercialmente explotables. Es así como Uds. se darán cuenta de que nadie hoy en pleno siglo XX puede afirmar si en cierto terreno hay positivamente petróleo; el único que lo puede comprobar es el taladro una vez que haya llegado al yacimiento y efectuado pruebas convincentes.

Exploración

Localizada una extensa zona con perspectivas favorables para hallar petróleo mediante los estudios pertinentes, la tarea inmediata consistirá en elegir, dentro de ella, las áreas que presenten condiciones más propicias a la presencia de yacimientos comerciales. Para ello el geólogo se orienta por medio de la observación de ciertas características, más o menos constantes, de las áreas favorables, siendo las principales:

- 1.—Abundancia de material orgánico que pueda haber dado origen al petróleo.

- 2.—Presencia de capas porosas en las cuales pueda haberse acumulado el petróleo. Estas capas —rocas captadoras: arenas, conglomerados, calizas porosas— comúnmente son distintas de aquellas donde se formó el petróleo —rocas generadoras: arcillas, lutitas, calizas organógenas.
- 3.—Es condición indispensable que las capas porosas estén recubiertas de estratos impermeables, a menudo de arcilla, que impidan el escape del petróleo hacia la superficie a través de capas porosas superiores.
- 4.—La existencia de trampas estructurales o estratigráficas contra las cuales el petróleo haya podido acumularse.

Algunas de estas observaciones pueden hacerse valiéndose de estudios superficiales. Así, en una muestra de un afloramiento de rocas examinada en el laboratorio es fácil observar la presencia de fósiles en las rocas, los cuales pueden indicar no sólo la edad relativa de la muestra, sino también su ambiente de origen, ya sea marino, de agua salobre, o continental. Taladros poco profundos abiertos con aparatos portátiles suministrarían núcleos de terrenos cuyo exámen podría resultar en datos útiles.

La fotografía aérea vertical es utilizada frecuentemente con éxito en la búsqueda de estructuras favorables, ya que en ella se destacan claramente detalles que escapan a la observación hecha al nivel del suelo.

Cuando la erosión ha destruido los estratos superficiales es posible determinar las características estructurales de ciertas formaciones por el estudio del terreno y de la vegetación. En otros casos los estratos superficiales muestran poca variación en su aspecto aparente; pero se les puede distinguir por el examen de los fósiles que contienen, y establecer, por este medio, una correlación de dichos estratos.

Corrientemente es posible determinar la posición de los anticinales si se mide la inclinación de los estratos que afloran a la superficie. En terrenos de inclinación apreciable, por medio de la brújula Brunton, se puede determinar la orienta-

ción magnética de las capas (rumbo) y la inclinación o buzamiento de las mismas.

También las fallas pueden ser visibles en la superficie. Se evidencian por desplazamientos verticales de las rocas o por cambios bruscos en el tipo de los estratos expuestos a ambos lados de un plano de fractura en el terreno.

Datos más seguros proporcionan, sin embargo, los métodos geofísicos y geoquímicos de prospección, los cuales no son otra cosa que la aplicación de los principios de la Física y de la Química, respectivamente, al descubrimiento de minerales de valor, en nuestro caso petróleo, en la corteza terrestre.

Los métodos geofísicos usados en la industria petrolera tienden a localizar estructuras aptas para almacenar cualquier petróleo o gas que pudiere existir en el subsuelo, y no pretenden determinar la presencia o ausencia de petróleo, por lo cual reciben el nombre de métodos estructurales.

Los métodos geoquímicos, sí tienden a determinar la presencia de petróleo en los estratos examinados. Se les emplea, generalmente, durante las operaciones de perforación.

Nos limitaremos a pasar revista a los métodos geofísicos, de los cuales los principales son: la gravimetría, la sismografía y la magnetometría.

Gravimetría.—La intensidad de la gravedad en la superficie de la tierra varía de un punto a otro debido a varios factores, tales como el achatamiento de los polos, la fuerza centrífuga resultante de la rotación del globo, la altitud del lugar y *la densidad de las rocas de la corteza terrestre en la estación de registro*. Semejantes variaciones en la fuerza de la gravedad son fácilmente registradas por el gravímetro, el cual no es sino una complicada balanza a resorte, de alta precisión que permite apreciar los más mínimos cambios en el campo gravitacional de la tierra.

El procedimiento normal consiste en registrar distintos valores de la gravedad, dentro del área por explorarse mediante estaciones distantes de 800 a 1.600 metros entre sí. Los valores obtenidos en cada estación son registrados más tarde en el croquis o plano del terreno y, a base de los mismos, se trazan curvas de nivel que, uniendo los puntos de igual gravedad, dan una representación gráfica del campo gravitacional de dicho

terreno. Estos contornos o *curvas isogravimétricas* suelen reflejar la existencia de estructuras profundas. Así, por ejemplo, la existencia de curvas o contornos cerrados de un elevado valor, indican la existencia de un *anticlinal* de una extensión aproximada a la del área cubierta por dichas curvas o contornos (ver fig. 4).

Sismografía.—(Del griego, seismós, agitación, y grafos registrar). Por medio de una pequeña explosión en un pozo

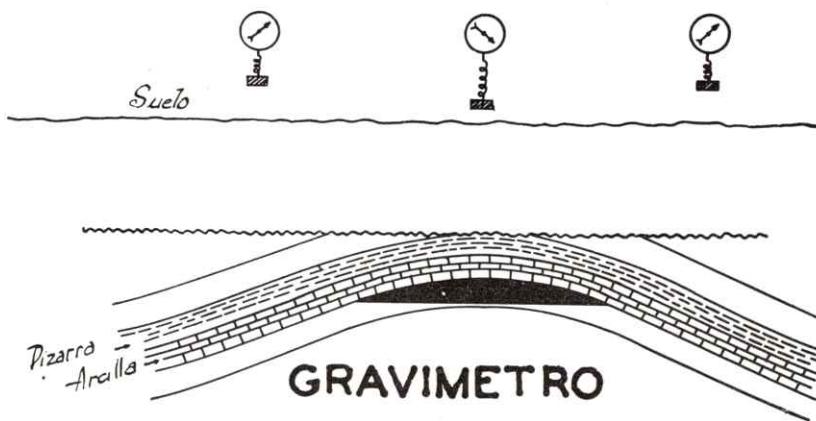
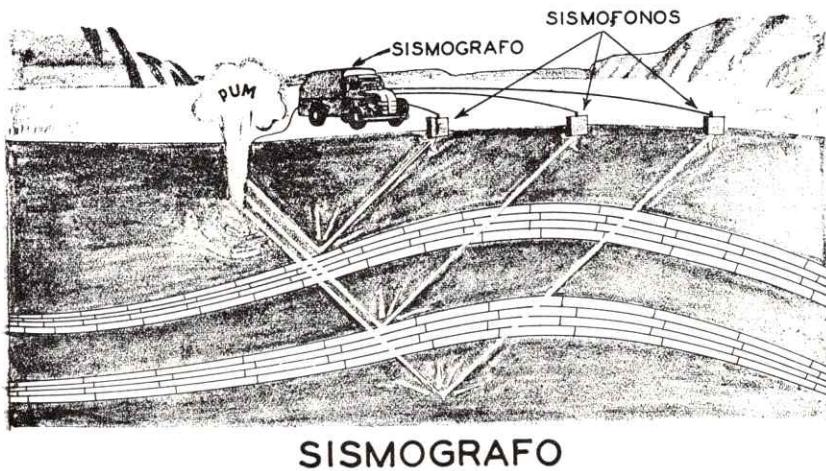


Figura 4

perforado a poca profundidad se produce una agitación de las capas terrestres. Esta agitación se transmite a través de los estratos al igual que las ondas producidas por el lanzamiento de una piedra en un estanque se propagan por la superficie del agua. Dichas ondas penetran naturalmente la corteza terrestre y, al encontrar una capa rocosa, se reflejan y regresan a la superficie, donde son recogidas y registradas por sismófonos estratégicamente colocados (ver fig. 5). Con el registro de los instantes de llegada de estas ondas a varias estaciones convenientemente ubicadas es posible calcular la velocidad sísmica (la cual varía según la naturaleza de las rocas atravesadas), el tiempo invertido por las ondas en su viaje de ida y vuelta a la capa reflejante, y por tanto la profundidad de las capas y su buzamiento.

Magnetometría.—Es bien conocido que la tierra actúa como un enorme imán; pero su campo magnético, en lugar de variar uniformemente, lo hace en forma muy irregular. Estas irregularidades locales son causadas, principalmente, por la diferente *permeabilidad magnética* de las distintas rocas que constituyen la corteza terrestre. Las más importantes irregularidades locales en el campo magnético de la tierra son provocadas por variaciones en las rocas del basamento cristalino



SISMOGRAFO

Figura 5

que yacen debajo de las capas sedimentarias que a veces contienen petróleo.

El magnetómetro mide el campo magnético de la tierra en varios puntos, de igual forma como se hace con gravímetro para registrar los cambios de la fuerza de gravedad. De manera idéntica a la descrita para el procedimiento gravimétrico se registran en un croquis los distintos valores medidos en cada estación y se dibujan las curvas o contornos de igual valor magnético.

Los resultados del magnetómetro son, por consiguiente, de gran valor en la búsqueda de acumulaciones de petróleo, dado que permiten obtener elementos de juicio preliminares acerca de la situación estructural de una región, antes de in-

currir en gastos mayores utilizando métodos de exploración más lentos y complicados.

Pero debe tenerse presente que estos métodos sólo sirven para localizar las estructuras en donde puede haber petróleo; de ninguna manera pretenden ellos determinar la presencia del mineral, esto sólo se logra mediante la perforación.