PRECISION GRAVITY STUDIES AT CERRO PRIETO - THE SECOND YEAR

R. B. Grannell, * D. W. Tarman,+ R. C. Clover,* R. M. Leggewie,*
P. S. Aronstam,* R. C. Kroll,* and J. Eppink+
*California State University at Long Beach
+ California Polytechnic Institute, Pomona

INTRODUCTION

Precision gravity measurements (accompanied by first- and second-order leveling) were initiated at Cerro Prieto in 1978. At that time, 60 permanent stations were established on concrete pads within a 500-km² area centered in the geothermal field.

The primary purpose of the study is to detect gravity changes that might be manifestations of changing reservoir conditions—notably, net mass depletion, compaction and subsidence, densification by secondary mineral precipitates, and formation of a steam cap because of reduced reservoir pressures. The time scale of these changes would depend on the rate of fluid production, resulting reservoir dynamics, and chemical kinetics. The measure of gravity used to detect these *temporal* changes is the so-called observed gravity value.

A secondary purpose for the precision gravity survey was to prepare a Bouguer anomaly map from the appropriate reduction of the data. Bouguer anomaly values are the measure of *spatial* variations in the gravity field, and can be interpreted in terms of subsurface lateral density variations.

This paper will concentrate on the first purpose of the work, as outlined above, and in particular on interpreting the first annual repetition of the measurements during January through March 1979. A presentation of Bouguer anomaly values and a qualitative interpretation of these values (the second purpose outlined above) was presented in the Proceedings of the First Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California (Chase et al., 1979); nothing new will be added here to that initial work.

The repetitive gravity observations are being accompanied by second-order leveling conducted by the Comisión Federal de Electricidad. This precise leveling, when repeated, allows us to separate gravity changes due to mass effects from those which may be due to elevation changes; i.e. local subsidence due to compaction and regional tectonics. Indeed, for precise results, leveling and gravimetry must proceed together, since the proper interpretation of observed elevation changes depends on the magnitude and nature of any simultaneous gravity change (Whitcomb, 1976).

FIELD PROCEDURES

During the first repetition of gravity measurements in early 1979, we followed esentially the same field procedures as in the initial occupations. A detailed description of those procedures has been published (Chase et al., 1979), and a summary is provided here.

The gravity network consists of 60 stations, 4 located on bedrock (2 in the Sierra Cucapa west of the field, 2 on Cerro Prieto volcano at the northwest corner of the field), and the remainder on valley fill sediments. The bedrock stations are presumed to be stable and unchanging, at least over time intervals of a few years.

Each station was occupied an average of four times, twice each with two La Coste and Romberg G model gravity meters, and each occupation consisted of a minimum of four readings taken by two persons. Possible leveling and orientation errors were distributed by picking up, rotating, and releveling the meters between readings, and the occupations were distributed in time to minimize the effects of instrumental drift, wind and external temperature shifts, and small tares due to transportation over rough roads. We used the looping technique, in which an internal base was occupied, located near the main road to the geothermal field, at the beginning and end of each loop (spanning five hours at most). No station was occupied more than once within an individual loop.

Nearly all of the original 60 stations were reoccupied. Those not occupied had been lost to road construction in the intervening year, and had not yet been replaced in time for the reoccupation effort.

In addition to the station reoccupations, three days were devoted to continuous tidal monitoring at a sheltered location on the side of Cerro Prieto volcano. The out-

put from one of the two gravity meters used in the 1979 effort (G 300) was continuously recorded during that time interval using a strip chart recorder. The second meter (G 423) was operated at night, readings taken manually every 15 minutes. These data were needed to establish values of the tidal constants for later data reduction.

DATA REDUCTION

A tidal analysis was required before we could reduce the data. The tidal data were converted to gravity values using the meter calibration constant for the appropriate gravity interval. These raw gravity values were then plotted and compared with tidal constants calculated for the same time interval (Longman, 1959). Comparison of the calculated versus observed gravity curves confirmed that the use of two tidal constants —a value of 1.16 for the conformance factor, and an assumption of zero phase lag— is appropriate for the Cerro Prieto area and causes maximum errors of only 1 or 2 μ gals.

The station gravity data were reduced to observed gravity values by the following set of steps:

1. The raw meter readings were multiplied by the appropriate calibration factors, converting the readings into mgals and parts of mgals (the values were obtained to thousandths of mgals, i.e. μ gals).

2. Tidal drift was removed from the calibrated values by using Longman's (1959) algorithms and the tidal constants of 1.16 and 0 respectively.

3. The portion of the drift remaining after tidal corrections were perfomed was presumed to be linear and was distributed linearly to all stations in a loop between base station occupations. Although the drift is probably composed of tares of varying amounts, and in reality is at least partially nonlinear, the application of this dedrifting procedure greatly improved the precision of measurement when statistics were performed.

4. Means were obtained for the four values available for each occupation. The station means were then subtracted from the base mean for each loop, producing gravity *differences* between the base and individual stations. Since four occupations were performed at each station, producing four gravity differences, these four differences were then averaged, producing a mean gravity difference value. These means were referenced to the base in the Sierra Cucapa.

The mean value for each station calculated by the above procedure should remain constant from year to year if no geothermal, tectonic, or culturally induced changes occur beneath or adjacent to that station. Alternately, if changes due to either mass or elevation effects occur, the gravity differences calculated in this fashion should change in magnitude with time.

An additional step was taken with the gravity differences calculated above, in that standard deviations were obtained for the four difference values associated with each station. Comparison of the precision from year to year for individual stations allows some determination as to whether or not changes in magnitude of the gravity value are significant.

DATA INTERPRETATION

Although small gravity changes of up to tens of μgals were seen at a few stations, these changes can be explained by lack of accuracy in those data sets. Accuracy in the measurements did improve during the second year. During 1978 half the stations were characterized by standard deviations of 15 μgals or less, whereas in the 1979 data set, this figure was reduced to 10 μgals. In general, then, changes in the gravity differences would have to exceed approximately 20 μgals to be considered significant (more in specific instances) and such changes were not seen. We therefore conclude that no significant changes in gravity occurred during the interval. Leveling values conducted by CFE confirm this result; no significant elevation changes in the second order level lines occurred during this time interval either.

The question arises as to why no changes were detected in spite of our ability to detect changes of 0.02 to 0.03 mgals and changes larger than this have been observed in other producing geothermal fields; e.g., the 0.12 mgal maximum change reported by Isherwood (1977) at The Geysers. Several possibilities can be advanced to explain their absence:

1. Insufficient time may have elapsed to detect a gravity change. Until recently, The Geysers produced approximately eight times the amount of electricity as Cerro Prieto. Even now, electrical output at The Geysers plants is four times greater. Thus the total mass removal at Cerro Prieto may need to be increased (with time) to produce detectable results.

2. Unlike The Geysers, there is adequate recharge to the reservoir, albeit this may be temporary. Truesdell et al. (this volume) report recharge from an overlying aquifer. Also, there is evidence of horizontal inflow of colder waters recharging the producing reservoir.

3. The gravity coverage at Cerro Prieto may not be adequately dense, particularly away from the production area. It may be that the area of aquifer depletion

and compaction is or will occur first at depths of 2 to 3 km and well *outside* the geothermal field, as has been observed at Wairakei, New Zealand (Hatton, 1970).

FURTHER PRECISION CONSIDERATIONS

The improvement in precision from 1978 to 1979 was made possible by (1) avoidance of high ambient temperatures and concentration of the survey into a shorter time interval in the cooler months of 1979; and (2) speedy data reduction by computer during the course of the gravity work so that stations characterized by lesser precision could be identified and reoccupied. Two problems still remain, however: (1) transporting gravity meters over rough roads accounts for tares, sometimes sizeable, which reduce accuracy because of their nonlinear affect on the data; and (2) at some stations located close to producing wells, oscillations of up to 0.05 mgals occur. (A similar problem is encountered at stations on levees when heavy trucks pass by.) To solve the first problem, a spring mounted or air-compression transport box, which dampens out the vibrations in the frequencies generated by automobiles on rough roads, could be utilized. For the second, the only solution appears to be a larger number of repetitions restricted to shorter-time loops (perhaps loops containing only one "noisy" station). Both of these changes are expected to be implemented during the 1980 field season.

ACKNOWLEDGMENTS

This work has been supported by the U. S. Department of Energy, Division of Geothermal Energy, under contract W-7405-ENG-48 to the Lawrence Berkeley Laboratory. Reference to a company or product name does not imply approval or recommendation of the product by the University of California or the U. S. Department of Energy to the exclusion of others that may be suitable.

We would like to acknowledge the assistance of Alfredo Mañon M., Armando de la Peña L., and Rafael Molinar of CFE for their help in establishing and maintaining the gravity monuments. We also acknowledge the support and encouragement of Norman Goldstein of LBL.

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, *in* Proceedings, First Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, Mexico, September 1978: Berkeley, Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-7098, p. 249-257.

Hatton, J. W., 1970, Ground subsidence of a geothermal field during exploitation, *in* Proceedings, United Nations Symposium on the Development and Utilization of Geothermal Resources, Pisa, Italy: Geothermics, Special Issue 2, v. 2, p. 1294-1296.

Isherwood, W. F., 1977, Geothermal reservoir interpretation of change in gravity, *in* Proceedings of the Third Workshop, Geothermal Reservoir Engineering: Stanford University, p. 18-23.

Longman, I. M., 1959, Formulas for computing the tidal accelerations due to the moon and the sun: Journal of Geophysical Research, v. 64, p. 2351-2355.

Truesdell, A. H., Mañon M. A., Jiménez S. M. E., Sánchez A. A., and Fausto L. J. J., 1979, Geochemical evidence of drawdown in the Cerro Prieto geothermal field, *in* Proceedings, First Symposium on the Cerro Prieto.
Geothermal Field, Baja California, Mexico, September 1978: Berkeley, Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-7098, p. 130-135.

Whitcomb, J. H., 1976, New vertical geodesy: Journal of Geophysical Research, v. 81, no. 26, p. 4937-4944.

GRAVIMETRIA DE PRECISION EN EL AREA GEOTERMICA DE CERRO PRIETO

INTRODUCCION

En 1978 se iniciaron en Cerro Prieto mediciones de gravedad de precisión (acompañadas por nivelaciones de primero y segundo orden). En ese momento se establecieron 60 estaciones permanentes sobre plataformas de concreto dentro de un área de 500 km² centrada en el campo geotérmico.

El propósito principal de este estudio es detectar cambios de gravedad que podrían constituir manifestaciones de variaciones en las condiciones del yacimiento, especialmente disminución de la masa neta, compactación y asentamiento del terreno, densificación por precipitación de minerales secundarios y formación de una región de vapor debida a reducciones en las presiones del yacimiento. La escala de tiempo de estos cambios dependería de la tasa de producción de fluido y de la dinámica del yacimiento y cinética química resultantes. La medida de gravedad que se usó para detectar estos cambios temporales fue el valor observado de gravedad.

Un propósito secundario de este estudio de gravedad de precisión fue preparar un mapa de anomalía de Bouguer a partir de una apropiada reducción de los datos. Los valores de la anomalía de Bouguer miden las variaciones *espaciales* del campo gravitatorio y pueden interpretarse en términos de variaciones laterales de densidad en la profundidad.

La presentación se concentrará en el primer propósito de este trabajo, tal como se describió con anterioridad y en particular, en la interpretación de la primera repetición anual de mediciones de enero a marzo de 1979. En las Actas del Primer Simposio sobre el Campo Geotérmico de Cerro Prieto, Baja California (Chase *et al.*, 1979), se hizo una presentación de los valores de la anomaía de Bouguer y una interpretación cualitativa de los mismos (el segundo propósito); nada nuevo se agregará aquí a dicho trabajo inicial.

Las observaciones repetidas de gravedad se acompañan de nivelaciones de segundo orden realizadas por la Comisión Federal de Electricidad. La repetición de este nivelamiento preciso permite separar cambios de gravedad debidos a efectos de masa de aquellos que quizás se deban a cambios de altura; por ejemplo, asentamiento del terreno local debido a compactación y tectónica regional. Ciertamente, para obtener resultados precisos, los trabajos de nivelación y gravimetría deben efectuarse simultáneamente, porque la interpretación correcta de los cambios de elevación observados depende de la magnitud y naturaleza de los cambios simultáneos de gravedad (Whitcomb, 1976).

PROCEDIMIENTOS DE CAMPO

Durante la primera repetición de mediciones de gravedad, a comienzos de 1979, se siguieron esencialmente los mismos procedimientos de campo que en las tareas iniciales. Se publicó una detallada descripción de aquellos procedimientos (Chase *et al.*, 1979) y aquí se presenta un resumen.

Sesenta estaciones forman la red de gravedad: 4 localizadas sobre suelo rocoso (2 en la Sierra de Cucapás al O del campo, 2 sobre el volcán de Cerro Prieto, en el rincón NO del campo) y las restantes sobre los sedimentos que rodean el valle. Se presume que las estaciones establecidas sobre suelo rocoso son estables y no cambiantes, al menos sobre intervalos de tiempo de unos pocos años.

Cada estación se ocupó cuatro veces en promedio, dos veces cada una con 2 gravímetros La Coste y Romberg modelo G, y en cada ocupación se hicieron un mínimo de cuatro lecturas hechas por dos personas. Los posibles errores de nivelamiento y orientación se distribuyeron al levantar, rotar y renivelar los gravímetros entre lecturas; las ocupaciones se distribuyeron también en el tiempo para minimizar los efectos de deriva del instrumental, cambios de viento y cambios de temperatura externa, y pequeñas taras debidas al transporte por caminos disparejos. Se usó la técnica de circuitos y se ocupó una base interna cercana a la ruta principal del campo geotérmico, al comienzo y al final de cada circuito (con una duración de 5 horas como máximo). Ninguna estación se ocupó más de una vez dentro de cada circuito individual.

Casi todas las 60 estaciones originales se reocuparon. Las que no lo fueron se perdieron debido a construcción de caminos durante el año y no fueron remplazadas a tiempo para lograr recuperarlas.

Además de la reocupación de estaciones, se dedicaron tres días al continuo monitoreo de mareas, en una ubicación protegida al costado del volcán de Cerro Prieto. La salida de uno de los dos gravímetros usado en el esfuerzo de 1979 (G 300) se registró en forma continua durante dicho intervalo de tiempo con un registrador de cinta de papel. El segundo gravímetro (G 423) se operó de noche al tomarse lecturas manuales cada 15 minutos. Estos datos fueron necesarios para establecer los valores de las constantes de mareas para la posterior reducción de datos.

REDUCCION DE DATOS

Se requirió un análisis de mareas antes de que pudieran reducirse los datos. Los datos de marea se convirtieron a valores de gravedad al usar la constante de calibración del gravímetro para los intervalos apropiados de gravedad. Estos primeros valores de gravedad se graficaron y compararon con las constantes de marea calculadas para el mismo intervalo de tiempo (Longman, 1959). La comparación de las curvas de gravedad observadas *versus* las calculadas confirmaron que el uso de dos constantes de marea —un valor de 1.16 para el factor conformante y retardo hipotético nulo— resultó apropiada para el área de Cerro Prieto y ocasionó errores máximos de sólo uno o dos μgals.

Los datos de gravedad de estación se redujeron a

valores de gravedad observados mediante el procedimiento siguiente:

1. Las lecturas de gravímetro se multiplicaron por los factores de calibración apropiados y convirtieron las lecturas en mgals, y fracciones de mgals (los valores se obtuvieron a milésimos de mgals, μgals).

2. Se eliminó la deriva mareológica de los valores calibrados al utilizar los algoritmos de Longman (1959) y las constantes de marea de 1.16 y 0 respectivamente.

3. La porción de la deriva remanente, después de efectuarse las correciones de marea, se presumió lineal y se distribuyó linealmente a todas las estaciones del circuito. Aunque la deriva probablemente se componga de taras de diversas magnitudes y sea en realidad, al menos parcialmente, no lineal, la aplicación de este procedimiento de corrección aumentó considerablemente la precisión de las mediciones cuando se efectuaron estadísticas.

4. Se computaron los promedios de los cuatro valores disponibles para cada ocupación. Las medias de estación se restaron de la media de la base para cada circuito, se obtuvieron *diferencias* de gravedad entre las estaciones base e individual. Dado que se efectuaron cuatro ocupaciones en cada estación, se produjeron cuatro diferencias de gravedad, se promediaron luego estas cuatro diferencias y resultó un valor medio de diferencia de gravedad. Estas medias se refirieron a la base en la Sierra de Cucapás.

El valor medio calculado para cada estación, mediante el procedimiento arriba mencionado, debería permanecer constante de un año a otro si no ocurrieran cambios geotérmicos, tectónicos o cambios inducidos culturalmente debajo o en las inmediaciones de esa estación. Alternativamente, si ocurrieran cambios debidos a efectos de masa o de elevación, las diferencias de gravedad calculadas de esta forma deberían variar en función del tiempo.

Adicionalmente, se calcularon las desviaciones estándar de los cuatro valores de las diferencias asociadas con cada estación. La comparación año a año de la precisión correspondiente a estaciones individuales permite determinar, aproximadamente si los cambios de magnitud del valor de gravedad son significativos.

INTERPRETACION DE LOS DATOS

Aunque en unas pocas estaciones se observaron pequeños cambios de gravedad de hasta 10 μgals, dichos cambios pueden explicarse por falta de precisión en aquellos conjuntos de datos. Durante el segundo año se mejoró la precisión de las mediciones. Durante 1978, la mitad de las estaciones se caracterizaron por desviaciones estándar de 15 μgals o menos, mientras que en el conjunto de datos de 1979 este número se redujo a 10 μgals. En general, los cambios en las diferencias de gravedad deberían exceder los 20 μgals aproximadamente, para considerarse significativos (más en situaciones específicas), y dichos cambios no se observaron. Por consiguiente se concluye que no hubieron cambios significativos de gravedad durante el intervalo que se estudió. Los valores de nivelación que obtuvo la CFE confirman este resultado; tampoco se produjeron cambios significativos de elevación en las líneas de nivel de segundo orden durante este intervalo de tiempo.

De inmediato surge la pregunta: ¿por qué no se registraron cambios, a pesar de la habilidad para detectar cambios de 0.02 a 0.03 mgals? Aunque se observaron cambios mayores en otros campos geotérmicos en producción; por ejemplo, el cambio máximo de 0.12 mgals del que informó Isherwood (1977), en The Geysers. Para explicar dicha ausencia pueden adelantarse algunas posibilidades.

1. El tiempo transcurrido puede resultar insuficiente para detectar un cambio de gravedad. Hasta hace poco The Geysers producían aproximadamente ocho veces la cantidad de electricidad que se generaba en Cerro Prieto. Aún ahora la producción de electricidad de la planta The Geysers es cuatro veces mayor. Por tanto, es posible que sea necesario aumentar en el tiempo la masa total removida en Cerro Prieto para que se produzcan resultados detectables.

2. A diferencia de The Geysers existe una adecuada recarga del yacimiento, aunque esto puede resultar temporal. Truesdell *et al.* (estas Actas) informaron recarga proveniente de un yacimiento más superficial. También hay evidencia de penetración horizontal de aguas más frías que recargan el yacimiento en producción.

3. La cubertura gravitatoria en Cerro Prieto puede no ser lo suficientemente densa, particularmente afuera de la zona de producción. Como se ha observado en Wairakei, Nueva Zelandia (Hatton, 1970), puede ocurrir que la zona de asentamiento y compactación del yacimiento tenga o pueda darse con anterioridad, a profundidades de 2 a 3 km y bien *afuera* del campo geotérmico.

CONSIDERACIONES ADICIONALES SOBRE PRECISION

El aumento en precisión de 1978 a 1979 se hizo posible debido a: 1) que se evitaron las altas temperaturas ambiente y se concentró la investigación en un intervalo de tiempo más corto, en los meses más fríos de 1979, y 2) que los datos se redujeron rápidamente por computadora durante el transcurso del trabajo de gravedad,

de tal modo que las estaciones caracterizadas por menor precisión pudieran identificarse y reocuparse. Sin embargo, subsistieron dos problemas: 1) el transporte de gravímetros por malos caminos produce taras, algunas veces importantes, lo que reduce la precisión por su efecto no lineal en los datos, y 2) en algunas estaciones situadas en las proximidades de pozos en producción ocurren oscilaciones de hasta 0.05 mgals. (Un problema similar se presenta en estaciones ubicadas sobre terraplenes cuando pasan camiones pesados.) Para solucionar el primer problema podría utilizarse una caja de transporte montada sobre resortes o aire comprimido que amortigüe las vibraciones en las frecuencias producidas por automóviles sobre caminos malos. Para el segundo, la única solución parece ser un mayor número de repeticiones restringidas a circuitos de tiempo más corto (quizás circuitos que contengan sólo una estación "ruidosa"). Se espera implantar ambos cambios durante la estación de campo de 1980.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó con el apoyo del Departamento de Energía de Estado Unidos, División de Energía Geotérmica, bajo contrato W-7405-ENG-48 al Lawrence Berkeley Laboratory. La referencia a una compañía o nombre de un producto no implica aprobación o recomendación del mismo por la Universidad de California o el Departamento de Energía de Estados Unidos en detrimento de otros u otras compañías o productos.

Se agradece la asistencia de Alfredo Mañón M., Armando de la Peña L. y Rafael Molinar de la CFE quienes ayudaron a establecer y mantener las mojoneras de gravedad. También el apoyo y aliento de Norman Goldstein del LBL.