

REVISTA ENERGETICA

AÑO 8

2/84

Marzo - Abril/84
March - April/84



Organización Latinoamericana de Energía
Latin American Energy Organization

PROGRAMA REGIONAL DE GEOTERMIA **olade** THE REGIONAL GEOTHERMAL
PROGRAM **olade** VULCANOLOGIA APLICADA A LA EXPLORACION GEOTERMICA
olade VOLCANOLOGY APPLIED TO GEOTHERMAL EXPLORATION **olade**
MOMOTOMBO: UN VOLCAN AL SERVICIO DEL PAIS **olade** MOMOTOMBO: A
VOLCANO AT THE SERVICE OF THE PEOPLE **olade** BIOMASA BIOCOMBUSTIBLES
BIOENERGIA **olade** BIOMASS BIOFUELS BIOENERGY **olade**

VULCANOLOGIA APLICADA A LA EXPLORACION GEOTERMICA

Eduardo Almeida
INECEL - ECUADOR

El estudio geológico de los volcanes, constituye al momento una herramienta muy útil en la exploración de los recursos geotérmicos, como fue demostrado en el último Seminario sobre geotermia organizado por OLADE en Quito, durante septiembre de 1983.

La geovulcanología tiene un campo de acción bastante amplio durante las fases de exploración, fundamentalmente en lo que se refiere al conocimiento de la fuente de calor y el reservorio, los elementos más importantes de un sistema geotérmico. Actualmente con ayuda de las investigaciones geovulcanológicas es posible conocer algunos parámetros inherentes a estos dos elementos.

LA FUENTE DE CALOR

La gran mayoría de las áreas de interés geotérmico están relacionadas con una cámara magmática emplazada en los niveles más superficiales de la corteza terrestre por lo que, con fines eminentemente prácticos, se requiere cuantificar dicha cámara; esto es, conocer su volumen, geometría aproximada, profundidad y temperatura inicial y final, con el objeto de calcular cuanta energía pudo haber sido transferida desde la cámara al medio que le rodea.

El primer paso a darse es determinar la existencia de una cámara magmática, esto puede ser hecho a partir de métodos directos (sismología, gravimetría, geomagnetismo, estudio de las deformaciones del suelo y mediciones de flujo de calor).

Los métodos indicados deben ser usados en con-

junto para obtener una imagen lo más aproximada a la realidad de la zona. Son estudios costosos que a menudo no están al alcance de los recursos económicos y técnicos disponibles dentro de los proyectos y, por lo tanto no pueden ser realizados durante las fases iniciales de la exploración. Por otro lado, según la filosofía básica de las metodologías OLADE no es recomendable realizar estudios e inversiones costosas en una zona en la que previamente no se hayan agotado todos los estudios geológicos que en realidad son mucho más económicos. Estos estudios constituyen los métodos indirectos que proporcionan la información requerida.

La presencia de una cámara magmática puede establecerse mediante estudios de geología estructural (identificación de calderas, estructuras radiales y concéntricas que son las evidencias directas de la presencia de una cámara magmática somera). Además el vulcanólogo al estudiar los productos emitidos por un volcán debe identificar si es que estos provienen de una cámara magmática para cuyo objeto deberá basarse en la presencia de productos diferenciados, zonificación química en los materiales emitidos por una misma erupción y la presencia de líticos que indiquen el estacionamiento del magma a baja profundidad (rocas cumúlíticas, pirometamórficas, etc.)

En cuanto a la evaluación del volumen, este puede detenerse con la ayuda del coeficiente de diferenciación, cuyo valor depende de la composición química de la roca e indica el grado de evolución de los materiales emitidos por el respectivo volcán, a partir del volumen total de productos ácidos emitidos, que

puede determinarse con los estudios de campo (mapa geológico), se podrá conocer la masa de líquido magmático que los engendró.

En función de datos se calcula la masa del magma primario, esto es la masa original de magma que luego de los procesos de diferenciación produjo los productos ácidos encontrados en superficie. Con la ayuda de la masa del magma se conoce el volumen del líquido magmático y una vez determinado esto debe establecerse la geometría de la cámara. Para esto, es necesario acudir a los datos geológicos locales y regionales. Conocemos que el magma asciende por zonas de debilidad de la corteza terrestre, situación encontrada en fallas sometidas a esfuerzos de tipo distensivo. En un caso como estos, es de suponer que la cámara magmática tendrá una geometría tabular. Un caso diferente será por ejemplo en un colapso caldérico en donde haya habido volcanismo posterior al colapso, la cámara magmática probablemente tendrá una geometría y más o menos cilíndrica.

Hasta este punto conocemos de la existencia de la cámara, su volumen y geometría, necesitándose entonces calcular su temperatura y profundidad. A partir de los análisis químicos efectuados sobre muestras previamente escogidos de los productos de nuestro volcán, utilizamos una serie de diagramas de variación de varios elementos en función del sílice (K₂O; Na₂O + K₂O; Na₂O; Al₂O₃; TiO₂; MnO; FeO + Fe₂O₃). El análisis de los mismos nos indicará si es que estamos, o no, en presencia de una serie evolutiva; esto es, debe notarse un aumento regular del contenido de alcalis y potasio con relación al incremento de sílice y también una progresiva disminución de los otros elementos.

La profundidad de la cámara magmática puede ser determinada en términos de presión de equilibrio de las fases minerales para lo cual resultan muy útiles los análisis del diagrama normativo Q-Or-Ab en donde están reportadas las curvas de equilibrio del sistema, a diferentes presiones parciales de volátiles, y sus temperaturas de equilibrio, siendo también necesario reconstruir el proceso de cristalización. En estos diagramas se ubicarán las muestras más representati-

vas de la serie incluida una que refleje la composición química del líquido magmático más evolucionado (un vidrio separado de los términos más ácidos). Este análisis debe ser hecho tomando en cuenta el examen petrográfico y realizado previamente en las muestras (relaciones cuarzo-matriz, piroxenos-anfíboles, anfíboles-matriz, biotita-matriz, oliviano-matriz, zonación en plagioclasas, etc.).

En este momento podemos decir que conocemos los parámetros fundamentales de nuestra cámara magmática pudiendo analizarse el siguiente aspecto:

EL RESERVORIO

Las nuevas técnicas geovulcanológicas pueden ayudar a definir la presencia de un reservorio geotérmico en profundidad, y se basan en el conocimiento del fenómeno del freatomagmatismo que ocurre por la interacción agua-magma.

Esto implica que el vulcanólogo pueda reconocer en el campo los productos volcánicos originados por un proceso de interacción, y que defina si es que la misma ocurrió en niveles superficiales como en el caso de una laguna cratérica o en niveles profundos como es el caso de un acuífero e incluso, si el agua de estos niveles profundos estuvo fría o caliente. Finalmente se requiere conocer la edad de las erupciones y evaluar si es que las condiciones hidrogeológicas que existían al momento de la ocurrencia del fenómeno, subsisten hasta el presente.

El freatomagmatismo resulta una herramienta muy útil que solamente requiere reconocer los puntos antes indicados. El estudio en realidad no es muy simple, puesto que los parámetros que intervienen en el fenómeno pueden variar substancialmente (relación de masas de agua y magma que interactúan, niveles en donde se produce el fenómeno, etc.).

Idealmente se podría reconstruir un proceso eruptivo en el que se produce este fenómeno y los eventos se sucederían en el siguiente orden: la actividad se inicia con el ascenso del magma por el conducto, aparece la columna eruptiva que deposita piroclastos

de caída y simultáneamente el nivel de disrupción del magma en el conducto va descendiendo, hasta el nivel en el cual los volátiles se liberan explosivamente formando una dispersión gas/partículas. Lo anterior provoca una erosión del conducto expulsándose los líticos de las rocas subsuperficiales; el fenómeno continúa con emisión de flujos piroclásticos. Hasta este momento podría afirmarse que el fenómeno se encuentra en una fase inicial puramente magmática.

A medida que el nivel de disrupción desciende y alcanza a un acuífero en profundidad, el estilo eruptivo cambia radicalmente ya que al reaccionar el magma con el agua se produce una transformación súbita del agua en vapor ocasionando que la explosividad aumente notablemente y provoque, consecuentemente, un aumento en el grado de fragmentación hasta llegar a límites extremos en donde se producen partículas con un tamaño de ceniza; todo esto dependiendo, naturalmente, de las cantidades de agua y magma que interaccionan. También como consecuencia del fenómeno, se produce un incremento de la fase gaseosa en el sistema debido al vapor de agua, incorporada lo que trae como consecuencia una disminución en la concentración de la dispersión gas/partículas presentes en el conducto, y la mayor incorporación de líticos pre-existentes originarios del sitio donde se produce la interacción explosiva. Las erupciones freatomagmáticas tienen un componente lateral muy fuerte y esto las distingue de un proceso puramente magmático. La dispersión escapa lateralmente como una nube de "surge" que viaja a altas velocidades y turbulentamente. Como el vapor de agua es abundante, se expande y se enfría pudiéndose incluso condensar. Dependiendo de la temperatura del vapor los depósitos dejados por los surges tendrán diversas características. El estudio de los líticos arrancados del nivel acuífero aportará con claras indicaciones de la temperatura del agua en el mismo. Si es que existía en el momento de la erupción un sistema geotérmico, los líticos tendrán asociaciones minerales que reflejan las facies hidrotermales del sistema. Este fenómeno en definitiva produce un muestreo de los niveles al reservorio que nos interesa con fines geotérmicos. La actividad puede concluir con una fase puramente magmática si es que el nivel de

disrupción pudo descender a niveles más bajos que los del acuífero. En resumen, el freatomagmatismo permite conocer la existencia de acuíferos en profundidad y la temperatura del agua, y de manera cualitativa, señalar la cantidad de agua que existía en esos acuíferos. Cabe repetirse que se deberá evaluar si es que las actuales condiciones hidrogeológicas son similares a las existentes cuando ocurrió este fenómeno.

Los resultados obtenidos de los estudios geovolcanológicos son muy útiles para la elaboración del modelo térmico de la zona en estudio y tienen un costo sumamente bajo por lo que resultan perfectamente posibles de realizarse durante la etapa de prefactibilidad.

Este procedimiento ha sido utilizado dentro de los estudios de los proyectos el Hoyo Monte Galán en Nicaragua y más recientemente en el área de Chiles Cerro Negro en Ecuador, desarrollados conjuntamente por los respectivos organismos nacionales y OLADE.

VOLCANOLOGY APPLIED TO GEOHERMAL EXPLORATION

Eduardo Almeida
INECEL - ECUADOR

The geological study of volcanoes constitutes, to date, a very useful tool for the exploration of geothermal resources, as was demonstrated at the last seminar on that subject, organized by OLADE in Quito during September 1983.

Geovolcanology has a fairly broad field of action during the exploration stage, basically in terms of knowledge about the heat source and the reservoir, the most important elements in a geothermal system. Currently, with the aid of geovolcanological investigations, it is possible to recognize some parameters inherent in these two elements.

THE HEAT SOURCE

By far and away, most of the areas of geothermal interest are related to a magma chamber lying within the shallowest levels of the earth's crust; so that, for eminently practical purposes, it is necessary to quantify that chamber, i.e., to learn about its volume, approximate shape, depth, and initial and final temperatures, in order to calculate how much energy could have been transferred from the chamber to the medium surrounding it.

The first step is to determine the existence of a magma chamber; this can be done on the basis of direct methods (seismology, gravimetry, geomagnetism, studies on ground deformation and heat-flow measurements).

The methods indicated above should be used together in order to obtain a picture as close as possible

to the reality of the zone. These are costly studies, which are often not within reach of the economic and technical resources available within the projects; and therefore they cannot be done during the initial phases of exploration. Besides, according to the basic philosophy of the OLADE methodologies, it is not recommendable to undertake expensive studies and make large investments in an area before having previously exhausted all of the geological studies that are much more economical. These studies are comprised by indirect methods, which provide the information required.

The presence of a magma chamber can be established through structural geology studies (identification of calderas and radial and concentric structures, which are direct evidence of the presence of a shallow magma chamber). Moreover, the volcanologist, by studying the products emitted by a volcano, can identify whether or not these come from a magma chamber; for this purpose, he should base himself on the presence of differentiated products, chemical zoning in the materials issuing from one same eruption, and the presence of lithics indicating the stationing of magma at shallow depths (cummulitic, pyrometamorphic rocks, etc.).

As for the assessment of volume, this can be done with the aid of a differentiation coefficient, whose value will depend on the chemical composition of the rock and will indicate the degree of evolution of the materials emitted by the respective volcano; on the basis of the total volume of acid materials emitted, which can be determined from field studies (geological mapping),

the mass of liquid magma which originated them can be found.

As a function of these data, the mass of primary magma is calculated; this is the original mass of magma which, after the differentiation processes, produced the acid products found at the surface. With the aid of the mass of magma, the volume of liquid magma can be found; and once the latter has been determined, the shape of the chamber should be established. For this, it is necessary to recur to local and regional geological data. We know that magma ascends through weak zones in the earth's crust; this situation can be seen in faults subjected to stress of the distensive kind. In such a case, it can be assumed that the magma chamber will have a tabular shape. A different case would be, for example, a caldera collapse where there might have been volcanism after the collapse; then the magma chamber would probably have a more or less cylindrical shape.

So far, we know about the existence of a chamber, its volume and shape; thus, what is now needed is the calculation of its temperature and depth, on the basis of chemical analyses done on previously - taken samples of the products of our volcano. We use a series of variation diagrams for several elements, as a function of the silica (K_2O ; $Na_2O + K_2O$; Na_2O ; Al_2O_3 ; TiO_2 ; MnO ; $FeO + Fe_2O_3$). The analysis of these will tell us if we are, or are not, faced with an evolution series; that is, note should be made of a regular increase in the content of alkalis and potassium, and also a progressive decrease in the other elements, with relation to the increase in silica.

The depth of the magma chamber can be determined, in terms of equilibrium pressure, from the mineral phases; for this purpose, the analyses of the normative Q-Or-Ab, where the system's equilibrium curves are reported at different partial pressures for the volatile materials, along with their equilibrium temperatures, are very useful. It is also necessary to reconstruct the crystallization process. These diagrams should locate the most representative samples of the series, including one that reflects the chemical composition of the liquid magma having evolved the most (a separate glass from

the more acid terms.). This analysis should be done previously on the samples (quartz - matrix ratios, pyroxenes - amphiboles, amphiboles - matrix, biotite - matrix, olivine - matrix zoning in plagioclases, etc.).

At this point we can say that we know the fundamental parameters of our magma chamber, and the following aspects can be analyzed:

THE RESERVOIR

The new geovolcanological techniques can aid in defining the presence of a geothermal reservoir at depth, and they are based on knowledge about the phreatomagmatism that occurs due to water - magma interaction. This implies that the volcanologist can recognize, in the field, volcanic products originating from a process of interaction, and that he can define if that process occurred at shallow levels, as in the case of a crater lake, or at deeper levels, as in the case of an aquifer; and he can even discern if the water at those levels was hot or cold. Finally, it is necessary to be familiar with the age of the eruptions and to assess if the hydrogeological conditions that existed at the moments that such phenomena occurred still exist.

Phreatomagmatism is a very useful tool, which only requires recognizing the above-mentioned points. However, study is not very simple, since the parameters that intervene in a phenomenon can vary substantially (ratio of interacting water and magma masses, levels at which the phenomenon was produced, etc.).

Ideally, an eruption process in which this phenomenon would have occurred can be reconstructed, and the events would occur in the following order: activity begins with the rise of magma through the chimney, the eruptive column that deposits falling pyroclasts appears and simultaneously the level of magma disruption in the chimney begins decreasing, until the level at which the volatile materials are freed in explosive fashion, forming gas/particles dispersion. This brings about an erosion of the chimney expelling the lithics of the subsurface rocks; the phenomenon continues with the emission of pyroclastic flows. Up until this moment, it could be said that the phenomenon finds itself in an initial, purely magmatic phase.



As the level of disruption decreases and reaches an aquifer at depth, the eruption style changes radically, since upon reacting with the water, there is a sudden transformation of the water into vapor, giving rise to a notable increase in explosivity and causing, as a consequence, an increase in the degree of fragmentation, until reaching extreme limits in which particles the size of ash are produced-- all of this depending, naturally, on the amounts of water and magma that interact. Another consequence of the phenomenon is an increase in the gaseous phase of the system, due to the water vapor incorporated; this brings about a decline in the concentration of the gas/particles dispersion present in the channel, and the greater incorporation of pre-existing lithics originally in the site where the explosive interaction was produced. The phreatomagmatic eruptions have a very strong lateral component, and this distinguishes them from a purely magmatic process. The dispersion escapes laterally, as a surge cloud that travels turbulently, at high speeds. Since water vapor is abundant, it expands and cools and can even condense. Depending on the vapor temperature, the deposits left behind by the surges will have different characteristics. The study of lithics taken from the aquifer level will provide clear indications of the temperature of the water therein. If a geothermal system existed at the moment of eruption, the lithics will have mineral associations that reflect the system's hydrothermal facies. This phenomenon definitely produces sampling of the reservoir levels that interest us for geothermal purposes. The activity can conclude with a purely magmatic phase if the level of disruption was able to descend to levels below those of the aquifer. In summary, phreatomagmatism makes it possible to learn about the existence of aquifers at depth and about the temperature of the water and, qualitatively, to specify the amount of water that existed in those aquifers. Again, it should be determined if the current hydrogeological conditions are similar to those that existed when this phenomenon occurred.

The results obtained from geovolcanological studies prove quite helpful in drawing up a thermal model for the area under study, and they are not very expensive. Thus, it is perfectly viable to do them during the pre-feasibility stage.

This procedure has been used within the studies for the projects El Hoyo-Monte Galan in Nicaragua and, more recently, in the Chiles-Cerro Negro area in Ecuador; these studies were developed jointly by the respective national organizations and OLADE.

