

HYDROTHERMAL ALTERATION OF SEDIMENTS ASSOCIATED WITH SURFACE EMISSIONS FROM THE CERRO PRIETO GEOTHERMAL FIELD

J. N. Valette-Silver,^{*†} I. Esquer P.,^{**} W. A. Elders,^{*} P. C. Collier,^{*} and J. R. Hoagland^{*}

^{*}Institute of Geophysics and Planetary Physics
University of California
Riverside, California, U.S.A.

^{**}Comisión Federal de Electricidad
Coordinadora Ejecutiva de Cerro Prieto
Mexicali, Baja California, México

Abstract

Surface emissions from the Cerro Prieto geothermal reservoir are restricted to a 100 km² area on the western side of the field, near the volcano "Cerro Prieto" and the lake "Laguna Volcano." Some 57 surface emissions, explored in 1979, were classified into hot springs, mud pots, pools, fumaroles and "geysers" (Valette and Esquer-Patiño, 1979). A study of the mineralogical changes associated with these hydrothermal vents was initiated with the aim of developing possible exploration tools for geothermal resources. The Cerro Prieto reservoir has already been explored by extensive deep drilling so that relationships between surface manifestations and deeper hydrothermal processes could be established directly.

Approximately 120 samples of surface sediments were collected both inside and outside of the vents. The mineralogy of the altered sediments studied appears to be controlled by the type of emission. A comparison between the changes in mineralogy due to low temperature hydrothermal activity in the reservoir, seen in samples from boreholes, and mineralogical changes in the surface emission samples shows similar general trends below 180°C: increase of quartz, feldspar and illite, with subsequent disappearance of kaolinite, montmorillonite, calcite and dolomite. These mineral assemblages seem to be characteristic products of the discharge from high intensity geothermal fields.

Introduction

The reservoir of the Cerro Prieto geothermal field is developed in the deltaic sediments of the Colorado River and is composed of a series of sands, silts and shales. Coarser, basin margin sediments, coming from Sierra de los Cucapá do not occur within the field. Now explored by more than 70 wells with depth between 1.5 and 3.5 km, the geothermal reservoir is characterized by temperatures as high as 350°C at less than 2 km.

Surface hydrothermal emissions are restricted to an arc along the western edge of the field

(Figure 1). They cover an area of about 100 km² and are concentrated within two sectors: near "Cerro Prieto Volcano" and in "Laguna Volcano" (Calderon, 1958; Mercado, 1968, 1970).

Between January and August, 1979, a new geochemical survey of the surface emissions (Valette and Esquer-Patiño, 1979) showed the existence of four morphological types of surface emissions, "hot springs, mud pots and mud lakes, fumaroles and warm pools," each characterized by specific physical and chemical properties. Analysis of the chemical results revealed the existence of a fifth type of emission, which was designated "geysers," but which is not easily detected by its morphological aspects. These are not true geysers but do spout irregularly. The chemical characteristics of these five types of surface emissions are shown in Table 1 and their locations are shown in Figure 1, which also shows the decrease in area of emissions since power production began at Cerro Prieto.

Sampling and Analytical Techniques

A total of 120 surface sediment samples were collected on the 57 surface emissions mapped in the field. Surface samples were taken systematically both inside and outside of the hydrothermal vents. The distance between the two samples in the same location was about 2 m. In addition, approximately 60 samples were analyzed from six cores from boreholes drilled by Comisión Federal de Electricidad when prospecting and exploring the field, giving special attention to the unconsolidated upper part of the cores.

The surface sediments were collected with a plastic shovel, packed in plastic bags and stored in a cool laboratory until analysis. The analysis of the coarse fraction of the material involved microscopical examination of polished thin sections. The fine fraction of the material was studied by X-ray diffraction, including separate analysis of bulk samples, clay mineral fractions and glycolated clay mineral samples, using methods previously reported (Elders *et al.*, 1978).

Results

An average mineralogical modal composition of the unaltered surface sediments of the Cerro Prieto area is, in weight per cent determined by

[†]Now at Centre de Recherche de Sedimentologie Marine, Universite de Perpignan, Avenue de Villeneuve, 66025 Perpignan, France.

quantitative X-ray diffraction, quartz 28%, plagioclase 6.6%, K-feldspar 7.6%, illite 9.5%, montmorillonite interlayer 11.5%, montmorillonite 9.7%, kaolinite 7.6%, calcite 11.6%, dolomite 2.3%, hematite 1.6% and others 4%.

The unaltered sediments of Cerro Prieto were used as a reference to follow the mineralogical changes occurring in the sediments altered by the superficial emissions.

For the sediments collected in the hydrothermal vents, the alteration mineralogy depends upon the type of emission. The five types of surface emission and their associated mineral alteration are as follows:

1. Hot springs. The springs have a temperature of about 90°C, a pH from 6.5 to 8, and an Eh from -25 to 100 mV. Their salinity is approximately 15 g/l, with NaCl as the predominant salt. Their chemistry (Table 1) is characterized by high contents of silica (100 ppm) and low contents of sulphates (35 ppm) and aluminum (50 ppb). By comparison with the original sediments, the altered sediments collected inside of the mouth of the hot springs show an increase in quartz, amorphous silica, plagioclase, K-feldspar, illite and by the appearance of pyrite (Figure 2). Interlayered montmorillonite, kaolinite, calcite and dolomite decrease dramatically. Montmorillonite and chlorite are absent.
2. Mud pots, mud lakes and mud volcanoes. The temperature of these emissions is generally very close to 100°C, the pH is less than 8 and the Eh is always negative. Their salinity varies from 3 to 14 g/l but is typically less than 5 g/l (Table 1). Sulphates are abundant (300 ppm) and silica is less than 50 ppm. The mineralogical association which occurs in the altered sediments collected inside of these manifestations is characterized by the presence of alunite, pyrite, sulfur and gypsum (Figure 2). An increase of the contents of interlayered montmorillonite and illite is observed. A decrease in plagioclase and K-feldspar is also noted. Here again the sediments are free of chlorite.
3. "Geysers." Although they are not true geysers, we gave this name to vents showing sporadic emissions of boiling waters. The temperature of these emissions is generally 100°C, the pH about 2 and the Eh is always negative. The total salinity of the waters is approximately 2 g/l (Table 1). High silica values (400 ppm) are typical; Na/K ratios are quite low (v.l.29), and aluminum contents are often high (max. 80 ppm). Inside the "geysers", sediments are depleted in illite, interlayered montmorillonite, calcite, and gypsum. On the other hand, the quantities of quartz, amorphous silica,

and K-feldspar clearly increase (Figure 3).

4. Fumaroles. Two ranges of temperature are observed in the fumaroles, one around 45°C, the second between 80-100°C. In the hotter fumaroles the emitted gases are characterized by a very large amount of steam (90%) associated with CO₂, H₂S, SO₂ and HCl. In the colder types, CO₂ is predominant. The condensate solutions are characterized by pH close to 2 and Eh negative or slightly positive. The salinity of the condensate is very low (2 g/l) with sulphates (500 ppm) and chlorides (100 ppm) as the dominant species (Table 1). In the sediment altered by the fumaroles, the original minerals are generally destroyed by the hot and acidic fluid formed by the condensation of the steam and by the subsequent dissolution of gases. At the same time that the primary minerals are destroyed, quartz, amorphous silica and sulphur are formed (Figure 3).
5. Warm pools. The temperature of these pools is generally less than 45°C, pH varies from 1 to 5 and Eh is negative or slightly positive (+25 mV max.). The salinity of the fluid is always high with 135 g/l as maximum. High sulphate values are typical and iron, manganese, aluminum and vanadium are markedly concentrated (Table 1). The reactions between the fluid of the pools and the sediments gives rise to quartz, amorphous silica, K-feldspar, illite, sulphur, pyrite and gypsum. In these conditions, calcite, dolomite and halite are destroyed (Figure 4).

Alteration in Boreholes

The reservoir fluids collected at the well head show salinities of about 19 g/l; Na, Ca and K are the predominant cations (Mañón *et al.*, 1977). In the gas phase, CO₂ and H₂S are the two most important constituents (Nehring and Fausto, 1979; Welhan *et al.*, 1978).

The progressive increase of temperature as a function of depth in the reservoir brings about dramatic transformations in the mineralogy of the sediments. These changes have been described in a series of papers by our group of the University of California, Riverside (Elders *et al.*, 1977, 1978, 1980, 1981).

Figure 1 of Elders *et al.*, 1981 (this volume) shows the progressive hydrothermal mineral zones developed in sandstones of the reservoir, at temperatures of up to 350°C. At the lowest temperatures the sediments begin to lose kaolinite and montmorillonite. At 150°C-180°C these minerals disappear and there is a transition into a chlorite-illite zone where dolomite and interlayered illite montmorillonite disappear, being replaced by chlorite and illite. Above 180°C

quartz and K-feldspar increase spectacularly. About 225°C a series of decarbonation reactions lead to the formation of various calc-aluminum silicates such as wairakite, epidote, prehnite, actinolite and diopside. Above 325°C the disappearance of illite and the formation of biotite and vermiculite are observed, forming a green-schist facies metamorphic mineral assemblage.

A somewhat different sequence of hydrothermal minerals is observed in the shales of the reservoir, the difference presumably being due to the lower permeability of shales versus sandstones (Seamount and Elders, 1981, this volume). The sequence in shales is, below 150°C - montmorillonite zone; 150-250°C - illite zone (equivalent to illite + chlorite zone of sandstones); 250-300°C - chlorite zone (overlaps calc-aluminum silicate zone of sandstones); and above 300°C - feldspar zone (overlaps the biotite vermiculite zone of the sandstones).

Conclusions

From our mineralogical studies it appears clear that the mineralogy of the altered sediments at the surface is directly controlled by the physicochemical parameters of the discharged fluid. In the upper part of the reservoir, the temperature seems to be the most important factor. In the surface emissions, Eh and pH drive the reactions. At the surface the dominant parameter is the degree of oxidation of the hydrothermal gases. The P_{O_2} , PCO_2 , PH_2S , and PSO_2 determine Eh-pH pair and modify the solution-mineral equilibrium (Valette *et al.*, 1981, this volume). The other important factor is obviously the ionic concentrations in the fluid, especially of silica, aluminum, calcium, potassium, sulphate, and chlorides. In each case, the characteristics of the hydrothermal fluid give rise to a typical paragenesis of alteration minerals.

In summary, the action of the hydrothermal alteration on the sediments for all types of surface emissions is characterized in general by the formation of quartz, amorphous silica, sulphur, sulphides, and K-feldspars and the disappearance of the calcite, dolomite, gypsum, halite and sylvinit. These relations are summarized in Table 2.

The comparison of the progressive changes observed in the mineralogy of the material of the reservoir as a function of the temperature increase and those obtained by the action of the hydrothermal fluid on the surface sediments shows some common trends: increase of quartz, K-feldspar, illite and decrease of montmorillonite, kaolinite, calcite, and dolomite. Chlorite, often present and associated with illite in the wells, is absent in the superficial vents. These mineral modifications occur at lower temperature in the superficial vents than in the boreholes. This difference is related to the variation of the physicochemical parameters of the chemical reactions: P_{O_2} is higher and PCO_2 lower at the surface than in the reservoir.

In the hydrothermal vents, we observe the formation of quartz and K-feldspar as the fluid

cools. Flow of hot waters through cold rocks in the reservoir, especially in certain wells located on the western side of the field, produces the same assemblage (Elders *et al.*, 1981). This paragenesis is similarly typical of "hydrothermal discharge zones" for the Cerro Prieto field. Elders *et al.* (1981) have shown that zones with calcite and anhydrite cement correspond to "recharge zones", where cold waters circulate into hot rocks.

Acknowledgements

We would like to thank the staff of the comisión Federal de Electricidad, Coordinadora Ejecutiva de Cerro Prieto for their help and the constant support they gave us. We have also benefitted by the interesting discussions we have had with colleagues at UCR, USGS and LBL.

The work at UCR was principally supported by Department of Energy contract no. 7100410, through Lawrence Berkeley Laboratory. This is report no. UCR/IGPP-81/12 of the Institute of Geophysics and Planetary Physics of UCR, typed by L. Lovell, with drafting by L. Jankov.

References

- Calderón A., 1958, Estudio preliminar geológico del área al sur y sureste de Mexicali, B.C., para aprovechar los recursos geotérmicos: GEOCA - Geólogos Consultores Asociados, report no. EG-1-58, 69 p.
- Elders, W. A., Olson, E., Hoagland, J. R., Barker, C., Johnson, P., and Collier, P., 1977, A comprehensive study of samples from geothermal reservoirs: Petrology and light stable isotope geochemistry of wells M48, M84, M90, M91 and Prian No. 1: Final report to the Department of Energy/Lawrence Berkeley Laboratory, UCR/IGPP report no. 77/37, 153 p.
- Elders, W. A., Hoagland, J. R., Olson, E. R., McDowell, S. D., and Collier, P., 1978, A comprehensive study of samples from geothermal reservoirs: Petrology and light stable isotope geochemistry of twenty-three wells in the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, Mexico: Final report to the Department of Energy/Lawrence Berkeley Laboratory, UCR/IGPP report no. 78/26, 264 p.
- Elders, W. A., Hoagland, J. R., McDowell, S. D., and Cobo, J. M., 1980, Hydrothermal alteration as an indicator of temperature and flow regime in the Cerro Prieto geothermal field of Baja California: Geothermal Resources Council, v. 4, p. 121-125.
- Elders, W. A., Williams, A. E., and Hoagland, J. R., 1981, An integrated model for the natural flow regime in the Cerro Prieto hydrothermal system, B. C., Mexico, based upon petrological and isotope geochemical criteria: Proceedings of the Third Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, Mexico; San Francisco, March 1981 (also this volume).

Mañón, A., Mazor, E., Jiménez, M., Sánchez, A., Fausto, J., and Zenizo, C., 1977, Extensive geochemical studies in the geothermal field of Cerro Prieto: Lawrence Berkeley Laboratory report no. LBL 7019, 113 p.

Mercado S., 1968, Localización de zonas de máxima actividad hidrotermal por medio de proporciones químicas, Campo de Cerro Prieto, México: Tercer Congreso Mexicano de Química, México, Sociedad Mexicana de Química Pura y Aplicada, 32 p.

Mercado S., 1970, High activity hydrothermal zones detected by Na/K, Cerro Prieto, Mexico: Proceedings, United Nations Symposium on the Development and Utilization of Geothermal Resources, Pisa; Geothermics, Special Issue 2, v. 2, p. 1367-1376.

Nehring, N. L. and Fausto, J., 1978, Gases in steam from Cerro Prieto, Mexico, geothermal wells: Proceedings of the First Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, Mexico, San Diego, September 1978, Lawrence Berkeley Laboratory report no. 7098, p. 127-129.

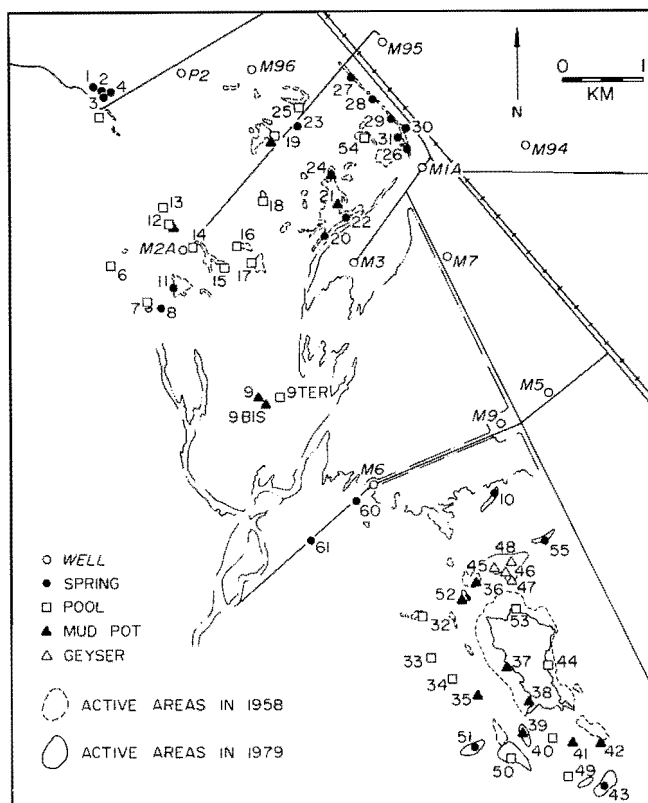
Seamount, D. T., Jr., and Elders, W. A., 1981, Use of wireline logs at Cerro Prieto in iden-

tification of the distribution of hydrothermally altered zones and dike locations, and their correlation with reservoir temperatures; Proceedings of the Third Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, Mexico; San Francisco, March 1981 (submitted to this volume).

Valette, J. N. and Esquer-Patiño, I., 1979, Geochemistry of the surface emissions in the Cerro Prieto geothermal field: Proceedings of the Second Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, Mexico; Mexicali, October, 1979, p. 241-254.

Valette-Silver, J. N., Thompson, J. M., and Ball, J. W., 1981, Relationship between water chemistry and mineralogy in the superficial part of the Cerro Prieto geothermal field; Extended abstract, Third Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, Mexico; San Francisco, March 1981, p. 25.

Welhan, J. A., Poreda, R., Lupton, J. E., and Craig, H., 1978, Gas chemistry and helium isotopes at the Cerro Prieto; Proceedings of the First Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, Mexico; San Diego, September 1978, Lawrence Berkeley Laboratory report no. 7098, p. 113-118.



XBL 826-739

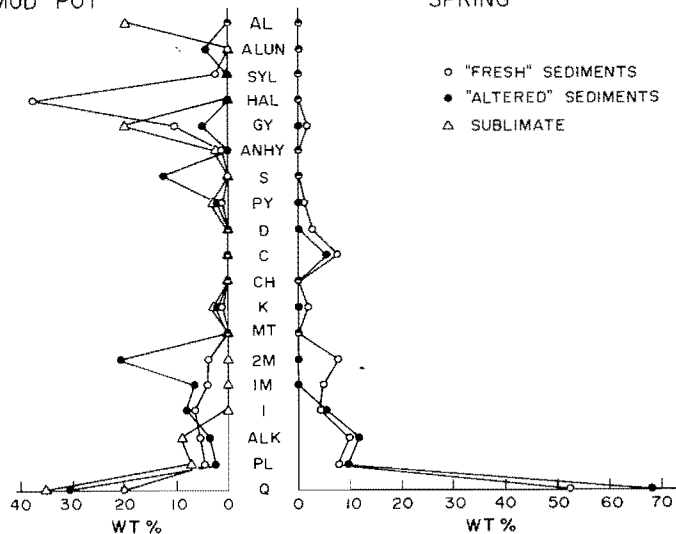
Figure 1. Location map of the surface emissions of the Cerro Prieto geothermal field (from Valette and Esquer-Patiño, 1979).

Figura 1. Mapa de ubicación de las manifestaciones superficiales en el campo geotérmico de Cerro Prieto (tomado de Valette y Esquer-Patiño, 1979).

MUD POT

SPRING

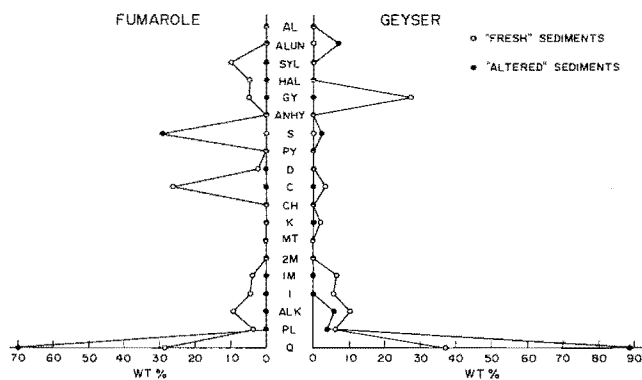
MINERAL SYMBOLS



XBL 826-740

Figure 2

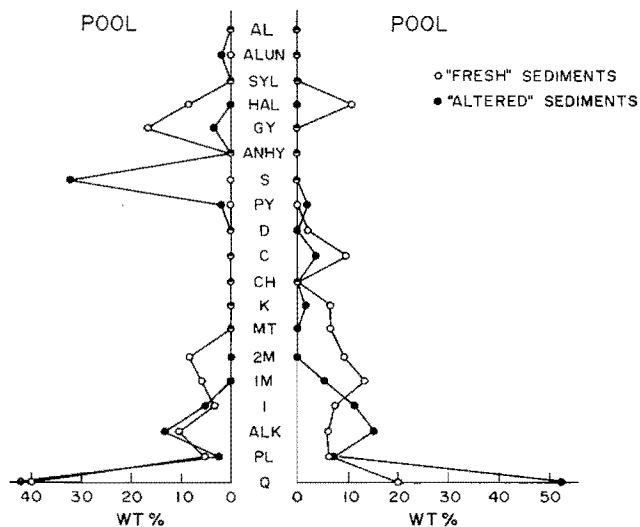
Figura 2



XBL 826-741

Figure 3

Figura 3



XBL 826-742

Figure 4

Figura 4

SIMBOLOS MINERALES

AL	-	Alumbr	K	-	Caolinita
ALUN	-	Alunita	MT	-	Montmorillonita
SYL	-	Silvita	2M	-	Illita/Montmori-
HAL	-	Halita			llonita de capas
GY	-	Yeso			mixtas, 50% expan
ANHY	-	Anhidrita			sible
S	-	Azufre	IM	-	Illita/Montmori-
PY	-	Pirita			llonita de capas
D	-	Dolomita			mixtas, 25% expan
C	-	Calcita			sible
CH	-	Clorita	I	-	Illita
ALK	-	Feldespat	PL	-	Plagioclasa
		potásico	Q	-	Cuarzo

Figures 2, 3 and 4. Quantitative mineralogical modal analyses of fresh sediments compared with sediments altered in five types of surface emissions.

Figuras 2, 3 y 4. Análisis mineralógicos cuantitativos modales de sedimentos sin alterar comparados con los de sedimentos alterados de cinco tipos diferentes de manifestaciones superficiales (Fig. 2: Hoya de lodo, y manantial caliente; Fig. 3: Fumaro la y "Géiser"; Fig. 4: Laguna caliente.)

Table 1. Chemical characteristics of the different categories of waters collected from the Cerro Prieto field (from Valette and Esquer-Patiño, 1979).

Tabla 1. Características químicas de diferentes categorías de aguas recogidas en el campo de Cerro Prieto (de Valette y Esquer-Patiño, 1979)

Sample	Category	T°C	pH	ppm Na*	ppm K*	ppm Ca	ppm Mg	ppm Cl	ppm SO ₄	ppm HCO ₃
N29	Spring	89	7.6	5115	664	357	4.6	8794	31	65
N21	Mud pot	100	6.8	160	19	38	2.0	14	307	124
N46	Geyser	99.5	2.0	92	157	128	72	31	5088	0
N12	Condensate	---	8.5	19	9	12	5	65	501	4
N5	Warm pool	22	2.0	953	157	2285	163	1258	5203	0

Sample	ppm Li	ppm SiO ₂	µg/l Al*	µg/l V*	ppm Fe	ppm Mn	Na/K	Na/Li	Na/Ca	Cl/SO ₄	Ca/Mg
N29	12.4	73	34	4.05	0.35	0.13	13.10	124.0	24.97	768	47.10
N21	2.3	30	---	---	0.20	0.04	14.32	21	7.34	0.12	11.50
N46	0.06	400	12800	79	117	1.83	1.00	107	1.55	0.12	1.00
N12	---	---	107	0.36	---	---	3.58	---	3.31	---	---
N5	1.5	200	93500	171	53	1.88	10.32	191.7	0.73	0.65	8.50

*Na, K = Atomic absorption analysis

*Al, V = Neutron activation analysis

Table 2. Mineralogical association of the sediments collected in the superficial manifestations.

Tabla 2. Asociaciones mineralógicas de sedimentos recogidos en manifestaciones superficiales.

Mineral	T < 50°C pH < 6 Eh < 0mV Pool	T > 50°C pH > 6.5 Eh > 0mV Spring	T > 85°C pH > 7 Eh > 0mV Mud Pot	T > 85°C pH < 6 Eh < 0mV Geyser	T ≈ 100°C pH ≈ 1 -400 < Eh < + 400 mv Fumarole	General Action
Quartz + SiO ₂	+	+	~	+	+	+
Plagioclase	~	+	+	~	-	
K-spar	+	+	+	+	-	
Illite	+	+	+	-	-	
1Mix	~	-	~	-	-	
2Mix	~	-	-	0	0	
Montmorillonite	0	0	~	0	0	
Kaolinite	~	-	~	-	0	
Chlorite	0	0	0	0	0	0
Calcite	-	-	-	-	-	-
Dolomite	-	-	-	0	-	-
Pyrite	+	+	+	+	0	+
Sulfur	+	0	+	0	+	+
Anhydrite	~	0	+	-	0	
Gypsum	-	~	-	-	-	-
Halite	-	~	-	-	-	-
Sylvite	0	0	-	0	-	-
Alunite	+	0	+	~	0	
Alum	0	0	+	0	0	

+ increased ~ variable Major changes
- decreased 0 absent

ALTERACION HIDROTHERMAL DE SEDIMENTOS ASOCIADOS CON LAS MANIFESTACIONES SUPERFICIALES DEL CAMPO GEOTERMICO DE CERRO PRIETO

RESUMEN

Las manifestaciones superficiales del yacimiento geotérmico de Cerro Prieto están restringidas a un área de 100 km² en la parte occidental del campo, cerca del volcán Cerro Prieto y de la laguna Volcans. Unas 57 manifestaciones estudiadas en 1979 fueron clasificadas como manantiales calientes, hoyas de lodo, lagunas, fumarolas y "geisers" (Valette y Esquer-Patiño, 1979). Con el propósito de desarrollar posibles métodos para la exploración de recursos geotérmicos, se inició un estudio de los cambios mineralógicos asociados con estas manifestaciones hidrotermales. El yacimiento de Cerro Prieto ya ha sido explorado extensamente mediante perforaciones profundas, de manera que es posible establecer relaciones directas entre las manifestaciones superficiales y los procesos hidrotermales a profundidad.

Cerca de 120 muestras de sedimentos superficiales fueron obtenidas, tanto del interior como del exterior de las manifestaciones. La mineralogía de los sedimentos alterados estudiados parece estar controlada por el tipo de manifestación. Una comparación entre los cambios mineralógicos en el yacimiento debidos a actividad hidrotermal de baja temperatura observados en muestras de pozos, y cambios mineralógicos en muestras de manifestaciones superficiales presentan, en general, tendencias similares a temperaturas por debajo de 180°C: aumento de cuarzo, feldespatos e illita, con la subsiguiente desaparición de caolinita, montmorillonita, calcita y dolomita. Estas asociaciones mineralógicas parecen ser productos característicos de la descarga de campos geotérmicos de alta intensidad.

INTRODUCCION

El yacimiento del campo geotérmico de Cerro Prieto se encuentra en sedimentos deltaicos del Río Colorado, y está compuesto por una serie de arenas, limos y lutitas. Sedimentos de margen de cuenca, más gruesos, provenientes de la Sierra de Cucapá no aparecen dentro del campo. El yacimiento geotérmico, actualmente explorado por más de 70 pozos de 1.5 a 3.5 km de profundidad, está caracterizado por temperaturas de hasta 350°C a menos de 2 km de profundidad.

Las manifestaciones hidrotermales superficiales están restringidas a un arco a lo largo del límite occidental del campo (Figura

1). Estas cubren un área de alrededor de 100 km², estando concentradas dentro de dos sectores: cerca del volcán Cerro Prieto, y en la laguna Volcans (Calderón, 1958; Mercado, 1968, 1970).

Un reciente estudio geoquímico de las manifestaciones superficiales realizado entre enero y agosto de 1979 (Valette y Esquer-Patiño, 1979), indicó la existencia de cuatro tipos morfológicos de manifestaciones: manantiales calientes, hoyas y lagunas de lodo, fumarolas, y lagunas calientes, cada uno caracterizado por propiedades físicas y químicas específicas. El análisis de los resultados químicos indica la existencia de un quinto tipo de manifestación, designado como "geisers", que no es fácilmente detectable por sus aspectos morfológicos. Estos no son verdaderos geisers; sin embargo arrojan fluidos con irregularidad. Las características químicas de estos cinco tipos de manifestaciones superficiales están indicadas en la Tabla 1, y su ubicación se muestra en la Figura 1, la que también indica la disminución del área en donde ocurren las manifestaciones superficiales desde que comenzó la producción de energía eléctrica en Cerro Prieto.

TECNICAS DE MUESTREO Y ANALISIS

Un total de 120 muestras de sedimentos de la superficie fueron obtenidas de las 57 manifestaciones superficiales estudiadas en el campo. Muestras superficiales fueron tomadas sistemáticamente, tanto del interior como del exterior de las manifestaciones hidrotermales. La separación entre muestras en una misma localidad fue de alrededor de 2 m. Además, se analizaron aproximadamente 60 muestras de seis núcleos de pozos perforados por la Comisión Federal de Electricidad durante la prospección y exploración del campo, prestándole especial atención a la parte superior no consolidada de los núcleos.

Los sedimentos de la superficie fueron obtenidos utilizando una pala de plástico, empaquetándolos en bolsas de plástico y almacenándolos en un laboratorio bajo refrigeración hasta su análisis. El análisis de la fracción gruesa del material consistió en un examen microscópico de cortes delgados pulidos. La fracción fina del material se estudió mediante difracción de rayos X, incluyendo, por separado, el análisis de muestras enteras, de fracciones de minerales de arcilla, y de muestras de minerales de arcillas glicoladas utilizando métodos descritos por Elders et al. (1978).

RESULTADOS

La composición mineralógica modal promedio de los sedimentos superficiales no alterados del área de Cerro Prieto, en porcentaje

Actualmente en el Centre de Recherche de Sedimentologie Marine, Universite de Perpignan, Avenue de Villeneuve, 66025 Perpignan, Francia

por peso, determinada utilizando difracción cuantitativa de rayos X es: cuarzo 28%, plagioclasa 6.6%, feldespato potásico 7.6 %, illita 9.5%, montmorillonita intercapa 11.5%, montmorillonita 9.7%, caolinita 7.6 %, calcita 11.6%, dolomita 2.3%, hematita 1.6%, y otros 4%.

Los sedimentos sin alterar de Cerro Prieto se utilizaron como referencia para seguir los cambios mineralógicos que ocurren en los sedimentos alterados por las manifestaciones superficiales.

La mineralogía de alteración en los sedimentos recogidos en las manifestaciones hidrotermales depende del tipo de manifestación. Los cinco tipos de manifestaciones superficiales, y la alteración mineralógica asociada con ellas son los siguientes:

1. Manantiales calientes. Los manantiales tienen una temperatura de alrededor de 90°C, un pH de 6.5 a 8.0, y un Eh de -25 a 100 mV. Su salinidad es aproximadamente 15 g/l, siendo el NaCl la sal predominante. Químicamente (Tabla 1) se caracterizan por su alto contenido de sílice (100 ppm), bajo contenido de sulfatos (35 ppm), y aluminio (50 ppb). Comparándolos con los sedimentos originales, los sedimentos alterados recogidos dentro de la boca de los manantiales calientes muestran un aumento en el contenido de cuarzo, sílice amorfa, plagioclasa, feldespato potásico, illita, y la aparición de pirita (Figura 2). Las cantidades de montmorillonita intercapa, caolinita, calcita y dolomita disminuyen dramáticamente. No se encuentra montmorillonita y clorita.

2. Hoyas, lagunas y volcanes de lodo. La temperatura de estas manifestaciones generalmente es muy cercana a los 100°C, el pH es menor de 8, y el Eh siempre es negativo. Su salinidad varía de 3 a 14 g/l, pero típicamente es menor de 5 g/l (Tabla 1). Los sulfatos son abundantes (300 ppm) y el contenido de sílice es menor de 50 ppb. La asociación mineralógica que aparece en los sedimentos alterados recogidos dentro de estas manifestaciones se caracteriza por la presencia de alunita, pirita, azufre, y yeso (Figura 2). Se observa un aumento en el contenido de montmorillonita intercapa y de illita, y una disminución en el contenido de plagioclasa y de feldespato potásico. Aquí también los sedimentos no contienen clorita.

5

3. "Géisers". A pesar de que no son verdaderos géisers, le hemos dado este nombre a las manifestaciones que esporádicamente emiten agua hirviendo. La temperatura de estas emisiones generalmente es de 100°C, su pH alrededor de 2, y su Eh es siempre negativo. La salinidad total de las aguas es de alrededor de 2 g/l (Tabla 1). Típicamente se observan altos contenidos de sílice (400 ppm); las razones Na/K son bastante bajas (~1.29), y los contenidos de aluminio frecuentemente son altos (max. 80 ppm). Dentro de los "géisers", los sedimentos presentan una reducción de illita, montmorillonita intercapa, calcita y

yeso. Por otro lado, es evidente el aumento en las cantidades de cuarzo, sílice amorfa, y feldespato potásico (Figura 3).

4. Fumarolas. En las fumarolas se observan dos intervalos de temperatura. Uno alrededor de los 45°C, y otro entre 80 y 100°C. En las fumarolas más calientes, los gases emitidos se caracterizan por un contenido muy alto de vapor (90%) asociado con CO₂, H₂S, SO₂ y HCl. En las fumarolas de menor temperatura predomina el CO₂. Los condensados se caracterizan por un pH cercano a 2, y por un Eh negativo o ligeramente positivo. La salinidad del condensado es muy baja (2 g/l), siendo los sulfatos (500 ppm) y los cloruros (100 ppm) las especies dominantes (Tabla 1). En los sedimentos alterados por las fumarolas, en general, los minerales originales fueron destruidos por los fluidos calientes y ácidos que se forman por la condensación del vapor y por la subsiguiente disolución de los gases. Al mismo tiempo que los minerales primarios son destruidos, se forma cuarzo, sílice morfa y azufre (Figura 3).

5. Lagunas calientes. La temperatura de estas lagunas generalmente es menor de 45°C, su pH varía entre 1 y 5, y su Eh es negativo o ligeramente positivo (max. +25 mV). La salinidad de los fluidos es siempre elevada, con un máximo de 135 g/l. Típicamente se encuentran altos contenidos de sulfato; el hierro, manganeso, aluminio y vanadio están notablemente concentrados (Tabla 1). Las reacciones entre los fluidos de las lagunas y los sedimentos generan cuarzo, sílice amorfa, feldespato potásico, illita, azufre, pirita, y yeso. Bajo estas condiciones se destruye calcita, dolomita y halita (Figura 4).

ALTERACION EN LOS POZOS

Los fluidos del yacimiento obtenidos en los cabezales de pozo presentan salinidades de alrededor de 19 g/l; los cationes predominantes son Na, Cl y K (Mañón et al., 1977). En la fase gaseosa, los componentes más importantes son el CO₂ y el H₂S (Nehring y Fausto, 1978; Welhan et al., 1978).

El aumento progresivo de temperatura con la profundidad produce transformaciones dramáticas en la mineralogía de los sedimentos del yacimiento. Estos cambios han sido descritos en una serie de trabajos de nuestro grupo de la Universidad de California en Riverside (Elders et al., 1977, 1978, 1980, 1981).

La Figura 1 de Elders et al. (1981, estas actas) muestra las zonas mineralógicas hidrotermales progresivas que se han desarrollado en las areniscas del yacimiento a temperaturas de hasta 350°C. A las temperaturas más bajas, los sedimentos comienzan a perder caolinita y montmorillonita. A 150-180°C estos minerales desaparecen y hay una transición hacia la zona de clorita-illita en la cual dolomita e illita-montmorillonita intercapa desaparecen, siendo reemplazados por clorita e illita. Arriba

de 180°C cuarzo y feldespato potásico disminuyen espectacularmente. Alrededor de los 225°C, una serie de reacciones de descarbonatación lleva a la formación de varios aluminosilicatos de calcio, tales como wairakita, epidota, prehnita, actinolita y diopsida. Arriba de 325°C se observa la desaparición de illita y la formación de biotita y vermiculita, formando una asociación mineralógica metamórfica de facies de esquistos verdes.

Una secuencia de minerales hidrotermales algo diferente se observa en las lutitas del yacimiento. La diferencia probablemente se deba a la baja permeabilidad de las lutitas con respecto a las areniscas (Seamount y Elders, 1981, estas actas). En las lutitas la secuencia es: menos de 150°C - zona de montmorillonita; 150-250°C - zona de illita (equivalente a la zona de illita + clorita de las areniscas); 250-300°C - zona de clorita (traslapa con la zona de aluminosilicatos de calcio de las areniscas); más de 300 °C - zona de feldespatos (traslapa con la zona de biotita-vermiculita de las areniscas).

CONCLUSIONES

En base a nuestros estudios mineralógicos parece claro que la mineralogía de los sedimentos alterados en la superficie está directamente controlada por los parámetros físico-químicos de los fluidos descargados. En la parte superior del yacimiento, la temperatura parece ser el factor más importante. En las areniscas superficiales las reacciones están controladas por el Eh y el pH. En la superficie, el parámetro dominante es el grado de oxidación de los gases hidrotermales. Las P_{O_2} , PCO_2 , PH_2S y PSO_2 determinan el par Eh-pH, y modifican el equilibrio entre la solución y los minerales (Valette et al., 1981, estas actas). Obviamente el otro factor importante es la concentración iónica en el fluido, especialmente de sílice, aluminio, calcio, potasio, sulfato y cloruro. En cada caso, las características del fluido hidrotermal dan origen a una paragénesis típica de minerales de alteración.

En resumen, la acción de la alteración hidrotermal en los sedimentos de todos los tipos de manifestaciones superficiales se caracteriza en general por la formación de cuarzo, sílice amorfa, azufre, sulfuros, y feldespatos potásicos, y por la desaparición de calcita, dolomita, yeso,

halita y silvinita. En la Tabla 2 se resumen estas relaciones.

La comparación de los progresivos cambios observados en la mineralogía del material del yacimiento en función del aumento de temperatura y de aquellos cambios debidos a la acción del fluido hidrotermal sobre los sedimentos superficiales, muestra algunas tendencias en común: aumento de cuarzo, feldespato potásico e illita, y disminución de montmorillonita, caolinita, calcita y dolomita. La clorita, frecuentemente asociada con illita en los pozos, no se encuentra en las manifestaciones superficiales. En las manifestaciones superficiales estos cambios mineralógicos ocurren a menores temperaturas que en los pozos. Esta diferencia está relacionada con la variación de los parámetros físico-químicos de las reacciones químicas: en la superficie la P_{O_2} es mayor, y la PCO_2 es menor que en el yacimiento.

En las manifestaciones hidrotermales observamos la formación de cuarzo y feldespato potásico a medida que el fluido se enfría. En el yacimiento, el flujo de aguas calientes a través de rocas frías, especialmente en algunos pozos ubicados en la parte occidental del campo, produce la misma asociación (Elders et al., 1981). Esta paragénesis asimismo es típica de las "zonas de descarga hidrotermal" en el campo de Cerro Prieto. Elders et al. (1981) han mostrado que zonas con cemento de calcita y yeso corresponden a "zonas de recarga", donde aguas frías circulan a través de rocas calientes.

AGRADECIMIENTOS

Quisieramos agradecer al personal de la Comisión Federal de Electricidad por la ayuda y constante apoyo que nos han brindado. También hemos sacado provecho de las interesantes discusiones que hemos tenido con los colegas de UCR, USGS y LBL.

El trabajo fue auspiciado principalmente por el Departamento de Energía contrato No. 7100410, a través del Lawrence Berkeley Laboratory. Este es el informe No. UCR/IGPP-81/12 del Institute of Geophysics and Planetary Physics de UCR. El texto fue mecanografiado por L. Lovell, y los dibujos fueron realizados por L. Jankov.