

CAMBIOS DE GRAVEDAD INDUCIDOS EN EL CAMPO GEOTÉRMICO DE CERRO PRIETO ENTRE 1978 Y 1997

Jorge Ramírez-Hernández^{1,2} y Juan M. Cobo-Rivera¹

¹ Instituto de Ingeniería, UABC

² Estancia sabática en el Depto. de Geofísica Aplicada, CICESE

RESUMEN

Se comparan los cambios en la gravedad observada (corregida por subsidencia) ocurridos entre 1978 y 1997 en el Campo Geotérmico Cerro Prieto (CGCP), relacionados con la deficiencia de masa del yacimiento después de 25 años de explotación y una extracción que asciende a 1,800 millones de toneladas métricas de fluido. Se observa una deficiencia de masa generalizada en todo el CGCP formado por tres subzonas. Una de ellas, acotada en su margen oeste por la falla Cerro Prieto, está relacionada con el estrato productor alfa ($>600 \pm 200 \mu\text{Gal}$); otra se asocia al estrato productor beta en el bloque levantado de la falla H ($>700 \pm 200 \mu\text{Gal}$) cuyo límite al E se correlaciona con la zona de recarga de este estrato y en la tercera zona, se localiza el mismo estrato productor beta, pero en el flanco SE de la falla, donde se observan diferencias mayores a los $1000 \pm 200 \mu\text{Gal}$. Se identifica una zona con incrementos de gravedad asociada a la zona de recarga del estrato alfa a través de la falla L y posiblemente con la inyección de salmuera residual en CPI.

INTRODUCCIÓN

Las mediciones gravimétricas de precisión repetitivas han demostrado ser de utilidad para evaluar cambios temporales de gravedad de hasta $5\text{-}10 \mu\text{Gal}$ ($1 \mu\text{Gal} = 0.01 \mu\text{N/kg}$). Su aplicación en los últimos años ha permitido identificar cambios de masa producidos por la explotación-recarga-inyección en diversos campos geotérmicos (Allis y Hunt, 1986; Ehara, *et al.*, 1998; Sugihara y Ishido, 1998). La principal ventaja de utilizar datos de gravedad para evaluar cambios hidrológicos en los sistemas geotérmicos, es que éstos reflejan cambios del sistema geotérmico en su conjunto y que no están influenciados por condiciones locales, tal como sucede con las mediciones de temperatura y presión dentro del pozo, que son útiles para evaluar cambios en el yacimiento. (Allis y Hunt, 1986).

El Campo Geotérmico Cerro Prieto (CGCP), uno de los más grandes del mundo, está ubicado en el Valle de Mexicali, Baja California, en la porción meridional de la Depresión Salton (Figura 1). El yacimiento se encuentra entre 1200 y 2300 m de profundidad, es del tipo agua saturado ($T > 150^\circ\text{C}$) y está contenido en estratos de areniscas y arcillas del Cenozoico del paso delta del Río Colorado. La Depresión Salton contiene varios centros de dispersión activos que se asocian a un adelgazamiento de la corteza que está controlado por un régimen transtensivo del sistema transforme San Andrés - Golfo de California. (Biehler *et al.*, 1964), Las fallas de desplazamiento lateral derecho que controlan el centro de dispersión en Cerro Prieto son la Falla Imperial al oriente y la Falla Cerro Prieto (Lomnitz *et al.*, 1970; Elders *et al.*, 1972). En este centro de dispersión se localiza la fuente de calor del yacimiento (Elders *et al.*, 1984). Transversal al sistema de fallas transformes se ha identificado un sistema de fallas normales conocido como Volcano entre las que destacan las fallas normales L y H (Figura 1).

El CGCP inició su explotación económica en 1973, con una capacidad de 75 MW en la central Cerro Prieto Uno (CPI), que fue ampliada a 150 MW en 1979, con una extracción de fluido geotérmico de 22.4 a 38.1 millones de toneladas anuales. Para 1981 la capacidad instalada aumentó a 180 MW. En enero de 1986 las centrales Cerro Prieto Dos y Tres (CPII y CPIII) iniciaron la generación de energía eléctrica con 110 MW cada una. Más tarde, la CPII en septiembre de 1986 y la CPIII en junio de 1987, ampliaron su capacidad hasta 620 MW, que es la que se mantiene hasta ahora. Se ha iniciado la construcción de CPIV al NE de CPIII, con 4 plantas de 25 MW adicionales que entrarán en operación en el año 2000 (Oropeza y Wong, 1998). La generación de esta energía ha requerido la extracción de 1800 millones de toneladas de fluido entre 1973 y 1997, con sólo cerca de 140 millones de toneladas inyectadas de nuevo al reservorio a partir de 1989 (Truesdell *et al.*, 1998). La zona que corresponde a la CPI explota principalmente el estrato productor más somero (alfa), abarcando desde la vía del ferrocarril hasta la Falla Cerro Prieto, mientras que las zonas que corresponden a CPII y CPIII explotan principalmente el estrato productor beta, desde la vía del ferrocarril hasta el borde oriental del CGCP (Figura 1).

EVOLUCIÓN DEL RESERVORIO BAJO EXPLOTACIÓN

El modelo hidrogeológico del yacimiento geotérmico fue descrito por Halfman *et al.* (1984, 1986) quienes identifican tres estratos productores que, del más somero al más profundo, se denominan alfa, beta y gamma. De acuerdo con estos autores, antes de la explotación el yacimiento se alimentaba de fluidos que ascendían desde los estratos más profundos hacia los estratos superiores, a través de las fallas L y H, hasta alcanzar eventualmente la superficie o mezclarse con aguas

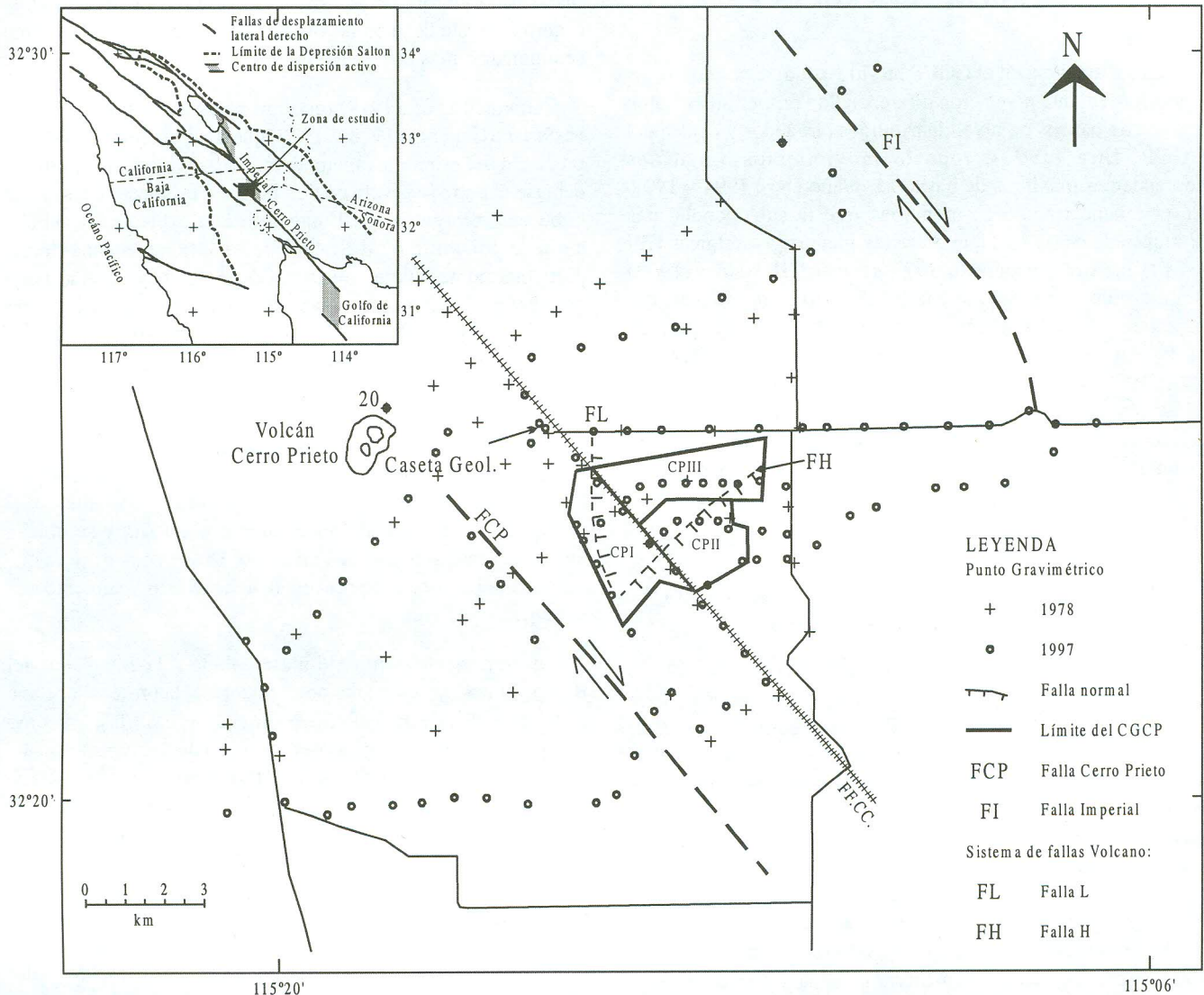


Figura 1. Localización de la zona de estudio. En el recuadro se muestra el marco tectónico de referencia, donde las zonas sombreadas corresponden a los centros de dispersión activos dentro de la depresión (modificada de Vázquez, 1998). En la figura se indica con cruces la posición de las estaciones gravimétricas de 1978 y con círculos la del estudio de 1997. La línea continua indica la extensión del CGCP dividido administrativamente en CPI, CPII y CPIII. Las fallas normales FL FH no tienen expresión superficial se identifican a partir de perforaciones (Halfman et al., 1987).

someras. Una vez iniciada la explotación el flujo se invierte y se inicia la recarga desde los estratos superiores, a través de esas mismas fallas hacia el yacimiento (Lippmann, 1991).

Truesdell *et al.* (1978), con base en los primeros estudios isotópicos del fluido geotérmico en CPI y estudios anteriores del agua del acuífero del Valle de Mexicali, sugieren que desde las primeras etapas de explotación del estrato productor alfa hubo recarga desde el borde occidental. Más tarde, Stallard *et al.* (1987), a partir del análisis de la evolución del oxígeno-18 y deuterio presente en el fluido geotérmico, entre 1977 a 1987, encontraron que existen zonas de recarga asociadas a la falla L desde estratos superiores.

Con base en evidencias geoquímicas, Truesdell *et al.* (1995), postulan que el flujo en el estrato productor beta está controlado por la falla H y que la respuesta del yacimiento es distinta en ambos flancos de la falla. En el bloque levantado, al NW de la falla, el estrato productor beta contenía fluido cercano al punto de ebullición antes de su explotación. Al iniciarse la extracción de fluido, se produjo una zona amplia de vapor debido al abatimiento de la presión y a la escasa recarga desde el SE. Por su parte, en el bloque caído al SE de la falla, el estrato beta antes de la explotación contenía fluido por debajo del punto de ebullición que, al iniciarse la explotación recibió agua fría de recarga desde el sur, lo que le permitió mantener la presión por arriba de 50 bars con respecto a la del estrato en el bloque levantado (Truesdell *et al.*, 1997).

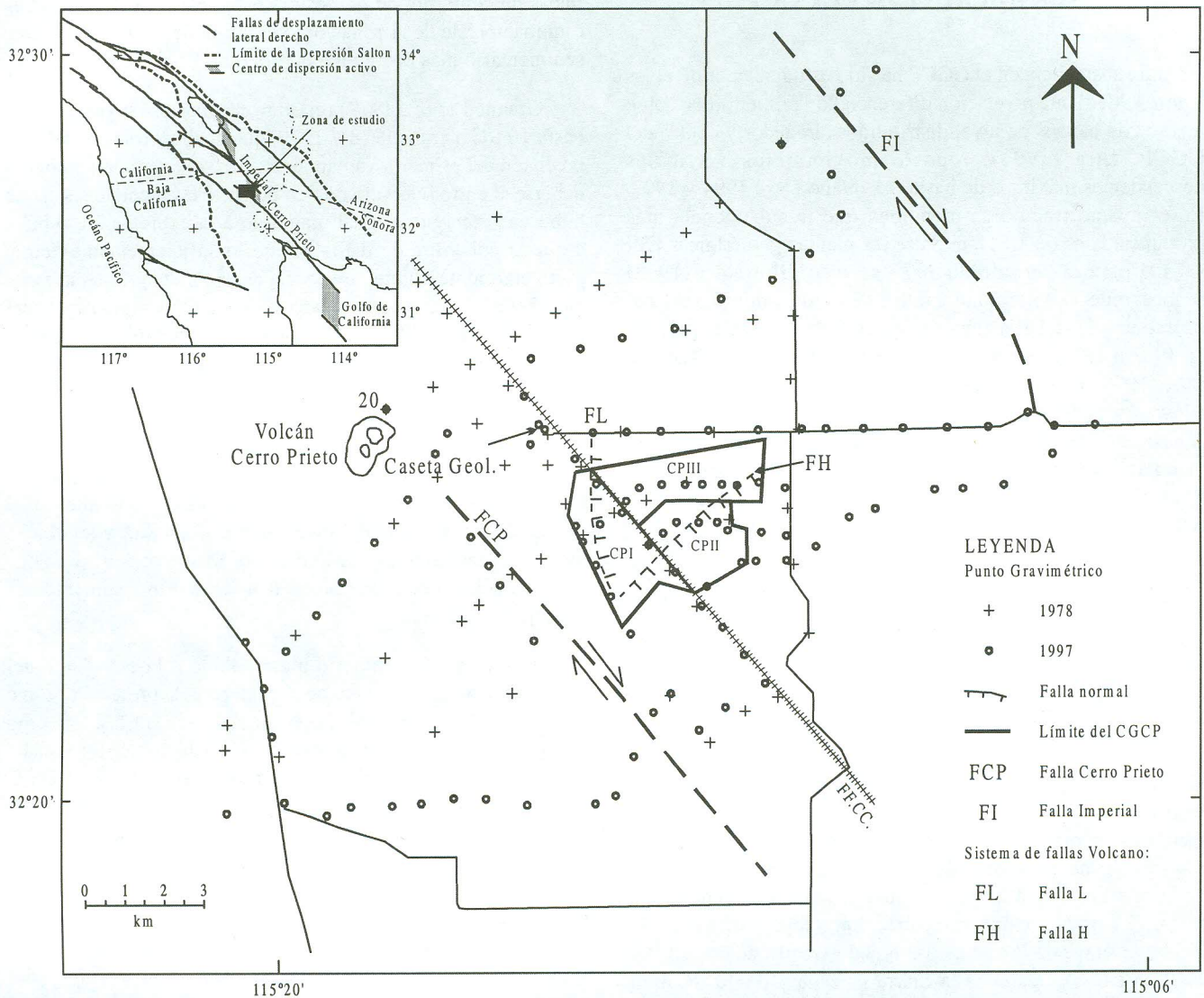


Figura 1. Localización de la zona de estudio. En el recuadro se muestra el marco tectónico de referencia, donde las zonas sombreadas corresponden a los centros de dispersión activos dentro de la depresión (modificada de Vázquez, 1998). En la figura se indica con cruces la posición de las estaciones gravimétricas de 1978 y con círculos la del estudio de 1997. La línea continua indica la extensión del CGCP dividido administrativamente en CPI, CPII y CPIII. Las fallas normales FL FH no tienen expresión superficial se identifican a partir de perforaciones (Halfman et al., 1987).

someras. Una vez iniciada la explotación el flujo se invierte y se inicia la recarga desde los estratos superiores, a través de esas mismas fallas hacia el yacimiento (Lippmann, 1991).

Truesdell *et al.* (1978), con base en los primeros estudios isotópicos del fluido geotérmico en CPI y estudios anteriores del agua del acuífero del Valle de Mexicali, sugieren que desde las primeras etapas de explotación del estrato productor alfa hubo recarga desde el borde occidental. Más tarde, Stallard *et al.* (1987), a partir del análisis de la evolución del oxígeno-18 y deuterio presente en el fluido geotérmico, entre 1977 a 1987, encontraron que existen zonas de recarga asociadas a la falla L desde estratos superiores.

Con base en evidencias geoquímicas, Truesdell *et al.* (1995), postulan que el flujo en el estrato productor beta está controlado por la falla H y que la respuesta del yacimiento es distinta en ambos flancos de la falla. En el bloque levantado, al NW de la falla, el estrato productor beta contenía fluido cercano al punto de ebullición antes de su explotación. Al iniciarse la extracción de fluido, se produjo una zona amplia de vapor debido al abatimiento de la presión y a la escasa recarga desde el SE. Por su parte, en el bloque caído al SE de la falla, el estrato beta antes de la explotación contenía fluido por debajo del punto de ebullición que, al iniciarse la explotación recibió agua fría de recarga desde el sur, lo que le permitió mantener la presión por arriba de 50 bars con respecto a la del estrato en el bloque levantado (Truesdell *et al.*, 1997).

SUBSIDENCIA EN EL CGCP

La subsidencia en el CGCP ha sido estudiada por diversos autores. Mediante nivelación diferencial de primer orden sobre una red de bancos de nivel distribuidos alrededor y dentro del CGCP, Lira (1998), reportó movimientos verticales descendentes máximos de hasta 0.1 m/año entre 1994 y 1997. En el mismo trabajo se menciona que la subsidencia más pronunciada es de 1.861 m entre las plantas geotérmicas CPI y CPII para el período de 1977 a 1997. Glowacka (1998) reportó que la velocidad media del movimiento vertical superficial de la Falla Imperial es de 0.95 m para el período de 1987 a 1997. Este valor es muy parecido al reportado por Lira (1998) como la velocidad de subsidencia del CGCP. Glowacka (1998) interpretó que los cambios de subsidencia dentro del CGCP podrían estar asociados al aumento en la explotación y que los sismos de Valle Imperial de 1979, Victoria de 1980, Cerro Prieto y Superstition Hills de 1987, entre otros, han sido disparadores de estos cambios.

ESTUDIOS GRAVIMÉTRICOS DE PRECISIÓN PREVIOS

Chase *et al.* (1978) iniciaron en 1978 el primer estudio de gravimetría de precisión en el CGCP, que repitieron Grannell *et al.* (1979, 1981a, 1981b, 1982) en 1979, 1979-80 y 1980-81, con el objeto de detectar variaciones gravimétricas temporales y espaciales asociadas con cambios en el yacimiento geotérmico por la extracción de fluido. Para obtener los valores de anomalía de Bouguer simple, se aplicaron correcciones de Aire Libre y Latitud, asignando una densidad de 2.67 g/cm³. No se hicieron correcciones topográficas debido al relieve suave de la zona, atribuyendo errores de hasta 1500 μ Gal en sitios cercanos a la Sierra Cucapá y de 20 μ Gal en estaciones situadas sobre los albardones de los canales de irrigación (Chase *et al.*, 1978). La supresión de la deriva mareológica se hizo de forma teórica, considerando el modelo propuesto por Longman (1959). Los valores de gravedad reportados están referidos a una base sobre roca firme en la Sierra Cucapá, (Estación 1, en la Figura 1 de Chase *et al.*, 1978).

Chase *et al.* (1978) confirmaron las interpretaciones de Velasco y Martínez (1963) y Fonseca y Razo (1979), al mostrar que el CGCP está ubicado cerca de la terminación sureste de un importante máximo local gravimétrico y que zonas de intenso gradiente al norte, sureste y suroeste de esta anomalía indican áreas de potente relleno deltáico y aluvial controladas posiblemente por fallas. Chase *et al.* (1978) notaron además que el sistema Volcano y el Volcán Cerro Prieto carecen de una expresión gravimétrica y que la abrupta terminación del máximo al sur del campo geotérmico, entre la planta CPI y el poblado Delta, es indicativa de una falla con orientación NE del sistema Volcano (Falla Pátzcuaro, no indicada en los mapas). Además, interpretaron el cambio de dirección de las

líneas de contorno, de noroeste a este-oeste, localizadas en la esquina noreste de la zona como el límite de un área de relleno sedimentario más profundo (Figura 3 de Chase *et al.*, 1978).

Grannell *et al.* (1979) reportaron cambios de gravedad de hasta 10 μ Gal entre 1978 y 1979, que atribuyeron a la falta de precisión del primer levantamiento, pero que también pudieron deberse al corto intervalo de tiempo entre las mediciones, a que hubo una recarga de igual magnitud a la explotación, o bien, a que la cobertura de datos no fue lo suficientemente densa, particularmente afuera de la zona de producción. Los mismos autores, en la tercera campaña de mediciones gravimétricas (1979-1980 y 1980-1981) alcanzaron un notable incremento en la precisión de los datos, con respecto a las campañas anteriores (± 10 μ Gal). Identificaron cambios gravimétricos significativos en sentido positivo (mayores a 20 μ Gal) con respecto a la campaña de 1979 asociados con la Falla Hidalgo (Figura 1 de Grannell *et al.*, 1981a). En el flanco oriental de la falla se observan los cambios en gravedad más intensos y por el flanco occidental son de menor magnitud y se ubican en la parte más antigua del CGCP, por lo que consideraron que la causa del aumento de gravedad se debe principalmente a la extracción de fluido.

El importante déficit de masa debido a la extracción del fluido, aunado al fenómeno de subsidencia, la presencia de una zona generalizada de vapor, la recarga de aguas frías, así como la inyección de fluido geotérmico desde la superficie, ha producido variaciones gravimétricas temporales y espaciales. El propósito de este trabajo es estimar la variación temporal y espacial de los valores de gravedad durante un período de 19 años comprendido entre 1979 y 1997 y analizar dichas variaciones en términos de subsidencia y procesos de remoción o aumento de masa en el yacimiento. La identificación de la ubicación espacial y temporal de los principales cambios gravimétricos permitirá inferir cambios en la dinámica del yacimiento producidos por la explotación y por la actividad tectónica regional.

MEDICIONES GRAVIMÉTRICAS DE 1997

Se realizaron mediciones de la aceleración de la gravedad en los 112 bancos de nivel de la red de nivelación de primer orden de la CFE y del CICESE que se muestran en la Figura 2 (González, 1994) con un gravímetro Scintrex modelo CG-3. La metodología de campo se realizó mediante circuitos, volviendo a la estación base intermedia en intervalos de tiempo menores a 3 horas, período de tiempo en que la deriva del instrumento se consideró lineal.

La nivelación diferencial de primer orden de los bancos de nivel se llevó a cabo durante febrero de 1997 y la campaña de mediciones gravimétricas de precisión en junio, julio, agosto, septiembre y octubre, durante jornadas nocturnas para evitar en lo posible el ruido ambiental y las variaciones bruscas de temperatura. Para poder comparar los resultados la

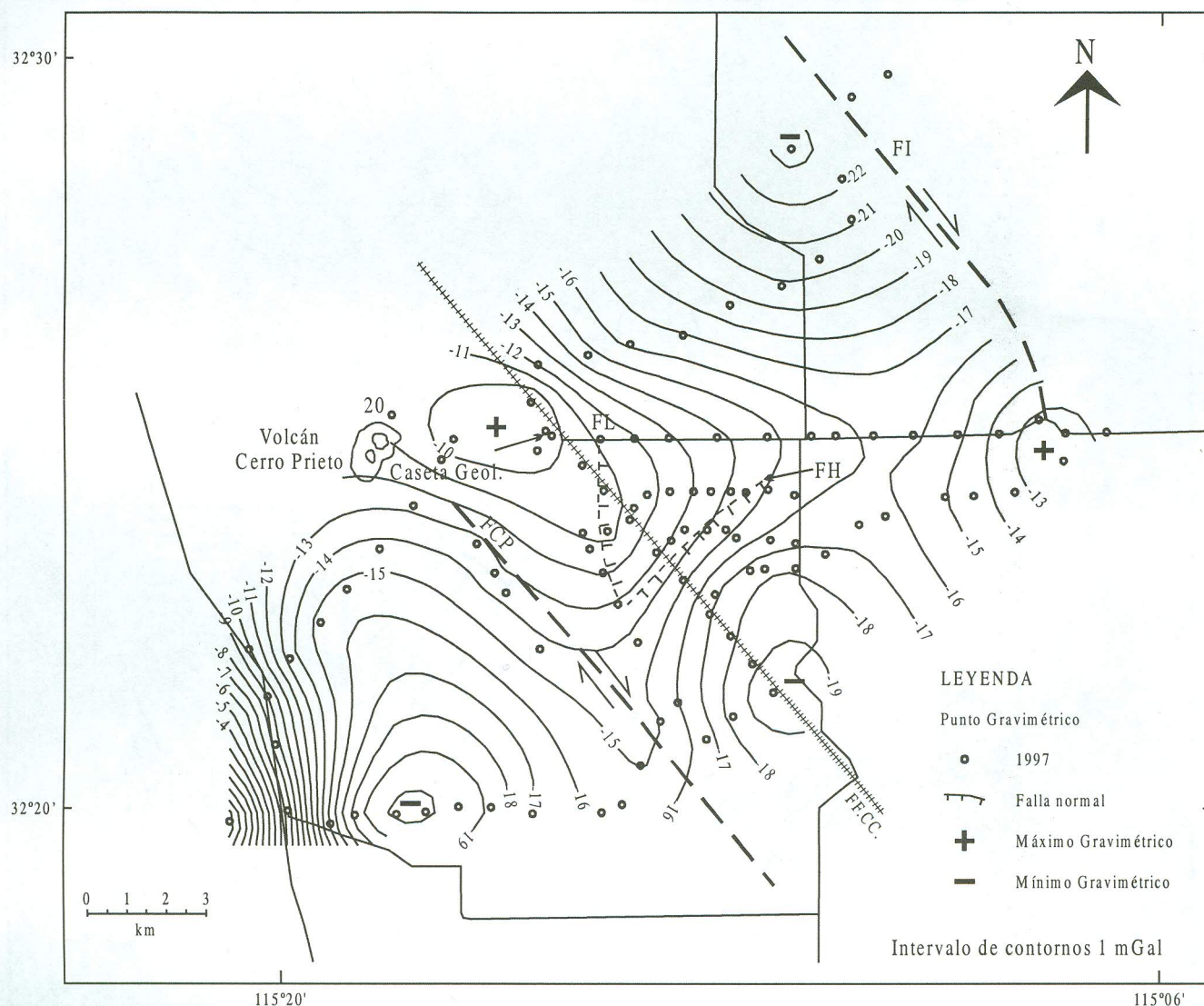


Figura 2. Configuración de la anomalía de Bouguer simple para 1997. Los valores son relativos a la estación No. 20 del estudio de 1978. El intervalo entre isolíneas es de 1 mGal.

reducción de datos hasta la anomalía de Bouguer simple se realizó siguiendo la metodología de Chase *et al.* (1978). Para la corrección por marea se utilizó el modelo propuesto por Longman (1959) y las constantes de Chase *et al.* (1978). Se consideró una densidad de 2.67 g/cm^3 para la corrección de Bouguer y la fórmula de gravedad teórica del elipsoide internacional de 1931 (Nettleton, 1979). Ambos estudios se ligaron haciendo relativas las mediciones a la estación No. 20 ubicada en la falda del Volcán Cerro Prieto, cuya posición sobre roca volcánica supone que ha sufrido menor subsidencia que las estaciones ubicadas sobre el relleno sedimentario del Valle de Mexicali.

ANÁLISIS DEL ERROR EN LA ESTIMACIÓN DE Δg_B

El número de mediciones tomadas en cada estación fue determinado por la ocurrencia e intensidad de vibraciones del terreno durante las mediciones que, en orden de mayor a menor intensidad, son producidas por la extracción de fluido geotérmico y el tráfico de vehículos y en menor medida, por la actividad sísmica. En sitios fuera del CGCP, con bajos niveles de vibraciones, se realizaron un mínimo de 93 mediciones; el promedio de mediciones en todos los sitios fue de 340 con un máximo de 1050 en aquellos con problemas de ruido ambiental. El criterio para suspender las mediciones en cada estación fue alcanzar un error estándar de la media (desviación estándar del muestreo entre la raíz cuadrada del número de muestras) cercano al predefinido de $5 \mu\text{Gal}$. El error

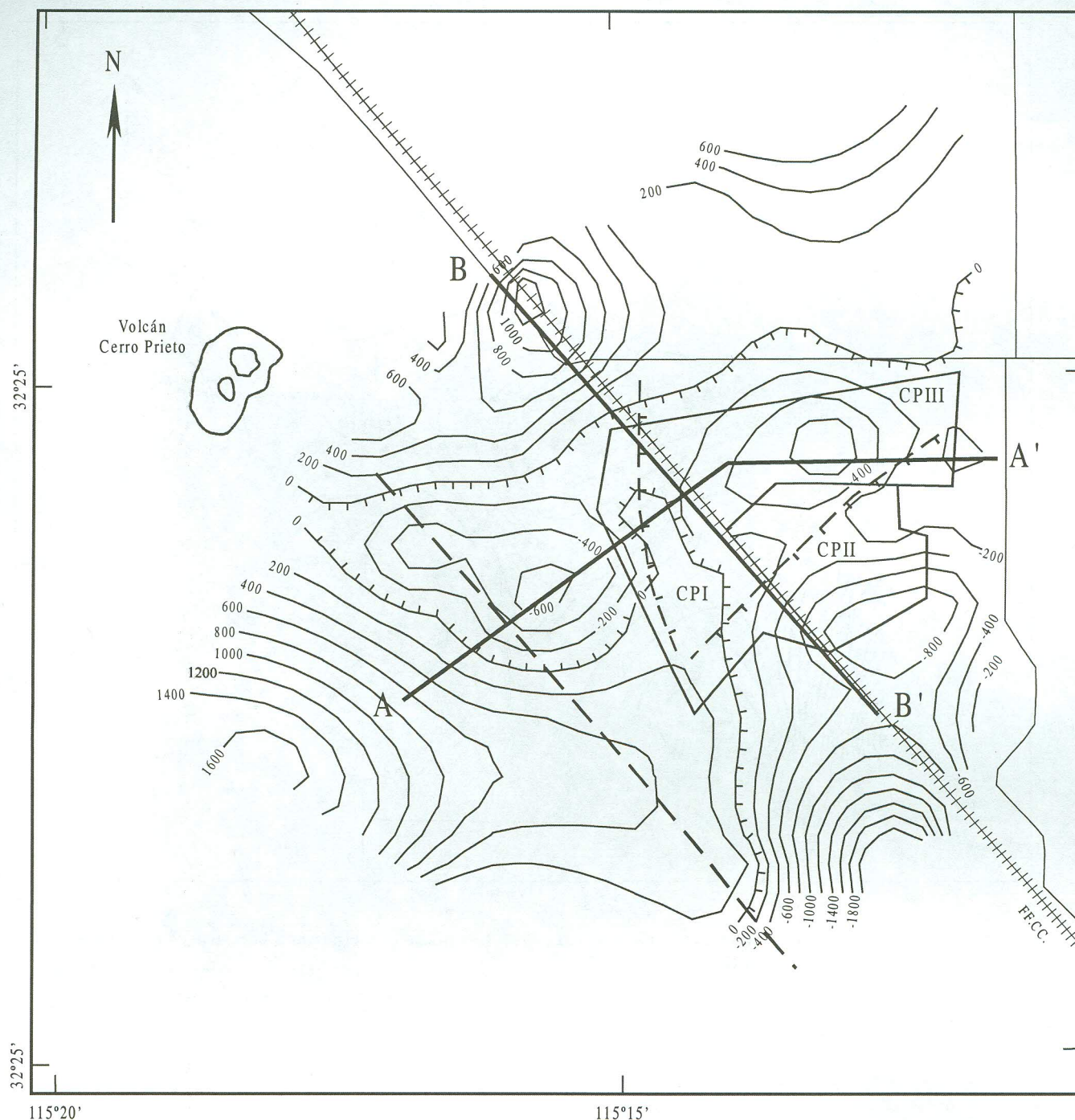


Figura 3. Diferencias en gravedad observada corregida para el período 1978-1997. El signo negativo implica disminución de la densidad. El intervalo de contornos es de 200 μGal . La posición de la Falla Cerro Prieto fue tomada de Fonseca (1982) mientras que las posiciones de las fallas L y H a las del techo del estrato productor beta, según Truesdell *et al.* (1995). Se indica la ubicación de los perfiles A-A' y B-B' de la Figura 4.

estándar de la media promedio para todo el levantamiento fue de 9 μGal , con un valor máximo de 39 y un mínimo de 5 μGal .

Únicamente se utilizaron estaciones indicadas con mojoneras o chapas de bronce en estructuras de canales perfectamente identificables, con posterioridad a la nivelación de 1er y 2o. orden, que implica errores de 3-5 mm y de 6-8

mm por kilómetro de longitud de cierre del transecto, respectivamente (Kissam, 1981). Considerando el error mayor de 8 mm por kilómetro y una longitud de cierre máxima de 25 km, se obtienen errores máximos de 0.04 m que corresponden por efecto de aire libre a 12.3 μGal y a errores en la estimación de la corrección de Bouguer a 4.5 μGal ,

considerando una densidad de 2.67 g/cm^3 . El error total por imprecisiones en la determinación de las alturas es de $16.8 \text{ } \mu\text{Gal}$.

El error en la ubicación de las estaciones tiene muy poca influencia en la determinación de la anomalía de Bouguer, siendo despreciable en un levantamiento topográfico de 1er. o 2o. orden pues se obtienen errores máximos del orden de 0.005 m . A la latitud del CGCP los errores de 1 m en dirección N-S (latitud) conllevan diferencias de 0.0005 segundos que implican diferencias de $0.7 \text{ } \mu\text{Gal}$ con respecto a la fórmula de gravedad teórica del elipsoide internacional de 1931 (Nettleton, 1979).

La comparación entre estudios se llevó a cabo sin considerar la corrección por efectos topográficos (anomalía de Bouguer simple), dado el escaso relieve topográfico en la zona de interés. En las estaciones ubicadas sobre los bordes de canal, con desniveles de 2 a 2.5 m cercanos a las estaciones, el error máximo es de $25 \text{ } \mu\text{Gal}$, suponiendo que se conserva esta diferencia en un radio de 16 m , según el esquema propuesto por Hammer (en Telford *et al.*, 1979). Este error es mayor ($1500 \text{ } \mu\text{Gal}$) en las estaciones cercanas a la Sierra Cucapá (Chase *et al.*, 1978).

El error asociado al enlace entre levantamientos está en función del cambio en elevación de la estación gravimétrica de enlace (estación No. 20 del estudio de 1978) ubicada sobre roca volcánica en la falda del Volcán Cerro Prieto. La subsidencia asociada al volcán puede suponerse de menor intensidad que la del relleno sedimentario en aproximadamente 0.001 m/año . En el período considerado esta subsidencia asciende a 0.019 m que, por efecto de aire libre, es de $5.8 \text{ } \mu\text{Gal}$ y por Bouguer, de $2.1 \text{ } \mu\text{Gal}$.

El cálculo de la anomalía de Bouguer simple es la suma algebraica de las correcciones a los distintos factores que afectan la lectura gravimétrica. El error total asociado a su estimación se calcula a partir de la suma de los errores de cada corrección.

$$\epsilon \Delta g_B = \pm \epsilon g_{\text{obs}} \pm \epsilon g_N \pm \epsilon g_{\text{a.l.}} \pm \epsilon g_{\text{boug}} \pm \epsilon g_{\text{topog.}} \pm \epsilon g_{\text{enlace}}$$

donde:

$\epsilon \Delta g_B$ = error total en la estimación de la anomalía de Bouguer simple ($\pm 60 \text{ } \mu\text{Gal}$).

ϵg_{obs} = error instrumental ($\pm 9 \text{ } \mu\text{Gal}$).

ϵg_N = error en la estimación de la gravedad teórica ($\pm 0.7 \text{ } \mu\text{Gal}$).

$\epsilon g_{\text{a.l.}}$ = error en la estimación del efecto de aire libre ($\pm 12.3 \text{ } \mu\text{Gal}$).

ϵg_{boug} = error en la estimación de la corrección de Bouguer ($\pm 4.5 \text{ } \mu\text{Gal}$).

$\epsilon g_{\text{topog.}}$ = error por desnivel topográfico en estaciones alejadas de la sierra Cucapá ($\pm 25 \text{ } \mu\text{Gal}$).

$\epsilon g_{\text{enlace}}$ = error de enlace entre la campaña de 1978 y 1997 ($\pm 8 \text{ } \mu\text{Gal}$).

Diferencias mayores a $60 \text{ } \mu\text{Gal}$, en anomalía de Bouguer simple (Δg_B) entre ambas campañas gravimétricas, pueden ser consideradas significativas. No obstante, con el propósito de dar mayor certidumbre a las diferencias, no se incluyen las estaciones ubicadas a menos de 2 km de la Sierra Cucapá en las que la corrección por el efecto del desnivel topográfico es mayor a $\pm 25 \text{ } \mu\text{Gal}$.

ANOMALÍA DE BOUGUER SIMPLE

La configuración de la anomalía de Bouguer simple obtenida se presenta en la Figura 2. El mapa de anomalía de Bouguer relativa para 1997 muestra el mismo patrón de anomalías que el de 1978 (Figura 3 de Chase *et al.*, 1978) y las obtenidas por Velasco y Martínez (1963) y Fonseca y Razo (1979). La configuración para 1997 delinea la estructura terciaria constituida por las lutitas y areniscas del ambiente deltáico en el CGCP, en la que destaca un máximo con eje de rumbo NW-SE ubicado al noroeste del área de estudio. Este máximo es coincidente con grandes depósitos de areniscas, según se aprecia en los cortes litológicos de los pozos M-3, Q-757, M-96, correspondientes a las facies frontales del delta (Cobo, 1979).

Debido a una mejor cobertura de estaciones, el bajo gravimétrico ubicado al SW de la zona de estudio se ha desplazado aproximadamente 3 km al S con respecto al presentado por Chase *et al.* (1978) coincidiendo con el de Velasco y Martínez (1963). El mínimo ubicado al SE de la zona coincide con el configurado por Velasco y Martínez (1963) y Fonseca y Razo (1979). Se observa el efecto de silla de montar en el poblado Nuevo León presentado por Fonseca y Razo, (1979) y bosquejado por Velasco y Martínez (1963) y Chase *et al.* (1978).

CAMBIOS EN GRAVEDAD OBSERVADA EN EL PERIODO 1978-1997

En vista de que las bases gravimétricas utilizadas en 1978 no corresponden a las de 1997, se uniformizaron los datos para configurar un mapa de cambios gravedad. Para ello se interpolaron, tanto la gravedad observada como las alturas de las estaciones gravimétricas en una malla regular. El esquema de interpolación utilizado es kriging y la distancia entre nodos fue de 400 m . La gravedad observada y la altura de las mallas interpoladas del levantamiento de 1997 fueron restadas de las de 1978, nodo a nodo. De esta forma los signos negativos en los cambios de gravedad observada implican disminuciones en la gravedad y los signos negativos en la diferencia de alturas reflejan subsidencia.

Los cambios en la gravedad observada producto de la resta contienen el efecto de la diferencia en elevación entre nodos, por lo que se procedió a corregir el efecto de aire libre considerando $30.86 \mu\text{Gal/m}$. Ante la dificultad de considerar la compresibilidad de la roca y el espesor del estrato compactado que es muy variable y difícil de evaluar, Allis y Hunt (1986) propusieron considerar que la subsidencia en el terreno es igual a la compactación causada por la extracción de masa del yacimiento. Esta consideración implica que los espacios desocupados por el fluido extraído son ocupados, durante el intervalo de tiempo considerado, por el reacomodo de los sedimentos. El efecto en el cambio de gravedad se expresa como sigue:

$$\Delta g = 2\pi G \rho \Delta h,$$

donde G es la constante gravitacional ($6.673 \times 10^{-8} \text{ (g/cm}^3\text{)/s}^2$), ρ corresponde a la densidad del fluido extraído y Δh es la diferencia en elevación en el periodo de tiempo considerado. En este trabajo se supone que el fluido extraído es agua (sistema agua-saturado) con $\rho = 1.0 \text{ g/cm}^3$ y la diferencia en elevación es $\Delta h = h_{1997} - h_{1978}$. Se estiman que el efecto es $\Delta g \approx -40 \mu\text{Gal/m}$. No obstante, si el fluido extraído fuera únicamente vapor, el efecto sería mucho menor ($\Delta g \approx -0.4 \mu\text{Gal/m}$). Además, el efecto topográfico de las estaciones se minimizó al considerar únicamente la zona del CGCP alejada de los relieves topográficos abruptos, como la Sierra Cucupá.

Los cambios en gravedad corregidos por subsidencia que se consideran significativos son los mayores a $200 \mu\text{Gal}$, pues se tienen errores asociados a la medición y reducción de datos del orden de $60 \mu\text{Gal}$, que sumados al causado por la interpolación, podrían ascender a $150 \mu\text{Gal}$. De aquí en adelante, a los cambios significativos observados entre 1978 y 1997, corregidos por subsidencia, se les referirá únicamente como diferencias en **gravedad observada**.

La configuración de las diferencias en gravedad observada se presenta en la Figura 3, incluyéndose además las posiciones de la Falla Cerro Prieto (Fonseca, 1982) y la zona de las fallas H y L en el techo del estrato beta (Truesdell *et al.* 1995).

Se observan dos zonas con diferencias en gravedad observada. Una corresponde a prácticamente todo el CGCP con mínimos gravimétricos en la que se identifican tres subzonas y la otra, ubicada al NW y fuera del CGCP muestra un aumento en la respuesta gravimétrica, según se describen en seguida.

Las tres subzonas con disminución en la respuesta gravimétrica dentro del CGCP son:

1. Subzona CPI y zona de la Falla Cerro Prieto. Se ubica en la porción W del CGCP con disminuciones en la respuesta gravimétrica mayor a $-648 \pm 200 \mu\text{Gal}$. En esta zona la isolínea de cero se extiende más hacia el occidente de la zona de la Falla Cerro Prieto, controlada por las bases gravimétricas de

1997, pero sin cobertura por parte del estudio de 1978. Por lo anterior, la extensión en dirección NW-SE no puede ser acotada con precisión. Se observa que la isolínea de cero entra desde el flanco sur del CGCP en la intersección de las fallas L y H extendiéndose hacia el NNW hasta la porción central de CPI.

2. Subzona CPIII. Esta subzona es la que presenta mejor control de estaciones está limitada al norte por las estaciones ubicadas sobre la carretera, en su porción central por las que se encuentran dentro del CGCP, y al occidente, por las estaciones a lo largo de la vía del ferrocarril. La amplitud de las variaciones de gravedad observada es mayor a los $-774 \pm 200 \text{ mGal}$ y parece estar limitada al SE por el trazo a profundidad de la falla H. Corta al reservorio beta, en donde se cierra para dar lugar a una zona de menor variación ($-200 \pm 200 \mu\text{Gal}$).
3. Subzona CPII. En esta zona se observa la mayor variación dentro del CGCP ($-1018 \pm 200 \mu\text{Gal}$); sin embargo, es importante puntualizar que para el levantamiento de 1978, no se contó con una cobertura suficiente de estaciones, para poder restringir su extensión hacia el sur.

Por su parte, el máximo de diferencias gravimétricas positivas ubicado al oriente del Volcán Cerro Prieto se encuentra fuera de la zona de explotación y está circunscrito al eje de la vía del ferrocarril. No obstante, no se tiene suficiente cobertura de estaciones en los flancos oriental y occidental para acotarlo con certidumbre. La magnitud de la diferencia en gravedad es mayor a $+1200 \pm 200 \mu\text{Gal}$.

El perfil A-A' de orientación SW-NE en su primera sección y de W-E en la segunda (Figuras 3 y 4) presenta dos mínimos relativos con diferencias en gravedad negativas. El mínimo más occidental inicia con diferencias positivas en la primera sección del perfil y disminuye hasta llegar a cero al aproximarse a la zona de la Falla Cerro Prieto, donde alcanza valores menores a los $-600 \pm 200 \mu\text{Gal}$ al occidente de CPI y aumenta gradualmente a valores positivos en la zona de CPI y en la del trazo de la falla L. El segundo mínimo relativo empieza a descender en el flanco oriental de la falla L hasta alcanzar diferencias en gravedad observada mínimas de $-774 \pm 200 \mu\text{Gal}$ en la zona que cruza CPIII, para elevarse de nuevo en el margen oriental del CGCP y en la porción noreste de la falla H, sin alcanzar diferencias positivas.

El perfil B-B', cuya orientación es NW-SE (Figura 3), es paralelo a las estructuras principales del centro de dispersión (fallas Cerro Prieto e Imperial). Muestra una evolución positiva de gravedad en su porción más NW, fuera del CGCP y baja gradualmente hasta alcanzar un mínimo relativo en la falla H. Decece de nuevo al SE de la zona y fuera del CGCP (Figura 3).

INTERPRETACIÓN DE LOS CAMBIOS EN GRAVEDAD

SUBZONA DE LA FALLA CERRO PRIETO Y CPI

La disminución de la respuesta gravimétrica en esta zona puede deberse a la deficiencia de masa por la extracción de fluido. La pérdida de fluido geotérmico dentro del reservorio alfa se ha manifestado por la disminución de niveles en los pozos y la pérdida de entalpía (Beall *et al.*, 1994). El volumen extraído en el reservorio alfa hasta 1997, asciende a 48 millones de toneladas métricas (Truesdell *et al.*, 1998). No obstante, el monitoreo de la concentración de cloruros en el fluido geotérmico junto con la composición en oxígeno-18 y deuterio, han indicado una zona de recarga de aguas frías desde la porción oeste del campo desde el inicio de la explotación, (Stallard *et al.*, 1987; Truesdell *et al.*, 1979), que ha sido cuantificada en aproximadamente el 50% del total del fluido extraído (Truesdell *et al.*, 1998).

El alto relativo que muestra el perfil A-A' a 4000 m del inicio del perfil (Figura 4) configura el borde oriental de esta subzona y se extiende desde la porción sur de CPI hasta su porción central en dirección NW a lo largo del trazo de la falla L (Figura 3). Allí se efectúan dos procesos de incorporación de masa: Primero, la recarga del acuífero alfa a través de la falla L, que coincide con la extensión del máximo relativo (isolínea cero) y segundo, se interpreta que ocurre una inyección de salmuera residual ($T < 25^{\circ}\text{C}$). Este último aporte de masa, aunque de menor cantidad, pues representa aproximadamente el 30% del total de fluido extraído del reservorio alfa (Truesdell *et al.*, 1998), podría provocar un aumento en la masa neta, tanto por ser más denso que el fluido geotérmico, como por la contracción de la roca por el cambio de temperatura. Se considera que el aumento en la densidad por la contracción de la roca debido a la diferencia en temperatura podría no ser significativo, dado su bajo coeficiente de expansión (Schatz *et al.*, 1981).

SUBZONA CPIII

El mínimo en la evolución de la gravedad observada refleja la deficiencia de masa en el reservorio geotérmico. En esta subzona está ubicado el bloque levantado del estrato productor beta, ampliamente documentado, tanto por la formación de zonas de vapor alrededor de los pozos (que denota escasa recarga), como por la interpretación de datos isotópicos y químicos del fluido geotérmico (Truesdell *et al.*, 1998). El límite NE de este mínimo relativo corresponde con la posible zona de recarga del estrato productor beta en la porción NE de la falla H, donde las diferencias son menores a $-250 \pm 200 \mu\text{Gal}$ (Perfil A-A', Figura 4). Por su parte, el límite SE del mínimo gravimétrico está asociado a la ubicación del contacto de la falla H con el reservorio beta. De igual forma, el límite de deficiencia de masa en la margen norte del CGCP se marca con la isolínea cero.

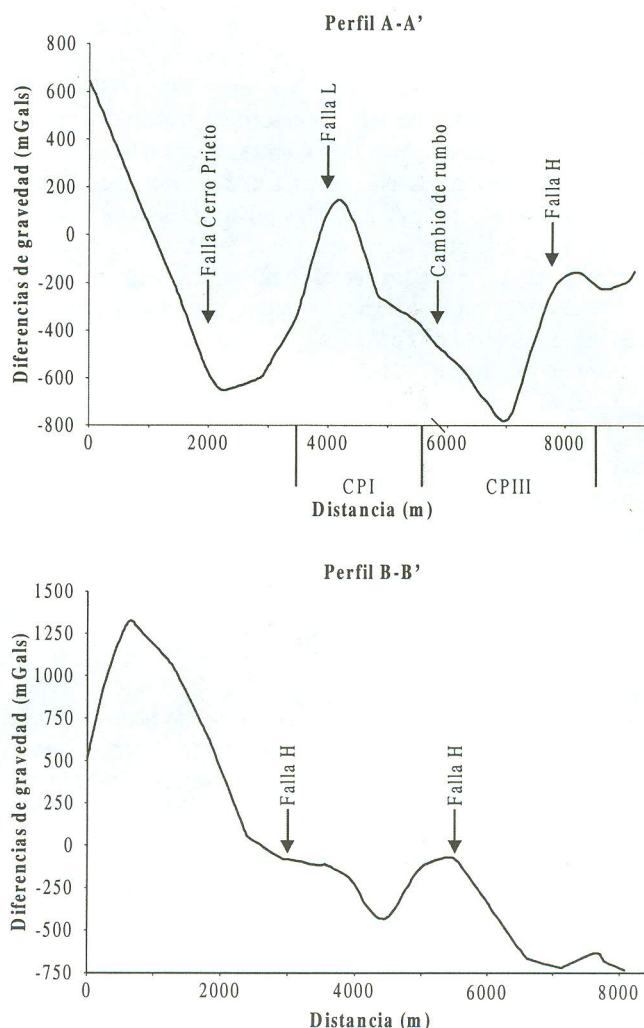


Figura 4. Perfiles de diferencia de gravedad observada (corregida por subsidencia) entre 1978 y 1997. La ubicación espacial de los perfiles se muestra en la Figura 3.

SUBZONA CPII

Esta subzona está relacionada con la porción del estrato productor beta ubicado en el bloque caído de la falla H, observándose el cambio en gravedad espacialmente más extenso dentro del CGCP. Sin embargo, la cobertura entre estaciones no es suficiente para acotarlo, mostrándose desplazado hacia el SE fuera del CGCP. Truesdell *et al.* (1998) estimaron que la extracción de fluido geotérmico en este estrato productor asciende a 1.3×10^9 toneladas métricas de las que aproximadamente el 20% proviene de la recarga de agua fuera del sistema geotérmico. Este déficit de masa es congruente con la disminución de la respuesta gravimétrica durante el período 1978-1997 que abarca prácticamente toda la historia de explotación de este reservorio.

Los numerosos sismos que han ocurrido de 1978 a 1997, dentro y fuera del CGCP, (Frez y Frías-Camacho, 1998) pudieron haber funcionado como disparadores de

asentamientos produciendo compactación e incremento en la densidad al igual que los sismos Victoria en 1980 y Cerro Prieto y Superstition Hills en 1987, entre otros (Glowacka, 1998). Este fenómeno no está circunscrito únicamente a la zona del CGCP, ya que dichos movimientos están relacionados a movimientos tectónicos. No obstante, el esquema de corrección por subsidencia propuesto por Allis y Hunt (1987) supone que el medio geológico ha respondido a la subsidencia al compactarse, los espacios intergranulares desocupados por el fluido extraído, sin considerar la ocurrencia de los sismos. A su vez, el esquema de corrección por subsidencia aplicado en este trabajo supone que la compactación desplazó únicamente agua. Esto podría estar ocurriendo parcialmente, ya que en algunas zonas del yacimiento, particularmente en el estrato productor beta, al NW de la falla H, se han formado zonas de vapor, es decir, el fluido geotérmico extraído contiene mayor proporción de vapor que de agua, sobrestimando las diferencias gravimétricas.

CONCLUSIONES

La comparación de las configuraciones de la anomalía de Bouguer simple entre ambos levantamientos mostraron diferencias, principalmente en la ubicación del mínimo gravimétrico al SW de la zona de estudio y el máximo al SE con el estudio de Chase *et al.* (1978). Se delineó el rasgo de silla de montar en el Poblado el Ejido Nuevo León al este de la zona de estudio que había sido bosquejado por Chase *et al.* (1978) y configurado por Velasco y Martínez (1963) y Fonseca y Razo (1979).

Las diferencias gravimétricas observadas corregidas por subsidencia, según el esquema propuesto por Allis y Hunt (1986) dentro del período 1978-1997, son mayores que el error estimado en la obtención y reducción de datos, así como del error en la interpolación a una malla regular ($\pm 200 \mu\text{Gal}$).

El análisis de las diferencias gravimétricas observadas entre 1978 y 1997 es congruente con la respuesta inferida a partir de los estudios isotópicos, geoquímicos y termodinámicos del yacimiento geotérmico por su explotación. Se encontró que existe una zona generalizada de pérdida de masa que coincide espacialmente con el CGCP y que puede dividirse en tres subzonas. Una está relacionada espacialmente con la Falla Cerro Prieto y el reservorio alfa con diferencias en gravedad observada de $-648 \pm 200 \mu\text{Gal}$. Las otras dos están relacionadas con el estrato productor beta a ambos lados de la falla normal H. En el costado NW de la falla H, correspondiente al bloque levantado, se obtuvieron diferencias de $-774 \pm 200 \mu\text{Gal}$, mientras que en el flanco SE, en el bloque hundido, se observaron diferencias de $-1018 \pm 200 \mu\text{Gal}$. La extensión de estas diferencias gravimétricas negativas sólo pudo ser acotada en la subzona correspondiente al bloque levantado, al NW de la falla H, debido a la mejor cobertura de estaciones. Se identificó la disminución de las diferencias en gravedad observada de hasta $-250 \pm 200 \mu\text{Gal}$ al oriente de

esta subzona, que corresponde al borde NE de la falla H, posiblemente relacionado con la zona de recarga del estrato beta. A su vez, es posible relacionar la zona con diferencias positivas de gravedad (máximo relativo) que entra desde la porción sur de CPI con zonas de aportación de masa al estrato productor alfa por recarga a través de la falla L, o bien, por la inyección de una salmuera residual.

No se observa en la frontera SE del CGCP, por donde se infiere recarga del estrato productor beta, una zona con diferencias gravimétricas menores con respecto a las de la zona de explotación.

El monitoreo de las variaciones gravimétricas temporales y espaciales en el CGCP podría ayudar a inferir cambios de masa dentro del yacimiento debido al efecto combinado de extracción-inyección-subsidencia de utilidad al conocimiento de la evolución del yacimiento.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos a la Residencia de Estudios del Campo Geotérmico de Cerro Prieto, CFE, especialmente a su Residente el Ing. Hector Gutiérrez Puente y a los Ings. Francisco Arellano y Hector Lira por haber puesto a nuestra disposición los datos de nivelación de bancos del CGCP. Agradecemos también al Dr. Juan García Abdeslem por sus atinados comentarios en el análisis de los datos y edición del manuscrito, a la Dra. Ewa Glowacka por su arbitraje y a los demás arbitros anónimos, a Luis A. Delgado Argote por su inapreciable ayuda en la edición del texto, a Victor M. Frías Camacho por la edición de las figuras y a Bárbara Uribe por la corrección del manuscrito. Este trabajo forma parte de la Tesina del Ing. Juan Manuel Cobo Rivera dentro del programa de la Especialidad en Geotermia del Instituto de Ingeniería de la UABC.

REFERENCIAS

- Allis, R.G. y Hunt, T.M., 1986, Analysis of exploitation-induced gravity changes at Wairakei Geothermal Field, *Geophysics*, Vol 51, pp. 1647-1660.
- Beall, J.J., Pelayo, A., Ocampo J. de D., 1994, Dry Steam Feed Zones and Silica Scaling as Major Controls of Total Flow Enthalpy at Cerro Prieto, Mexico., *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 21, pp. 153-156.
- Biehler, S., Kovach, R.L. y Allen, C.R., 1964, Geophysical framework of the northern end of the Gulf of California structural province: in Van Andel, T., y Shor, G., eds., *Marine Geology of Gulf of California: American Association of Petroleum Geologist Memoir 3*, p. 126-296.
- Chase, D.S., Clover, R.C., Grannell, R.B., Leggewie, R.M., Eppink, J., TAarman, D.W., y Goldstein, N.E., 1978, Precision Gravity Studies at Cerro Prieto, *Proceedings, First Symposium on the*

- Cerro Prieto Geothermal Field, Lawrence Berkeley Laboratory, LBL report 7098, pp. 249-264.
- Cobo, J.M.R., 1979, Geología y mineralogía del campo geotérmico de Cerro Prieto. Proceedings, Segundo Simposio sobre el Campo Geotérmico de Cerro Prieto, Baja California, México, pp. 103-117.
- Ehara S, Fujimitsu, Y., Nishijima, J., Mtoyama, T., Shimisako, N. y Y. Nakano, 1998, Reservoir monitoring by repeat gravity measurements at some geothermal fields in Kyushu, Japan. *Geothermal Resources Council Transactions*, 22, pp. 153-162.
- Elders, W.A., Rex, R.W., Meidav, T., Robinson, P.T. y Biehler, S., 1972, Crustal Spreading in Southern California. *Science*, 178, pp. 15-24.
- Elders, W.A., D.K. Bird, A.E. Williams y P. Schiffman, 1984, Hydrothermal flow regime and magmatic heat source of the Cerro Prieto Geothermal system, Baja California, México, *Geothermics*, 13(1), pp. 27-47.
- Fonseca, H. y Razo, A., 1979, Gravity, magnetics and seismic reflection studies at the Cerro Prieto geothermal field. Proceedings, Second Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Comision Federal de Electricidad, pp. 303-328.
- Fonseca, H., 1982, El campo Geotérmico de Cerro Prieto. Estudios geofísicos realizados. Proceedings. Cuarto Simposio sobre el campo geotérmico de Cerro Prieto, Baja California, México. Vol. 1, pp. 5-40.
- Frez, C. y V. Frías-Camacho, 1998, Mapas anuales de sismicidad para la región fronteriza de ambas californias. *GEOS*, 18(2), pp. 112-130.
- Glowacka, E., 1998, Deformaciones superficiales en el area de Cerro Prieto y sus relaciones con sismicidad y extracción de fluidos. Resumen. Simposio CICESE-CFE, Ensenada, B.C., Mexico.
- González G. J. J., 1994, Control Geodésico y Gravimétrico de la Falla Imperial en el Valle de Mexicali: Primera Epoca. Parte Nivelación. Informe Técnico Final. Div. Ciencias de la Tierra. CICESE., Ensenada, México.
- Grannell, R.B., Tarman, D.W., Clover, R.C., Leggewie, R.M., Aronstam, P.S., Kroll, R.C., y Eppink, J., 1979, Precision Gravity Studies at Cerro Prieto-The Second Year, Proceedings, Second Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Comision Federal de Electricidad, pp. 329-334.
- Grannell R.B., Kroll, R.C., Wyman, R.M., Aronstam, P.S., 1981a, Precision Gravity Studies at Cerro Prieto-A Progress Report, Proceedings, Third Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Lawrence Berkeley Laboratory, LBL Report 11967, pp. 329-333.
- Grannell, R.B., Whitcomb, J.H., Aronstam, P.S. y Clover, R.C., 1981b, An assessment of Precise Gravity Measurements for Monitoring the Response of a Geothermal Reservoir to Exploitation, Lawrence Berkeley Laboratory Report LBL-12910, GSRMP-11, UC-66e.
- Grannell, R.B., Wyman, R.M., y Randall, G.A., 1982, Subsidence Detection at Cerro Prieto Geothermal Field by Precision Gravity Studies. Proceedings, Fourth Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field., pp. 195-197.
- Halfman, S.E., M.J. Laippmann, R. Zelwer y J.H. Howard, 1984, Geologic interpretation of geothermal fluid movement in Cerro Prieto field, Baja California, Mexico, *American Association of Petroleum Geologist Bulletin.*, 68, pp. 18-30.
- Halfman, S.E., Mañon, A. y M.J. Lippamnn, 1986, Update of the hydrogeologic model of the Cerro Prieto field based on recent well data. *Geothermal Resources Council Transactions*, 10, pp. 369-375.
- Kissam, C.E., 1981, Surveying for civil engineers. McGraw-Hill, pp. 799.
- Lippmann, M.J., Truesdell, A.H., S.E. Halfman-Dooley y Mañón M., 1991, A Review of the hydrogeologic-geochemical model for Cerro Prieto. *Geothermics* 20 (1/2), pp. 39-52.
- Lira, H. H., 1998, Monitoreo de la subsidencia en el campo geotermico de Cerro Prieto. Resumen. Simposio CICESE-CFE, Ensenada, B.C., Mexico.
- Longman, I.M., 1959, Formulas for computing the tidal accelerations due to the moon and the sun: *Journal of Geophysical Research*, 64, No.12, pp. 2351-2355.
- Lomnitz, C., Mooser, F., Allen, C. R., Brune, J. N. y Thatcher, W., 1970, Seismicity and tectonics of the northern Gulf of California region, México, preliminary results. *Geofísica Internacional*. 10(2), pp. 37-48.
- Nettleton, L.L., 1979, Gravity and magnetics oil prospecting. Mc. GrawHill, pp. 464.
- Oropeza P.A., y J.M. Wong Z., 1998, Status and thecnical design of the Cerro Prieto IV geothermal Project. *Geothermal Resources Council Transactions*, 22, pp. 315-319.
- Schatz, J.F., 1981, Propierties of Cerro Prieto rock at simulted in situ conditions. Proceedings. Tercer Simposio sobre el campo geotérmico de Cerro Prieto, Baja California, México, pp. 292-296.
- Stallard, M.L., Winnet, T.L., Truesdell, A.H., Coplen, T.B., Kendall, C., White, L.D., Janik, C.J. y J.M. Thompson, 1987, Patterns of change in water isotopes from the Cerro Prieto geothermal field 1977-1986. *Geothermal Resources Council Transactions*, 11, pp. 203-210.
- Sugihara, M. y T. Ishido, 1998, Gravity monitoring at the Sumikawa Geothermal field, Japan. *Geothermal Resources Council Transactions*, 22, pp. 191-195.
- Telford W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E. y D.A. Keys, 1976, Applied Geophysics, Cambridge Univ. Press., pp. 860.
- Truesdell, H.A., Rye, R.O., Pearson, Jr. F.J., Olson, E.R., Nehring, N.L., Huebner, M.A. y T.B. Coplen, 1978, Preliminary isotopic studies of fluids from the Cerro Prieto Geothermal Field, Proceedings, First Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Lawrence Berkeley Laboratory, LBL report 7098, pp. 95-101.

- Truesdell, H.A., Mañon, A., Jiménez, M.E., Sánchez, A. y Fausto, J.J., 1979, Geochemical evidence of drawdown in the Cerro Prieto geothermal field, *Geothermics*, 8, pp. 257-265.
- Truesdell, H.A., Lippmann, M.J., Quijano, J.L. y D'Amore, F., 1995, Chemical and physical indicators of reservoir processes in exploited high-temperature, liquid-dominated geothermal fields. Proceedings of the World Geothermal Congress, Florence, Italy, 18-31 May 1995, pp. 1933-1938.
- Truesdell H.A., Lippmann, M.J. y H. Gutierrez P., 1997, Evolution of the Cerro Prieto reservoirs under exploitation, *Geothermal Resources Council Transactions*, 21, pp. 263-269.
- Truesdell H.A., Lippmann, M.J., H. Gutiérrez P y J. de León V., 1998, The importance of natural fluid recharge to the sustainability of the Cerro Prieto resource, *Geothermal Resources Council Transactions*, 22, pp. 529-536.
- Vázquez, G. R., 1998, Estudio Geohidrológico del Campo Geotérmico de Cerro Prieto, Informe Técnico RE 05/98. Div. Ciencias de la Tierra. CICESE., Ensenada, México.
- Velasco, J. y Martínez, 1963, Levantamiento gravimétrico. Zona geotérmica del Valle de Mexicali, Baja California. Consejo Recursos Naturales No Renovables, *Reporte Interno*.