

PRECISION GRAVITY STUDIES AT CERRO PRIETO — A PROGRESS REPORT

R. B. Grannell,* R. C. Kroll,* R. M. Wyman,** and P. S. Aronstam*†

*California State University
Long Beach, California, U.S.A.

**University of Nevada
Boulder City, Nevada, U.S.A.

INTRODUCTION

The initial intent of the precision gravity effort at Cerro Prieto was twofold: 1) The measurement of precise gravity values at repeated intervals (annually) which, when reduced to observed gravity differences between a stable base and field stations, and when accompanied by repeated leveling, could provide information about changes in the reservoir with time. The interpretation of the reduced data could be indicative of both mass and elevation changes. 2) The data could also be reduced to Bouguer anomaly values, whose interpretation would yield information concerning regional geologic structure.

To these two original objectives, a third and fourth have now been added: 3) Careful statistical analyses of field data provide a case study for the assessment of the utility of the gravity method in monitoring reservoir changes with time. Comprehensive assessments of precision gravity in this and other applications are only now being initiated, and are not widely available in the literature (Grannell et al., 1981b). One outgrowth of this effort would be an evaluation of the precision capabilities of available state-of-the-art instrumentation. 4) The Cerro Prieto gravity effort could form an integral part of a more comprehensive study of temporal changes in the Salton Trough, if the survey were to be tied in to similar efforts (both gravity and leveling) being conducted across the border, most notably at Heber.

The gravity survey which has been carried out at Cerro Prieto to meet the aforementioned objectives has been an ongoing project for more than three years, and the initial installation of stations has been followed by three sets of repetitions. This paper will concentrate on the second and third set of repeated gravity values, and their comparison with previous data. For more complete information on the earlier phases of the work, two full-length articles (Chase et al., 1979, and Grannell et al., 1981) are useful.

DATA COLLECTION AND REDUCTION

A third and fourth year of precision gravity data collection and reduction have now been completed at the Cerro Prieto geothermal field. The

details of the collection and reduction processes are, for the most part, similar to the procedures followed in the previous two years (Chase et al., 1979; Grannell et al., 1981). In summary, 66 permanently monumented stations were occupied between December and April of 1979-80 and 1980-81 by a LaCoste and Romberg gravity meter (G300) at least twice, with a minimum of four replicate values obtained each time. Station 20 alternate, a stable base located on Cerro Prieto volcano, was used as the reference base for the third year and all the stations were tied to this base, using four to five hour loops. During the fourth year, precision problems were encountered in using a small car on the bumpy volcano road, and the base was moved to Station 20 lower down on the volcano. The station locations are shown on Figure 1.

The field data were reduced to observed gravity values by (1) multiplication with the appropriate calibration factor; (2) removal of calculated tidal effects; (3) calculation of average values at each station, and (4) linear removal of accumulated instrumental drift which remained after carrying out the first three reductions.

Following the reduction of values and calculation of gravity differences between individual stations and the base stations, standard deviations were calculated for the averaged occupation values (two to three per station). In addition, pooled variance calculations were carried out to estimate precision for the surveys as a whole.

PRECISION OF MEASUREMENT AND INTERPRETATION OF RESULTS

Table 1 lists all gravity data taken to date, and contains four double columns. Each double column consists of the gravity differences followed by the standard deviations for those differences at all the stations occupied in a particular year. The most recent set of data is tabulated under the heading "Year Four."

One rather striking feature of the third year data (in comparison with previous values) is the remarkable improvement in precision. For most stations, the standard deviations are less than 10 microgals. This is borne out by the pooled variance calculation, which yielded an overall standard deviation for the entire survey of 8 microgals. This figure is quite small, and compares quite favorably with values obtained on Vancouver

† Now at the University of California, Riverside

Island with meter G300 during the summer of 1979, where many more occupations were made per station using a different field technique, and transport was over smooth paved roads (Grannell et al., 1981b). We ascribe the improvement in precision here to the use of a spring-mounted transport box which damped out vibrations which are deleterious to precision, and to use of a larger car with a central location for the gravity meter. A substantial decrease in the quantity and magnitude of tares (in which the instrument drifts, generally upward and permanently at an excessive and variable rate) was observed in this data collection and transport is still considered to be the single greatest deterrent to high precision gravimetry. During the fourth year, the use of a smaller car and a rear location caused some deterioration of the standard deviations; this was partially corrected by relocating the meter and selecting a base station with a less bumpy access. Use of a heavier vehicle was also effective. Pooled variance calculations ranged from 7 to 11 microgals for parts of the survey conducted under different transport conditions.

Another factor which was helpful was the reduction of a large part of the data in the field as it was collected, using previously generated tidal correction tables. This permitted extra reoccupations of stations with poor quality precisions, and the culling of data where a tare caused excessive and non-removable drift; one entire loop of stations in 1979-80 was rejected on this basis.

For the most part, an examination of the year to year gravity differences show no significant variations. The criteria used here to define "significant variations" were twofold: (1) The observed gravity variations should be in excess of the square root of the added variances of the stations used to define a particular variation; and (2) a variation should affect several stations, and in the same sense (all increased, or all decreased). It is recognized that this is restrictive, but groups of stations which meet these criteria are likely to exhibit real variations.

The most prominent variations in gravity occurred over a large portion of the geothermal field between the second and third repetitions (third and fourth years). Significant changes of .02 mgal or more, all in a positive sense, were found at some 20 gravity stations; the maximum value was nearly +.09 mgal. The prominent changes appear to be temporally associated with the Victoria earthquake of 1980, which occurred on June 8, between the two sets of repetitions. This earthquake caused considerable ground deformation, with the maximum value being more than 40cm of ground subsidence (de la Pena L., 1981).

The sense, location, and magnitude of this maximum deformation correlate well with the observed maximum gravity change, if one assumes the gravity change to be along a Bouguer gradient of .06 mgal/ft (increasing for subsidence). The gravity changes are plotted on Figure 1, with a contour interval for the isogal lines of .02 mgal. The changes appear to be spatially associated with the Hidalgo fault, in that the largest gravity

variations occur east of, and in close proximity to, this fault (its trace is shown on Figure 1). However, some changes in gravity differences also occurred west of the fault in the older part of the field, in the vicinity of wells 9, 29, 25, 5, 14, 39 and 10, just north and west of the power plant. No significant changes in gravity had been observed previously in this area. Although some of the subsidence associated with the earthquake may have been due to lurching of surficial sediments, we feel that much of it occurred at depth in the producing zones. There is some evidence to support this contention: (1) the largest changes in gravity are confined to the geothermal field, and few stations outside the field, located in a similar sedimentary sequence, were affected at all; and (2) deformation to the southeast, toward the earthquake epicenter but away from the field, decreases in magnitude. Therefore, the cause of the subsidence appears to be due to production of the field; the removal of the buoyant support for overlying materials did not result in immediate subsidence, perhaps because of a fundamental strength of indurated materials which must be overcome. The earthquake then acted as the triggering mechanism to initiate the subsidence.

The magnitude of the gravity changes is not very large, less than should have occurred if no recharge were occurring. The gravity results are thus not in disagreement with the interpretation of resistivity decreases (Wilt and Goldstein, 1981), which suggests recharge of colder, shallower groundwater as an operative mechanism within the field.

Outside the producing zone to the northeast, small positive gravity changes occurred in the vicinity of Jalapa prior to the third year of occupation. Although the changes are small (ranging from .015 to .030 mgal), they are observed at six different stations in that area (refer to Table I), and minor subsidence has also been detected in the interpretation of leveling data taken during the same time interval (de la Pena L., personal communication, 1981). We interpret these changes to be due to the 1979 Mexicali earthquake ($M = 6+$), since the earthquake occurred just prior to the third year repetition, and the leveling data show increasing amounts of elevation decrease toward the Mexicali airport, which was located near the epicenter of that earthquake.

SUGGESTIONS FOR FURTHER WORK

At the present time, more than 3000 individual gravity readings have been taken at the Cerro Prieto geothermal field over an interval of slightly more than three years. The collection of this quantity of data has so far precluded any evaluation beyond reduction to observed gravity values and simple statistical calculations. Our next step is to achieve a more sophisticated statistical analysis of values for individual stations. To that end, we need to calculate the most probable values of the means and the corresponding estimated errors of those means; since these statistics are concerned with means based on several repetitions, rather than on the likelihood for error of individual values (as expressed by the standard deviations), smaller changes in

gravity are liable to be significant, and we may thus detect earlier (non-earthquake related) gravity changes due to the production process (for instance associated with boiling around some of the older wells where recharge may not be complete). Careful culling of the first two data sets is also needed, since these data were inferior in precision to the last two data sets, but contain many useful data currently being masked by imprecisions. Appropriate exclusion criteria must be applied to extreme data.

The gravity data must also be integrated with other types of data which have been collected during the same time interval. Of particular value would be quantitative integration with the leveling data (allowing separation of elevation and mass effects using Whitcomb's 1976 equations), and with the electrical resistivity data, placing limits on the types of changes possible (which must be compatible with both data sets). Careful analysis of mass removal (from production figures) would allow modeling of the gravity changes which should have occurred in the absence of both reinjection and recharge. This may allow some quantitative estimate of the amount of recharge which is occurring in the field.

We also feel that the gravity collection effort at Cerro Prieto should be continued. This need not be a full set of data every year; rather, selected stations (15 to 20 of the total, mainly in the producing zone, with bedrock ties) should be done annually, and the entire gravity station array done every other year. Second order leveling should accompany each gravity effort. We have yet to collect a sequence of two repetitions of high precision which were not separated by deforming seismic activity.

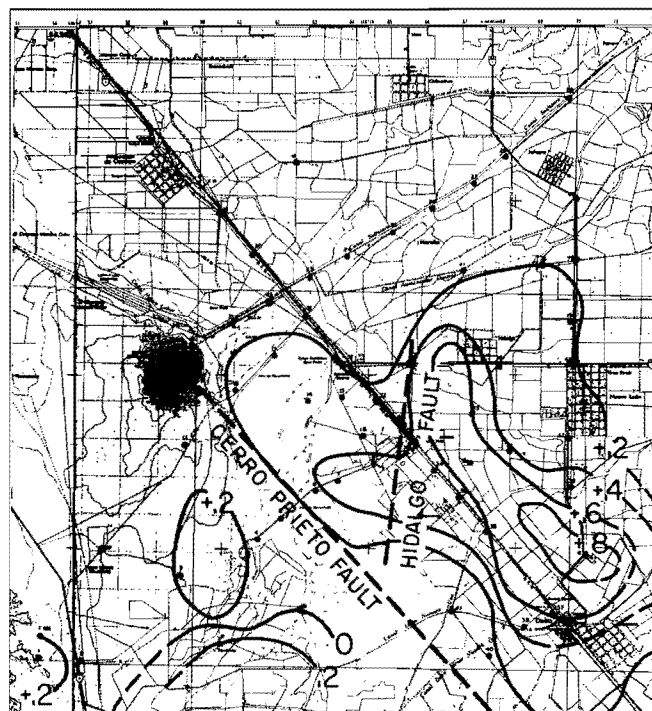
ACKNOWLEDGMENTS

The work reported here was generally funded by the U. S. Department of Energy through the Lawrence Berkeley Laboratory. Considerable logistical support was provided not only by personnel from LBL, but also by several Mexican scientists and engineers working for the Comisión Federal de

Electricidad at Cerro Prieto. To all these individuals, too numerous to mention individually, we extend our heartfelt thanks.

REFERENCES CITED

- Chase, D. S., Clover, R. C., Grannell, R. B., Leggewie, R. M., Eppink, J., Tarman, D. W., and Goldstein, N. E., 1979, Precision gravity studies at Cerro Prieto: First symposium on the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, Mexico, Proceedings, Lawrence Berkeley Laboratory technical paper LBL - 7098, p. 249-257.
- de la Peña L., A., 1981, Results from the first order leveling surveys carried out in the Mexicali Valley and at the Cerro Prieto field, Baja California: Third symposium on the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, Mexico, Abstracts, Lawrence Berkeley Laboratory technical paper LBL - 11967, p. 26.
- Grannell, R. B., Tarman, D. W., Clover, R. C., Leggewie, R. M., Aronstam, P. S., Kroll, R. C., and Eppink, J., 1981, Precision Gravity Studies at Cerro Prieto - The Second Year: Second symposium on the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, Mexico, Proceedings p. 329.
- Grannell, R. B., Simila, G., Whitcomb, J. H., Aronstam, P. S., and Clover, R. S., 1981b, An assessment of applicability of using precise surface gravity measurements to monitor the response of a geothermal reservoir to exploitation: A final technical report submitted to the Lawrence Berkeley Laboratory in partial fulfillment of D. O. E. Contract 6633802, 158 p.
- Whitcomb, J. H., 1976, New vertical geodesy: Journal of geophysical research, v. 81, p. 4937-4944.
- Wilt, M. J. and Goldstein, N. E., 1981, Results from two years of resistivity monitoring at Cerro Prieto: Third symposium on the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, Mexico, Abstracts, Lawrence Berkeley Laboratory technical paper LBL - 11967, p. 32.



XBL 819-7262

Figure 1. Map of gravity changes which occurred between the 1979-80 and 1980-81 repetitions. Coutour interval is .02 mgal. The pattern of changes is spatially associated with the geo-thermal field and with the Hidalgo and Cerro Prieto faults.

Figura 1: Mapa de los cambios de gravedad que ocurrieron entre las repeticiones de 1979-80 y de 1980-81. El intervalo entre contornos es .02 mgal. La configuración de los cambios está espacialmente asociada con el campo geotérmico y con las fallas de Hidalgo y Cerro Prieto.

Table 1. Summary of observed gravity differences between station 20 bis on Cerro Prieto volcano and other stations in the Cerro Prieto geothermal field network. All gravity differences (under First, Second, Third, and Fourth Year headings) and standard deviations (under S headings) are in milligals.

Tabla 1. Resumen de las diferencias de gravedad observadas entre la estación 20 bis, localizada sobre el volcán de Cerro Prieto, y otras estaciones de la red del campo geotérmico de Cerro Prieto. Todas las diferencias de gravedad (bajo los encabezamientos Primero, Segundo, Tercero, y Cuarto Año) y las desviaciones estándar (bajo los encabezamientos S) están dadas en miligals.

Station	First Year	S	Second Year		Third Year	S	Fourth Year	S
1 bis	19.075	.022	19.063	.008	19.057	.004	19.079	.003
1	20.870	.022	20.846	.013	20.844	.006	20.871	.013
2	17.417	.013	17.391	.010	17.400	.001	17.405	.006
3	9.839	.030	9.812	.015	9.802	.006	9.324	.004
4	13.800	.024	13.813	.004	13.821	.004	13.840	.014
5	16.363	.019	16.326	.105	16.385	.002	16.400	.009
6	18.943	.481	18.684	.054	18.705	.001	18.751	.004
7	19.719	.032	19.734	.046	19.758	.005	-	-
7 bis	-	-	-	-	19.777	.006	19.831	.009
8	21.024	.042	21.026	.037	21.040	.008	-	-
9	21.479	.025	21.487	.030	21.502	.011	21.544	.006
10	20.848	.475	20.545	.051	20.566	.006	20.632	.013
11	15.053	.018	15.046	.005	15.055	.003	15.068	.001
12	20.808	.006	20.826	.007	20.814	.000	20.851	.018
12 bis	21.493	.002	21.521	.010	21.509	.004	21.533	.013
13	23.498	.004	23.511	.009	23.516	.010	23.513	.014
13 bis	24.088	.001	24.112	.010	24.107	.004	24.132	.013
14	21.917	.053	21.894	.015	21.907	.008	-	-
14 bis	-	-	22.093	.015	22.102	.008	22.127	.001
15	22.638	.011	22.587	.162	-	-	-	-
15 bis	-	-	-	-	22.634	.003	22.651	.003
16	22.189	.018	22.192	.019	22.203	.001	-	-
17	21.376	.007	21.386	.001	21.399	.013	21.463	.013
18	19.611	.004	19.635	.008	19.618	.007	19.674	.011
19	17.966	.011	17.984	.003	17.990	.001	18.010	.014
19 bis	-	-	-	-	17.874	.001	17.882	.006
20	18.552	.022	18.537	.019	18.537	.010	18.548	.010
21	24.995	.012	24.973	.012	25.000	.003	25.006	.018
22	25.407	.019	25.396	.012	25.406	.000	25.402	.011
23	21.607	.008	21.619	.022	21.623	.008	-	-
23 bis	22.300	.014	22.249	.011	-	-	-	-
24	19.215	.006	19.213	.007	19.237	.004	19.231	.002
25	17.496	.010	17.483	.005	17.502	.008	17.501	.012
26	15.874	.061	15.906	.008	15.914	.005	15.920	.012
27	14.827	.004	14.826	.007	14.831	.006	14.859	.011
28	14.257	.009	14.262	.004	14.273	.001	14.283	.011
29	14.500	.009	14.502	.004	14.532	.008	14.546	.005
30	25.528	.010	25.532	.007	25.539	.005	25.547	.007
30 bis	-	-	25.103	.010	25.107	.016	25.126	.004
31	24.286	.015	24.279	.004	24.288	.010	24.298	.007
32	23.578	.801	23.568	.008	23.579	.007	23.587	.011
33	22.485	.144	22.525	.142	22.650	.000	22.671	.014
34	18.985	.017	18.968	.055	18.919	.023	-	-
34 bis	-	-	18.901	.007	-	-	18.970	.005
35 bis	-	-	16.387	.037	16.426	.003	16.443	.011
36	13.353	.023	13.328	.057	13.371	.003	13.447	.006
37	9.144	.016	9.091	.093	9.143	.003	9.201	.016
38	13.187	.017	13.205	.008	13.212	.008	13.262	.008
38 bis	-	-	12.758	.014	12.768	.004	12.797	-
39	11.427	.000	11.425	.010	11.434	.005	11.471	.007
40	12.570	.006	12.595	.010	12.596	.005	12.602	.012
41	10.146	.023	10.155	.008	10.142	.007	10.238	.003
42	16.170	.031	16.170	.015	16.182	.000	16.210	.008
43 bis	-	-	17.926	.007	17.919	.002	17.942	.008
44	16.901	.003	16.918	.006	16.917	.005	16.937	.006
45	15.403	.001	15.414	.010	15.425	.006	15.435	.003
46	16.791	.011	16.799	.002	16.799	.011	16.826	.011
47	17.603	.010	17.616	.018	17.623	.012	17.622	.006
48	20.646	.025	20.646	.006	20.646	.011	20.644	.001
49	26.985	.190	27.105	.012	27.104	.008	27.132	.009
50	13.077	.004	13.077	.006	13.075	.005	13.091	.005
51	-	-	7.810	.002	7.811	.001	7.797	.006
52	-	-	11.650	.012	11.650	.000	11.651	.006
53	-	-	13.037	.019	13.041	.000	13.045	.008
54	-	-	16.997	.012	17.000	.001	17.020	-
110	-	-	-	-	9.323	.009	9.327	.018

ESTUDIOS DE GRAVEDAD DE PRECISION EN CERRO PRIETO — INFORME DE AVANCE

INTRODUCCION

Inicialmente los objetivos de las medidas de gravedad de precisión en Cerro Prieto fueron dos: 1) La repetición anual de la medición de valores precisos de gravedad que, reducidos a diferencias de gravedad observadas entre una base permanente y estaciones de campo, y acompañadas por repetidos nivelamientos, pudieran proveer información sobre cambios en el yacimiento a través del tiempo. La interpretación de los datos reducidos serían indicativos de cambios de masa y de elevación. 2) Los datos podrían también reducirse a valores de anomalía de Bouguer cuya interpretación daría información concerniente a la estructura geológica regional.

A estos dos objetivos originales, se han agregado ahora tercer y cuarto objetivos: 3) Cuidadosos análisis estadísticos de datos de campo proveen un caso de estudio para la evaluación de la utilidad del método de gravedad en el monitoreo de los cambios del yacimiento con el tiempo. Evaluaciones completas de gravedad de precisión para ésta y otras aplicaciones se han iniciado sólo recientemente y no se encuentran disponibles ampliamente en la literatura técnica (Grannell et al. 1981b). Un subproducto de este trabajo podría ser una evaluación de la capacidad de precisión de la instrumentación más adelantada disponible actualmente. 4) El estudio de gravedad de Cerro Prieto podría ser parte integral de un estudio más completo de los cambios temporales en la depresión de Salton si el levantamiento se vinculara a estudios similares (de gravedad y nivelación) llevados a cabo del otro lado de la frontera, especialmente en Heber.

El relevamiento de gravedad que se ha efectuado en Cerro Prieto para alcanzar los objetivos previamente mencionados es un proyecto que ha estado en marcha por más de tres años. La ocupación inicial de estaciones fue seguida por tres conjuntos de repeticiones. Este trabajo se concentrará sobre el segundo y el tercer conjunto de valores de gravedad y su comparación con datos previos. Las fases anteriores de este estudio han sido descritos por Chase et al, 1979 y Grannell et al, 1981.

OBTENCIÓN Y REDUCCIÓN DE DATOS

En el campo geotérmico de Cerro Prieto se han completado el tercer y cuarto año de obtención de datos de precisión de gravedad y su correspondiente reducción. Los detalles de los procesos de colección y reducción de datos son, en su mayoría, similares a los procedimientos seguidos en los dos años previos (Chase et al, 1979; Grannell et al,

1981). En resumen, entre diciembre y abril de 1979-80 y de 1980-81 se ocuparon, al menos dos veces, 66 estaciones permanentes con un gravímetro LaCoste y Romberg (G300), obteniéndose cada vez un mínimo de cuatro medidas. La estación 20 alterna, una base estable ubicada sobre el volcán de Cerro Prieto, se usó como base de referencia en el tercer año, y todas las estaciones se ligaron a dicha base por medio de circuitos cuyo levantamiento duraba de cuatro a cinco horas. Durante el cuarto año, se encontraron problemas con la precisión de las medidas al utilizar un automóvil pequeño para el transporte del gravímetro sobre la despareja carretera del volcán, y la base se trasladó a la estación 20 situada a menor elevación sobre el volcán. La Figura 1 muestra la ubicación de las estaciones.

Los datos de campo se redujeron a valores de gravedad mediante (1) multiplicación por el factor de calibración apropiado; (2) remoción de los efectos de marea calculados; (3) cálculo de los valores promedios de cada estación y (4) remoción lineal de la deriva instrumental acumulada que quedaba luego de efectuarse las primeras tres reducciones.

Después de la reducción de valores, y de calcular las diferencias de gravedad entre las estaciones individuales y las estaciones base, se calcularon las desviaciones estándar para los valores de ocupación promediados (2 ó 3 por estación). Además, se llevaron a cabo cálculos agrupados de varianza, para estimar la precisión global de los relevamientos.

PRECISION DE LAS MEDICIONES E INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS

La Tabla 1 es una lista de todos los datos de gravedad tomados hasta la fecha. La tabla contiene cuatro columnas dobles; cada columna doble consiste en diferencias de gravedad, seguidas de las desviaciones estándar para aquellas diferencias en todas las estaciones ocupadas en un año dado. El conjunto de datos más reciente se tabuló bajo el encabezamiento "Year Four" (Cuarto Año).

Una característica sorprendente de los datos del tercer año (en comparación con valores previos) es el notable incremento en la precisión. Para la mayoría de las estaciones, las desviaciones estándar son menores que 10 microgales. Esto es señalado por los cálculos de varianza agrupada, que dieron una desviación estándar total de 8 microgales para el entero relevamiento. Este valor es bastante pequeño y compara bastante favorablemente con valores obtenidos en la Isla de Vancouver con el gravímetro G300 durante el verano de 1979, donde se efectuaron muchas más ocupaciones por estación, utilizando una técnica de campo diferente, y

donde el transporte fue sobre rutas pavimentadas en buen estado (Grannell et al., 1981b). Atribuimos el incremento en la precisión al uso de una caja de transporte montada sobre resortes que amortiguó vibraciones perjudiciales para la precisión, y al uso de un vehículo más grande, ubicando el gravímetro en el centro del mismo. En este relevamiento se observó una disminución sustancial en la cantidad y la magnitud de las taras (en la cual el instrumento deriva, generalmente permanentemente hacia valores mayores a una velocidad excesiva y variables). El transporte del gravímetro se considera aún como el mayor impedimento en la gravimetría de alta precisión. Durante el cuarto año, el uso de un automóvil más pequeño y una ubicación trasera de la caja de transporte ocasionó algunos deterioros en las desviaciones estándar; esto se corrigió parcialmente reubicando el gravímetro y seleccionando una estación base con un acceso con menos baches. El uso de un vehículo más pesado también fue efectivo. Los cálculos de varianza agrupada variaron entre 7 y 11 microgales para partes del relevamiento realizado bajo condiciones de transporte diferentes.

Otro factor útil fue la reducción de una gran parte de los datos en el campo, a medida que se obtenían, utilizando tablas de corrección de mareas generadas previamente. Esto permitió reocupaciones adicionales de estaciones con precisiones de baja calidad, y la eliminación de datos donde una tara ocasionó una desviación excesiva y no removible; sobre esta base se rechazó un entero circuito de estaciones de 1979-80.

En su mayor parte, un examen de las diferencias de gravedad de año en año no muestra variaciones significativas. Los criterios que se utilizaron aquí para definir "variaciones significativas" fueron dos: (1) Las variaciones de gravedad observadas deben ser superiores a la raíz cuadrada de la suma de las varianzas de las estaciones utilizadas para definir una variación dada; y (2) Una variación debe afectar varias estaciones y en el mismo sentido (todas incrementadas o todas disminuídas). Se reconoce que esto es restrictivo, pero es probable que grupos de estaciones que cumplan este criterio exhiban variaciones reales.

Las variaciones más notorias de gravedad tuvieron lugar sobre una gran parte del campo geotérmico entre la segunda y tercera repetición (tercero y cuarto años). Se encontraron cambios significativos de .02 mgal o más, todos en sentido positivo, en 20 estaciones gravimétricas. El valor máximo fue cercano a + .09 mgal. Los cambios prominentes parecen estar asociados temporalmente con el terremoto Victoria del 8 de junio de 1980 que ocurrió entre los dos conjuntos de repeticiones. Este terremoto ocasionó una deformación considerable del terreno, con un valor máximo de más de 40 cm de asentamiento de terreno (de la Peña L., 1981).

El sentido, ubicación y magnitud de esta deformación máxima se correlaciona con el máximo cambio de gravedad observado, si se

supone que el cambio de gravedad ocurre a lo largo de un gradiente de Bouguer de .06 mgal/ft (aumentado por el asentamiento del terreno). Los cambios de gravedad están ilustrados en la Figura 1 usando un intervalo entre contornos de .02 mgal. Los cambios parecen estar asociados espacialmente con la falla Hidalgo en cuanto a que los mayores cambios de gravedad ocurren al este y muy cerca de la misma (en la Figura 1 se muestra su traza). Sin embargo, también tuvieron lugar cambios en las diferencias de gravedad al oeste de la falla, en la parte más antigua del campo, en la vecindad de los pozos 9, 29, 25, 5, 14, 39 y 10, justo al norte y al oeste de la planta generadora. Previamente no se habían observado cambios de gravedad en esta área. Aunque parte del asentamiento del terreno asociado con el terremoto podría deberse al sacudimiento de los sedimentos superficiales, nosotros creemos que la mayor parte tuvo lugar a profundidad en las zonas productoras. Hay algunas evidencias que apoyan este argumento: (1) los cambios más grandes de gravedad están confinados al campo geotérmico, y sólo unas pocas estaciones fuera del mismo ubicadas en una secuencia sedimentaria parecida se vieron afectadas; y (2) la deformación hacia el sudeste, hacia el epicentro sísmico (alejándonos del campo), decrece en magnitud. Por consiguiente, la causa del asentamiento parece deberse a la explotación del campo; la extracción del soporte boyante de los materiales suprayacentes no dió como resultado un asentamiento inmediato, quizás por causa de una resistencia fundamental de los materiales endurecidos que debe vencerse. El sismo actuó, entonces, como un mecanismo disparador para iniciar el asentamiento del terreno.

La magnitud de los cambios de gravedad no es muy grande, menor que la que debería haber ocurrido si no hubiera recarga. Los resultados de gravimetría no están en desacuerdo con la interpretación de las disminuciones de resistividad (Wilt y Goldstein, 1981), que sugiere recarga de agua subterránea más fría, y somera, como un mecanismo actuando dentro del campo.

Fuera de la zona de producción, al noreste, cambios pequeños (variando de .015 a .030 mgal) se observaron en seis estaciones diferentes en esa área (ver Tabla 1), y también se ha detectado asentamiento menor en la interpretación de datos de nivelación obtenidos durante el mismo periodo de tiempo (de la Peña L., comunicación personal, 1981). Interpretamos que estos cambios se deben al sismo de Mexicali de 1979 ($M = 6+$), dado que el mismo ocurrió justo antes de la repetición del tercer año, y los datos de nivelación muestran crecientes cantidades de decrementos de elevación hacia el aeropuerto de Mexicali, que estaba ubicado cerca del epicentro de dicho sismo.

SUGERENCIAS PARA FUTUROS TRABAJOS

Hasta el presente se han tomado más de 3000 lecturas individuales de gravedad en el campo geotérmico de Cerro Prieto en un período

de poco más de tres años. La recolección de esta cantidad de datos ha imposibilitado hasta ahora cualquier evaluación más allá de la reducción a valores de gravedad observados y simples cálculos estadísticos. Nuestro próximo paso será llevar a cabo un análisis estadístico más sofisticado de valores para estaciones individuales. Con ese fin, necesitamos calcular los valores más probables de los promedios y los correspondientes errores estimados de los mismos; dado que estas estadísticas se refieren a promedios basados en varias repeticiones más que a la probabilidad de error de valores individuales (como los expresados por las desviaciones estándar), pequeños cambios de gravedad podrían resultar significativos, y así podríamos detectar cambios de gravedad anteriores (no relacionados con sismos) debidos a procesos de producción (por ejemplo asociados con ebullición alrededor de algunos de los pozos más antiguos donde la recarga no es total). También se necesita un entresacado cuidadoso de los primeros conjuntos de datos, dado que los mismos fueron inferiores en precisión a los últimos dos conjuntos de datos, pero contienen muchos datos útiles que están generalmente ocultos por imprecisiones. Deben aplicarse criterios de exclusión apropiados a los datos extremos.

Los datos de gravedad deben también integrarse con otros tipos de datos que se han reunido durante el mismo intervalo de tiempo. Sería de particular valor la integración cuantitativa con los datos de nivelación (permitiendo la separación de efectos de elevación y masa utilizando las ecuaciones de Whitcomb de 1976), y con los datos de resistividad eléctrica, poniendo límites sobre los tipos

de cambios posibles (los que deben ser compatibles con ambos conjuntos de datos). Un cuidadoso análisis de la extracción de masa (de los datos de producción) permitiría el modelado de los cambios de gravedad que deberían haber sucedido en ausencia de reinyección y recarga. Esto podría permitir alguna estimación cuantitativa de la cantidad de recarga que está ocurriendo en el campo.

También pensamos que debería continuar la recolección de datos de gravedad en Cerro Prieto, no necesariamente un conjunto completo de datos cada año. Más bien deberían medirse anualmente estaciones seleccionadas (15 a 20 del total, principalmente en la zona de producción, con vinculación al basamento) y un conjunto completo de estaciones de gravedad cada dos años. Cada relevamiento de gravedad debería estar acompañado de una nivelación de segundo orden. Todavía tenemos que coleccionar una secuencia de dos repeticiones de alta precisión entre las cuales no haya ocurrido una actividad sísmica deformante.

Agradecimientos

Este estudio fue financiado por el Departamento de Energía de Estados Unidos a través del Lawrence Berkeley Laboratory. Considerable apoyo logístico fue prestado no sólo por personal de LBL, sino también por varios científicos e ingenieros mexicanos de la Comisión Federal de Electricidad en Cerro Prieto. A todas estas personas, demasiado numerosas para mencionarlas individualmente, les extendemos nuestras sinceras gracias.