

ESTUDIOS DE MICROTECTONICA Y DE ANOMALIAS DE POTENCIAL EN EL CAMPO GEOTERMICO DE CERRO PRIETO

A. Reyes, A. Razo¹

Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada
Ensenada, B. C.

RESUMEN

Los estudios de sismicidad en la región del campo geotérmico de Cerro Prieto han proporcionado un singular conjunto de datos que exhiben una fuerte correlación entre el sistema de fallas delineado por la distribución de epicentros y mecanismos focales asociados con las anomalías de gravedad, magnetismo, y resistividad. Los datos indican también que el campo geotérmico está caracterizado por esfuerzos tensionales locales que permiten la circulación de fluidos hidrotermales desde la profundidad hasta la superficie. Los sistemas de fallas de la región, interpretados con base en las anomalías de gravedad, están sustentados por la distribución de los epicentros de los sismos. De este modo indican que las fallas tienen alta permeabilidad para la circulación hidrotermal.

Las anomalías regionales de Bouguer indican la existencia de dos fosas tectónicas (grabens) locales. Una está situada al SE del campo geotérmico, cerca del Ejido Victoria, y la otra al NE. Los datos sísmicos indican que la primera se encuentra en un campo de esfuerzos tensionales. Aunque la información es incompleta, hay indicios de que la segunda fosa se encuentra en el mismo campo de esfuerzos.

La correlación con las anomalías magnéticas no es tan clara como en el caso anterior. En la región del Ejido Victoria, los máximos relativos de las anomalías magnéticas también están correlacionados con los campos de esfuerzos tensionales.

El cuadro general de las anomalías de resistividad corresponde con los lineamientos de los campos tensionales regionales, lo que indica que la permeabilidad inducida por el fallamiento sísmico permite la circulación de fluidos geotérmicos de baja resistividad en la región situada dentro de las fosas tectónicas.

INTRODUCCION

Estudios sísmicos en campos geotérmicos activos sísmicamente han probado ser una herramienta útil para

su exploración. Se ha aceptado generalmente que los campos geotérmicos están localizados en regiones de tectonismo activo bajo un régimen regional de esfuerzos tensionales. El modelo geofísico comúnmente aceptado de un campo requiere: a) La existencia de una fuente de calor profunda o receptáculo magmático lo suficientemente grande como para garantizar la operación de la planta geotérmica por periodos de tiempo que garanticen su rentabilidad. b) Una zona con la suficiente permeabilidad para el transporte de calor por fluidos geotérmicos a los reservorios cercanos a la superficie. A lo largo de la zona de falla, el fracturamiento inducido por la actividad de temblores provee la permeabilidad necesaria para extraer los fluidos geotérmicos.

Recientemente han sido utilizados métodos sísmicos pasivos para obtener estimaciones cuantitativas sobre el tamaño y profundidad de regiones anómalas de baja velocidad, producidas por posibles cambios en composición de las rocas y/o regiones de temperatura anormalmente alta con fracciones pequeñas de fusión-parcial. Esta última interpretación es la más aceptada con base en el tectonismo local.

Ultimamente se han orientado esfuerzos al estudio de atenuación de ondas sísmicas de corte (onda S) y coda. El argumento principal está basado en experimentos de laboratorio en los cuales se ha observado atenuación anómala (bajo valor -Q) asociada a dispersión geométrica por fracturamiento intenso y/o rocas saturadas con fluidos de alta temperatura.

Debido, por una parte, a la necesidad de estimaciones cuantitativas sobre el tamaño, profundidad, localización de la fuente de calor, y del reservorio; y por otra, a que los métodos sísmicos pasivos aún se encuentran en estado de desarrollo, es importante probar los modelos inferidos por estudios de sismicidad local con otros estudios geofísicos tales como: gradientes de temperatura, anomalías de resistividad, gravedad, y magnéticas. En el estudio de Microsismicidad regional del campo geotérmico de Cerro Prieto, Reyes (1979) y Albores,

1. Comisión Federal de Electricidad, México, D. F.

et al. (1980) demostraron que el Campo Geotérmico puede explicarse sobre la base de los esfuerzos tectónicos inducidos por el sistema de fallas transformadas Cerro Prieto-Imperial. En el presente estudio se encontró que existe una fuerte correlación entre la estructura microtectónica con el patrón de anomalías geofísicas. Sólo se hará una interpretación conjunta cualitativa entre diferentes estudios geofísicos conducidos en Cerro Prieto, puesto que los modelos tridimensionales en medios altamente heterogéneos aún se encuentran en su estado de desarrollo incipiente.

Como consecuencia, la interpretación puede descansar únicamente en argumentos basados en el conocimiento de estudios previos y en argumentos heurísticos. Si se fuera a desarrollar un modelo con bases geofísicas del campo geotérmico de Cerro Prieto, se podría argumentar que, debido a la complejidad de la cubierta sedimentaria apilada por el Río Colorado, los sedimentos deben estar fracturados, ya sea obedeciendo a un patrón distribuido aleatoriamente, o bien siguiendo el patrón de fracturamiento regional observado (interpretado de los estudios de sismicidad) en las regiones profundas de la corteza (5 a 10 km). En el primer caso sería razonable esperar que las anomalías de resistividad siguieran un patrón irregular, sugiriendo que aún cuando fuera posible determinar las zonas profundas de alta permeabilidad para la circulación de fluidos geotérmicos, los reservorios estarían distribuidos cerca de la superficie aleatoria en cuyo caso serían necesarios sofisticados métodos sísmicos activos para encontrar tales reservorios.

En el segundo caso es razonable esperar que el patrón de anomalías resistivas siga la tendencia regional de esfuerzos tectónicos tensionales. Las anomalías gravimétricas y magnéticas deben semejar a las anomalías de tipo graben que se observan en las cuencas del golfo de California; por ejemplo: las cuencas de Guaymas y Farallón.

Si se idealizara la estructura de Imperial Valley-Mexicali se debería tomar un modelo semejante al observado en las cuencas del golfo de California (Fisher, R., Rusnak, A., 1964) al sur, puesto que pertenece a la misma región tectónica, en donde los estudios de flujo térmico de Lawver (1973) indican el papel que juega la cubierta sedimentaria en una región de sedimentos gruesos. Los sedimentos distribuyen la anomalía de flujo de calor por circulación hidrotermal profunda, hacia las paredes del graben, como se observa en la cuenca Guaymas. En el caso contrario, la delgada cubierta sedimentaria, como por ejemplo en las cuencas Delfín y Salsipuedes, no tiene efecto importante en la anomalía de flujo térmico y muestra la distribución esperada i. e. máxima al centro del graben. En este caso, la anomalía de flujo térmico ha sido interpretada por Lawver (1973) como producida por la intrusión de un sistema de diques magmáticos del manto.

En el presente estudio se encuentra una fuerte correlación entre las diferentes observaciones geofísicas, todas las cuales pueden utilizarse para predecir las regiones más probables para la localización de reservorios geotérmicos.

RESUMEN DE RESULTADOS PREVIOS DE ESTUDIOS SISMICOS

En el pasado se han llevado a cabo estudios de sismicidad utilizando redes locales portátiles. Los resultados han sido reportados en un artículo previo por A. Albores *et al.* (1980) y en un reporte técnico GEO79-01 (CICESE-Junio-1979). A continuación se presenta una breve discusión de los resultados. La figura 1 muestra un mapa refinado de epicentros de la sismicidad estudiados durante diferentes periodos de tiempo, de 1971 a 1978 (Tabla 1). Dos tendencias principales se muestran en la figura 1. La primera sigue una tendencia paralela a la región de fallas de rumbo del sistema de fallas Brawley-Imperial-Cerro Prieto; y la segunda transversal a este sistema con movimiento predominantemente normal a lo largo de una dirección N-NO. Este patrón de fallas es esperado del campo regional de esfuerzos cortantes inducido por el movimiento relativo entre las placas del Pacífico y Norteamérica. El patrón de fallamiento sísmico se resume a continuación.

TABLA 1. PERIODOS DE OBSERVACION

Mayo 1974	—	Julio 1975
Enero 1977	—	Mayo 1978

1. En el extremo sur de la Falla Imperial de fallamiento sísmico se caracteriza por un movimiento de rumbo a lo largo de una tendencia N 40° O. Las profundidades focales estimadas varían de 6 a 13 km. La distribución de epicentros que se encuentran localizados hacia el interior del graben, y que intersectan el extremo sur de la falla, sugiere que están asociados a fallamiento sísmico normal, con un echado casi vertical paralelo a la dirección de los máximos esfuerzos compresionales regionales.

2. En la vecindad del Ejido Nuevo León, 2 km al este de la planta geotérmica, el fallamiento sísmico ocurre sobre una falla normal, con un rumbo estimado de N 40° E. Las profundidades focales estimadas varían de 6 a 11 km.

3. En la vecindad de la estación Delta el fallamiento sísmico ocurre sobre una falla normal con un rumbo predominantemente N 40° E.

4. En la vecindad del Ejido Cucapás la sismicidad ocurre a lo largo de una tendencia de N 40° E, que conecta las fallas Pescadores Cucapás.

5. El fallamiento sísmico sobre la falla Cerro Prieto en la vecindad del Ejido Victoria está caracteriza-

do por movimientos de rumbo a lo largo de un azimuth N 45° O, acompañada por fallamiento sísmico normal con una tendencia predominante NS y fallamiento en echelon sobre fallas paralelas a la falla Cerro Prieto.

EXPLICACION DEL PATRON DE FALLAMIENTO SISMICO

Los trazos superficiales de las fallas Imperial-Cerro Prieto sugieren inmediatamente una separación dextral de la tendencia activa lineal del fallamiento regional en la depresión Salton (denominada así generalmente para incluir a las depresiones de los valles Imperial y de Mexicali). Como resultado, esfuerzos tensionales deben estar actuando en la región del graben comprendido entre ambas fallas ocasionando que la corteza esté sujeta a adelgazamiento dúctil e intenso fracturamiento. Como consecuencia del continuo proceso de acumulación y relajación de los esfuerzos tectónicos regionales (principalmente cortantes), debe de estar ocurriendo un fracturamiento secundario orientado en la dirección de máxima compresión (predominantemente NS), caracterizado principalmente por fracturamiento tensional (en la dirección de máximos esfuerzos tensionales regionales) y fracturamiento de rumbo orientado principalmente en la dirección de máximos esfuerzos cortantes regionales (N 45° O).

Es un hecho comúnmente observado que, como resultado de la relajación de esfuerzos en las zonas de fallamiento de rumbo, se formen fracturas tensionales secundarias orientadas en la dirección de los máximos esfuerzos compresionales locales. Esta dirección ocurre a un ángulo de 45° con respecto al rumbo de la tendencia de las fallas Cerro Prieto e Imperial, las cuales están alineadas con la dirección de máximos esfuerzos cortantes regionales. Este tipo de fracturas están ampliamente documentadas en los tratados sobre geología estructural (Billings, 1972).

Recientemente se ha prestado mayor atención a los detalles de fallamiento secundario inducido por fallamiento sísmico, como es el caso de las observaciones de las réplicas del temblor de Guatemala (febrero 4, 1976, Langer y Bollinger, 1979), en donde se observa claramente que algunas de las réplicas están orientadas en la dirección esperada de fallamiento inducido. Chinneri (1963, I, II), utilizando la teoría elástica de dislocaciones, calculó los cambios en los esfuerzos causados por la creación de una dislocación rectangular vertical (falla rectangular de rumbo) con desplazamiento uniforme en un medio semi-infinito. Las direcciones de máximos esfuerzos compresionales inducidos por la creación de la dislocación rectangular o fallamiento sísmico (Fig. 2) pueden superponerse sobre cualquier distribución inicial de esfuerzos y utilizarse para determinar las posibles localizaciones de fracturamiento secundario origi-

nados como resultado directo del movimiento de rumbo de la falla maestra. A mayor escala se han acumulado evidencias de que los enjambres de diques magmáticos se encuentran orientados en la dirección de máximos esfuerzos compresionales. En la dirección del máximo esfuerzo tensional ocurre la abertura de estas fracturas.

Con base en lo anterior, se puede argumentar que las tendencias oblicuas a la falla Cerro Prieto (líneas N-N' y M-M', Fig. 2) corresponden a fallamiento sísmico asociado a fallas tensionales alineadas en la dirección de máximos esfuerzos compresionales locales.

En la figura 2 se muestra una interpretación del fallamiento sísmico durante el enjambre Victoria, utilizando los resultados de Chinneri (1966, I, II) y escalando a las dimensiones de la zona de réplicas. Como puede observarse las líneas de máximos esfuerzos compresionales localizados en el extremo NO de la línea V-V' coinciden con las tendencias de la línea N-N' y apoyando la hipótesis de fallamiento tensional normal en esta dirección. En las regiones intermedias, la interpretación es ambigua pero no contradice los resultados básicos.

En la figura 3 se ilustra una interpretación del patrón de fallamiento sísmico regional, el cual se deduce parcialmente de los resultados del enjambre sísmico de Estación Victoria, mecanismos focales, patrón de sismicidad, resultados de estudios de anomalías gravimétricas y magnéticas de A. Razo (1978), y de resultados de estudios con base en perforaciones de I. Puente, y con base en la intuición basada en el conocimiento de estudios realizados en el Golfo de California y otras regiones de características tectónicas similares.

INTERPRETACION

Con base en los resultados globales de este estudio y en particular del estudio del Enjambre Victoria (Reyes, González, 1980) es posible argumentar sobre el mecanismo de fallamiento sísmico en la Cuenca Salton. Se observa comúnmente que los enjambres sísmicos ocurren frecuentemente en zonas de volcanismo activo. El mecanismo que se ofrece como el más convincente es el de reducción de los esfuerzos normales que sellan la zona de fractura a través de un incremento en la presión de poro, debido a la inyección de fluidos a una profundidad del mismo orden que las máximas profundidades focales. La presión del fluido no se sugiere sea alta, de hecho, puesto que la dirección de máximos esfuerzos tensionales hemos argumentado que ocurre normal a las fallas basculantes, la secuencia sísmica del enjambre puede ocurrir simplemente cuando la presión de poro aumenta lo suficiente para reducir los esfuerzos normales a través de la zona de fractura. Inversamente, el proceso tectónico continuo originado por el movimiento

relativo de las placas América-Pacífico origina un aumento gradual en los esfuerzos cortantes a lo largo del sistema de fallas Imperial-Cerro Prieto, ocasionando un incremento gradual en los esfuerzos tensionales regionales con la consiguiente reducción de los esfuerzos normales, lo que provoca una reducción de la presión efectiva de poro y como consecuencia la migración de fluidos de las regiones de alta presión (mayor profundidad) a las zonas de baja presión. El efecto neto de este proceso es un desequilibrio mecánico en el sistema de fallas, que ocasiona la migración de fluidos de baja viscosidad hacia las regiones de dispersión de volumen ocasionando una reducción en la fricción que amarra las zonas de fracturamiento de rumbo con el consecuente relajamiento de esfuerzos tectónicos por fracturamiento sísmico. Este proceso se ilustra esquemáticamente en la figura 4. Los mecanismos focales (Figs. 7, 8 y 9), de Albores *et al.* (1980), indican que aún cuando la dirección del plano de falla está bien determinado (normal a las fallas Cerro Prieto, Imperial) no coincide con el azimuth de los máximos esfuerzos compresionales regionales; sin embargo, la dirección de deslizamiento sísmico (V_1) es casi paralela a esta dirección, indicando que la dispersión local de la corteza ocurre en la dirección de los máximos esfuerzos tensionales.

Bajo la luz del modelo descrito, Hill (1977 y 1978) ha propuesto un modelo para los enjambres sísmicos. En este modelo, la extensión local de la corteza ocurre en la dirección de máximos esfuerzos tensionales (Fig. 4) a través de la inyección de magma en diques cuya máxima dimensión ocurre en la dirección de máximos esfuerzos compresionales. Las secuencias de enjambres ocurren por el fallamiento cortante a lo largo de fallas conjugadas de rumbo y/o por colapso de fallas normales. Esta extensión local de la corteza es distribuida en todo el volumen en dispersión por el ajuste del sistema de fallas lateral derechas que conectan los diques o las fallas normales.

En la figura 3 se presenta una composición del patrón tectónico, inferido de los resultados y discusiones anteriores. Como se observa, el patrón tectónico es extremadamente complejo. Sin embargo, es posible desenmascarar algunos aspectos singularmente importantes:

Los esfuerzos tectónicos regionales inducen fallamiento sísmico sobre fallas pre-existentes o contemporáneas a la iniciación del tectonismo en la provincia Salton (4 M.A.). Localmente las direcciones de los máximos esfuerzos principales pueden ser diferentes de la de los esfuerzos regionales debido a la heterogeneidad en la composición de la corteza. Por ejemplo, en el sistema tectónico enmarcado se tiene que, para preservar el movimiento de rumbo lateral derecho sobre la falla Cerro Prieto, la velocidad de dispersión sobre la línea N-N'

debe ser mayor que sobre la línea C-C', ocasionando una rotación del centro local de dispersión C-C'. Si se continúa esta argumentación, se observa inmediatamente que la velocidad de dispersión debe ser mayor a lo largo de los centros locales enmarcados (líneas sólidas dobles), y que se disminuye lateralmente para conservar la consistencia con la dirección de máximos esfuerzos regionales. En caso contrario, se observaría fallamiento de rumbo lateral izquierdo en contraposición con la tendencia regional. Como consecuencia, dependiendo de factores tales como: variaciones locales en la velocidad de dispersión de la corteza, viscosidad y volumen de magma disponible en el manto o en la corteza inferior para entrar en el volumen en dispersión, se generan diques o fallamiento normal. En el primer caso, si localmente la velocidad de dispersión es lo suficientemente alta, debe migrar magma basáltico de baja viscosidad proveniente de las partes profundas de la corteza hacia las partes someras de la corteza y, en consecuencia, fundir la corteza superior silfíca, resultando que los centros locales de dispersión evolucionen en centros de volcanismo silfíco, como en el caso de la composición del volcán de Cerro Prieto. Cuando localmente la velocidad de dispersión local es pequeña, fallamiento normal y/o de rumbo, será el mecanismo predominante.

Bajo la luz de los argumentos anteriores, se observa que los enjambres de temblores, el volcanismo silfíco y la actividad geotérmica están asociados predominantemente a zonas dominadas localmente por esfuerzos tectónicos tensionales, como se ilustra en la figura 3. En particular se ha demostrado que esta observación es válida en la vecindad del campo geotérmico de Cerro Prieto, y en la región del Enjambre Victoria. (Puntos CG y EV respectivamente).

En conclusión es posible establecer que, en la región central del graben Cerro Prieto-Imperial, la velocidad de dispersión de corteza es mayor que la que ocurre lateralmente, ocasionando que existan las zonas de tensión que se indican en la figura 3, eje (T). En particular, es interesante observar que dos de dichas zonas coinciden con la zona de pozos productores y de alto flujo térmico del campo geotérmico de Cerro Prieto.

CONCLUSIONES

Los resultados del análisis de anomalías de Bouguer, magnéticas y de resistividad, publicadas por A. Razo (1978), y los resultados del estudio del campo geotérmico de Cerro Prieto de I. Puente (1978), en conjunto con los resultados que se presentan en este estudio y que se esquematizan en la figura 3, muestran una estrecha correlación que se analiza a continuación.

1. En la porción más al norte de la depresión de Cerro Prieto, el flanco O del horst de Imperial coincide con el trazo de la falla Imperial. El mecanismo focal compuesto de los eventos sísmicos indican que el movimiento presente de la falla es de rumbo lateral derecho. La escasa actividad sísmica no ofrece suficiente indicación sobre el trazo activo de la falla; sin embargo, el mecanismo focal, la distribución de eventos y su profundidad focal estimada argumentan en favor de la interpretación de Razo sobre la existencia del horst de Imperial y la profundidad estimada del basamento.

2. El mecanismo focal de los eventos cuya tendencia es oblicua a la falla Imperial indican fallamiento sísmico sobre una falla normal con echado casi vertical hacia el NO. La distribución de epicentros no muestra una tendencia bien definida lo que sugiere que el fallamiento en esta región está asociada a un sistema complejo de fallas normales cuya tendencia regional está claramente indicada en el mapa de anomalías regionales (Fig. 5), el cual muestra un gradiente regional cuyos máximo y mínimo se encuentran a 10 km al SE y 17 km al NO del Ejido Saltillo respectivamente. La dirección de la curva de inflexión de la configuración gravimétrica indica una tendencia NE-SO. Sin embargo, la determinación del trazo del rumbo de este sistema de fallas es muy marginal, debido a la carencia de observaciones gravimétricas entre las líneas 1 y 2 observadas por Razo y Fonseca.

3. En la región comprendida entre el campo geotérmico y el Ejido Nuevo León, el mecanismo de fallamiento sísmico indica un sistema de fallas normales con un echado casi vertical de 30° hacia el SE. En comparación, la falla Pátzcuaro inferida por Razo muestra las mismas características. Aun cuando los datos no son suficientes nos sugieren la existencia de un sistema de fallas con movimiento de rumbo lateral derecho conectando el sistema de fallas normales tal como se esquematiza en la figura 3. Majer, *et al.* (1979), en su estudio de sismicidad somera en esta región, encuentran evidencias de fallamiento de rumbo.

4. Hacia el extremo sur la distribución de las réplicas del Enjambre Victoria muestran dos alineaciones paralelas, una de las cuales coincide con el trazo de la falla de Cerro Prieto, inferido de observaciones de fracturamiento superficial (Kovach *et al.* 1962) (Fig. 4), alineado a la vía del ferrocarril. Es difícil inferir cuál de los dos trazos representa la alineación regional de la falla Cerro Prieto. En contraste, la interpretación de Razo indica que el trazo ocurre entre ambas tendencias. Analizando en detalle el plano de configuración de Bouguer se observa que el mínimo gravimétrico está representado por un valle elongado hacia el NO, con gradientes laterales positivos (NE), por lo que se concluye que la configuración de Bouguer refleja la existencia de ambas fallas. Sin embargo, con los datos disponibles, la interpretación cuantitativa es marginal.

Las otras tendencias inferidas en el análisis de anomalías de Bouguer no muestran actividad sísmica que ayude a corroborar su existencia, lo cual sugiere que la deformación tectónica presente no es significativa sobre dichas tendencias.

La correlación con anomalías magnéticas (Fig. 6) no es tan simple como en el caso anterior. Sin embargo, algunas observaciones sobre los máximos en las anomalías de campo total son especialmente singulares. El volcán de Cerro Prieto se encuentra localizado sobre el flanco NE del máximo magnético de 600 gamas y gravimétrico de 18 mgals que se observa al O del Ejido Michoacán. En contraste, las manifestaciones volcánicas de Obsidian Buttes se encuentran localizadas en un máximo gravimétrico de 15-20 mgals. Biehler *et al.* (1964) argumentan que parte de este máximo gravimétrico es originado por rocas volcánicas y posiblemente por una distribución profunda de rocas altamente metamorfozadas. En el caso de Cerro Prieto, Razo indica que la similitud de las anomalías gravimétricas y magnéticas son un reflejo directo del basamento cuya configuración representa el extremo NO del horst de Cerro Prieto, a una profundidad estimada de 1300 a 1900 m; hacia el SE la profundidad estimada del horst es de 2500 m, indicando la presencia de una falla normal, todo lo cual argumenta en favor del modelo de Hill que se analiza en la sección anterior.

En su estudio de anomalías resistivas (Fig. 7) Razo encuentra que existe una estrecha correlación entre éstas y las grandes estructuras tectónicas del subsuelo. En particular se observa que la anomalía de baja resistividad en el área del campo geotérmico en explotación está íntimamente relacionada al horst de Cerro Prieto y la falla Pátzcuaro. Hacia el SE, en la región del Enjambre Victoria, observamos que la tendencia y localización del mínimo resistivo coincide con la distribución de réplicas. Indicando que la porosidad secundaria producida por fallamiento sísmico provee con la permeabilidad suficiente para la circulación de fluidos geotermales de baja resistividad. La distribución de epicentros cuya tendencia conecta la falla Cerro Prieto con la falla Imperial muestra también una estrecha coincidencia con la tendencia de baja resistividad (4-5 ohms) que se ilustra en la figura 7.

Los resultados anteriores muestran que la interpretación estructural, basada en el análisis simultáneo de anomalías simples de Bouguer y la distribución de fallamiento sísmico, provee una herramienta muy poderosa para entender el proceso de deformación tectónica. En particular, se observa que la depresión de Cerro Prieto, que se refleja en la alineación de los mínimos gravimétricos de la configuración de Bouguer, es producto del adelgazamiento dúctil de la corteza en respuesta a los esfuerzos tectónicos tensionales inducidos por la geometría de la estratificación en las fallas activas Imperial-Cerro Prieto.

El fracturamiento sísmico provee una permeabilidad suficiente para la circulación de fluidos geotermales, como lo muestra la correlación entre las anomalías resistivas y la distribución de epicentros.

El patrón de sismicidad y los mecanismos focales compuestos del plano de fallas descrito anteriormente sugieren que la distribución de la deformación tectónica (deslizamiento sísmico) en el Valle de Mexicali ocurre principalmente a lo largo de dos tendencias tectónicas principales: i) fallas paralelas incluyendo el sistema de fallas transformadas Imperial-Cerro Prieto; ii) un sistema de fallas oblicuas a la tendencia Imperial-Cerro Prieto involucrando, al menos, fallamiento normal.

Los resultados de estudios previos hechos en la provincia del Salton Sea y en el Golfo de California (Hill *et al.*, 1975), (Lomnitz *et al.*, 1970), (Reichle, 1976), (Thatcher y Brune, 1971), indican que las fuerzas tectónicas regionales inducidas por el movimiento relativo de la placa del Pacífico (N-O) con respecto a la placa americana producen fuerzas tectónicas tensionales en el graben de Cerro Prieto, ocasionando dispersión cortical con el consecuente adelgazamiento de la corteza. Dispersión local de la corteza es requerido por la geometría de la estríación local (off set) del sistema de fallas Imperial-Cerro Prieto. Estudios propios, en conjunto con estudios geológicos (I. Puente), indican que en el interior del graben de Cerro Prieto la corteza se rompe en una serie de bloques delimitados por planos orientados paralelamente al sistema Imperial-Cerro Prieto (como se observa en los puntos A y E de la Fig. 1) y por un conjunto oblicuo de fracturas con componente de fallamiento normal, indicando tensión en una dirección NO-SE, como lo indica la distribución de la sismicidad en el graben y los mecanismos focales compuestos (puntos B y C). Cuando este sistema de fracturamiento se observa a la luz del modelo de Hill (1977), se sugiere que los enjambres ocurren como resultado de la inyección de fluidos magmáticos. La existencia de estas zonas de fracturamiento complejo en la corteza podrían también explicar el alto flujo térmico observado en el valle de Mexicali, puesto que las fracturas producen zonas de alta permeabilidad a través de las cuales la salmuera caliente puede fluir.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue financiado en conjunto por la Coordinadora Ejecutiva de Cerro Prieto (CFE) y el Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE), a través del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE). La información del primer periodo fue obtenida con fondos de la NSF y NASA. Durante este periodo los trabajos de campo fueron realizados por Alejandro Nava y Steve Day.

Se agradece especialmente al Ing. Héctor Alonso (CFE), Ing. Guillermo Fernández de la Garza (IIE), y al Dr. Pablo Mulás (IIE) por el apoyo y estímulo brindados para este estudio.

Se han logrado grandes beneficios con las discusiones sobre la geología y geofísica de Cerro Prieto del Ing. Héctor Alonso, Ing. Antonio Razo y el Ing. Puente.

Especiales agradecimientos al Dr. Saúl Alvarez Borrego, Director General, al Lic. Marco A. Esponda, Director Administrativo, a la Lic. Aída G. Esponda, Contralor General y al personal administrativo del CICESE por su continuo apoyo a la realización de este proyecto. Además a Yolanda Inowe por su paciencia y habilidad en la escritura del manuscrito, y a Vicente Navarro por su habilidad en el dibujo de las figuras.

BIBLIOGRAFIA

- Albores, A., A. Reyes, J. Brune, J. González, L. Garcilazo y J. Suárez, "Seismicity studies in the region of the Cerro Prieto geothermal field", *Geothermics*, 8, 1980.
- Biehler, S., R. Kovach y C. R. Allen, "Geophysical framework of northern end of Gulf of California structural province", *Symp. on Marine Geology of the Gulf of California*, Tulsa, 1964, vol. 3, pp. 114-156.
- Billing, M. P., *Structural Geology*, 3a. ed., Englewood Cliffs, Prentice Hall, Inc., 1972, pp. 350-363.
- Chinnery, M. A., "The stress changes that accompany strike-slip faulting", *Bull. Seism. Soc. Am.*, vol. 53, 1963, pp. 921-932.
- Chinnery, M. A., "Secondary faulting-I. Theoretical aspects", *Can. J. Earth Sci.*, vol. 3, 1966a, pp. 163-174.
- Chinnery, M. A., "Secondary faulting-II. Geological aspects", *Can. J. Earth Sci.*, vol. 3, 1966b, pp. 175-190.
- Fisher, R. L. y A. Rusnak, "Structural history and evolution of Gulf of California", *Symp. on Marine Geology of the Gulf of California*, Tulsa, vol. 3, 1964, pp. 144-156.
- Hill, D. P., P. Mowinckel y L. G. Peake, "Earthquakes, active faults, and geothermal areas in the Imperial Valley", *Science*, vol. 188, California, 1975, pp. 1306.
- Hill, D. P., "A Model for Earthquake Swarms", *J. Geophys. Res.*, vol. 82, 1977, pp. 1347-1352.
- Hill, D. P., "Earthquake swarms and local crustal spreading along major strike-slip faults in California", *Pageoph*, vol. 117, 1978, pp. 52-64. (Birkhauser Verlag, Basel.)
- Kovach, R. L., C. R. Allen y F. Press, "Geophysical investigation in the Colorado delta region", *Jour. Geophys. Res.*, vol. 67, 1962, pp. 2845-2871.
- Langer, C. J. y G. A. Bollinger, "Secondary faulting near the terminus of a strike-slip fault: Aftershocks of the 1976 Guatemala Earthquake", *Bull. Seism. Soc. Am.*, vol. 69, 1979, pp. 427-444.
- Lawver, A. L. y J. G. Sclater, "Heat flow measurements in the southern portion of the Gulf of California", *Earth and Planetary Science Letter* 12, North-Holland Publishing Company, 1973, pp. 198-208.
- Lomnitz, C., F. Mooser, C. R. Allen, J. N. Brune y W. Thatcher, "Sismicidad y tectónica del Golfo de California: Resultados preliminares", *Geofísica Internacional*, vol. 10 (2), 1970, pp. 37-48.
- Majer, E. L. y T. V. McEvelly, "Seismological investigations at the Geysers Geothermal Field", *Geophysics*, vol. 44, num. 2, 1979, p. 246.
- Puente, I. C., "Geología del campo geotérmico de Cerro Prieto", en este volumen, 1980.
- Razo, A., y H. L. Fonseca, "Prospección gravimétrica y magnetométrica en el valle de Mexicali, Baja California", *Informe Técnico 5-78*, Comisión Federal de Electricidad, Gerencia Regional de Estudios de Ingeniería Preliminar. Subgerencia de Ingeniería Básica brigada de estudios del Eje Neovolcánico.

Reichle, M. S., G. Sharman y J. N. Brune, "Sonobuoy and teleseismic study of Gulf of California transform fault earthquake sequences", *Bull. Seism. Soc. Am.*, vol. 66, 1976, p. 1623.

Reyes, A. y J. González, *Seismicity studies of the Ejido Victoria Swarm*, en preparación.

Reyes, A., "Estudio de microsismicidad del sistema de fallas transformadas Imperial-Cerro Prieto", *Informe Técnico GEO79-01*.

Thatcher, W. y J. N. Brune, "Seismicity study on an oceanic ridge earthquake swarm in the Gulf of California", *Geophys. J. R. astr. Soc.*, vol. 22, 1976, p. 1623.

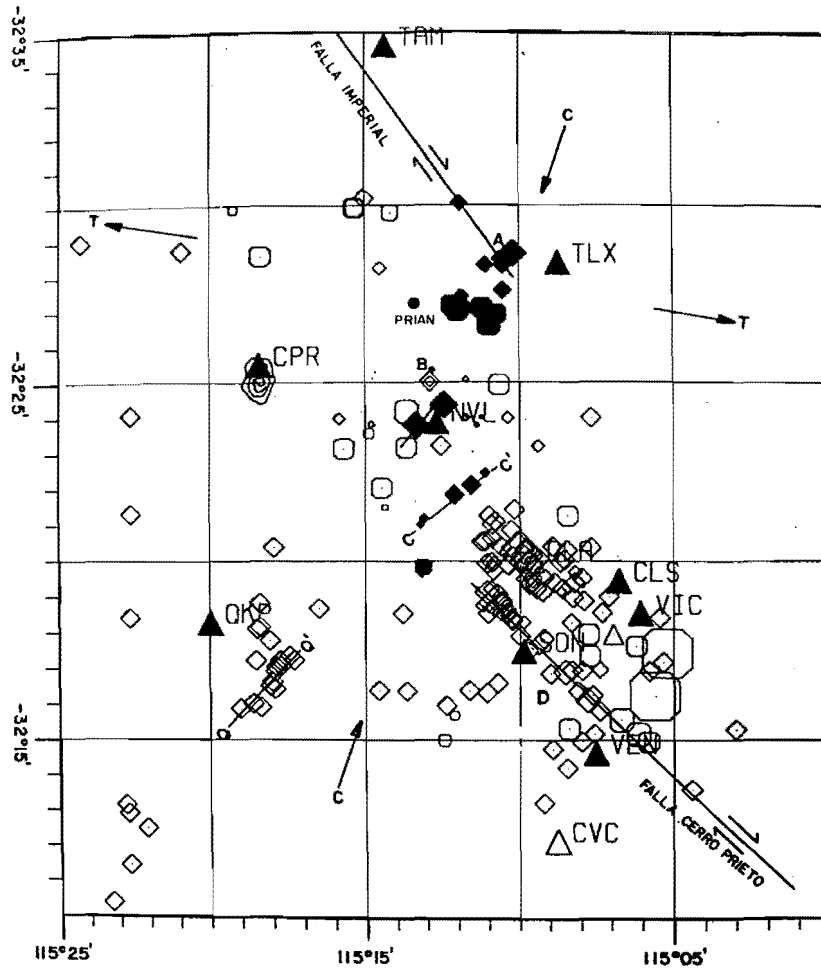


Figura 1. Sismicidad Cerro Prieto (1977-78)

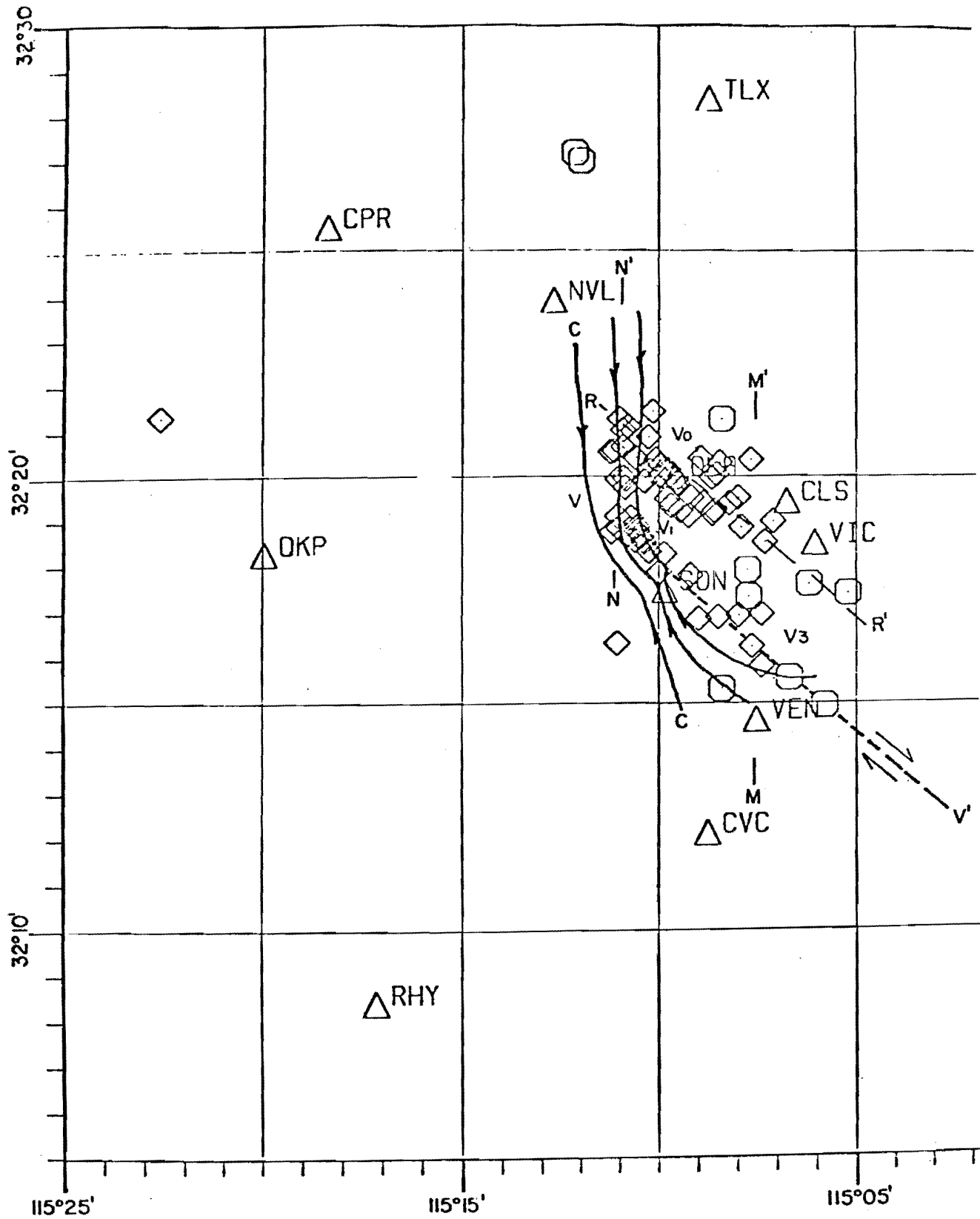


Figura 2.

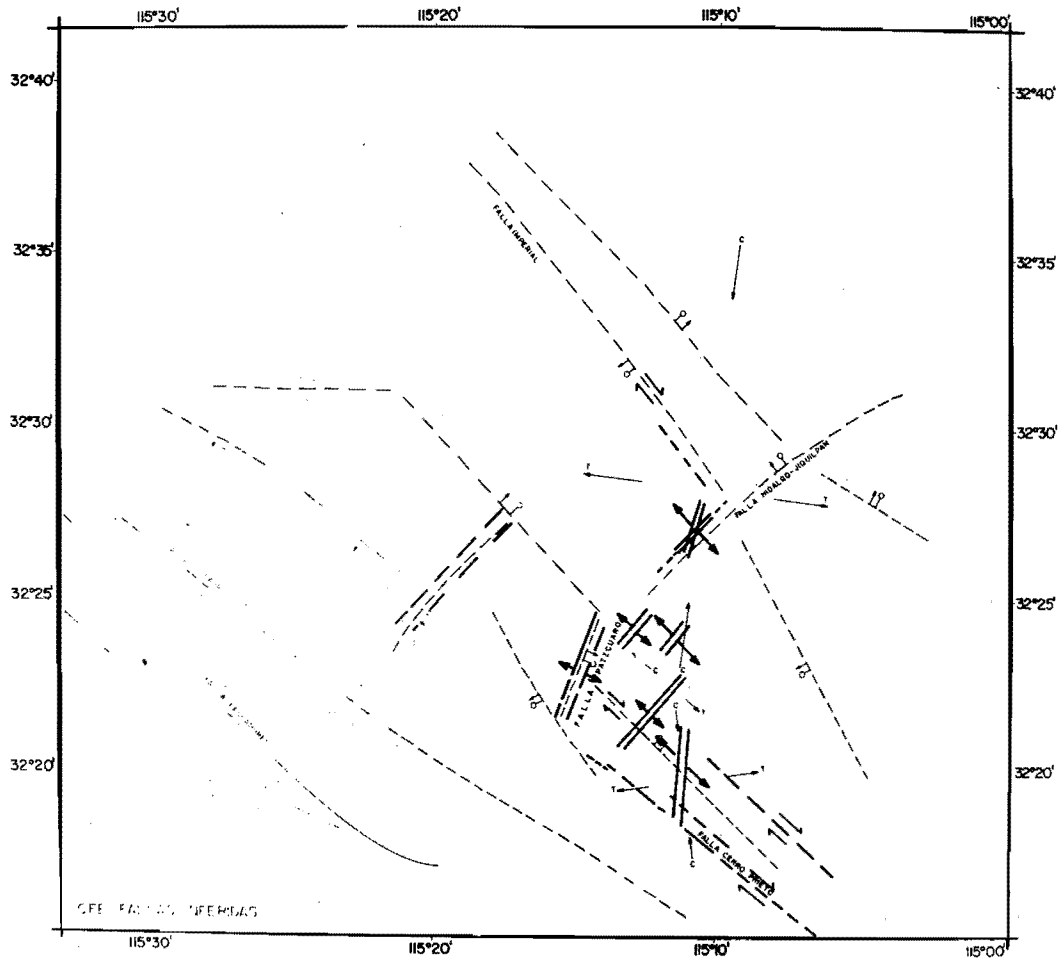


Figura 3. Fallas inferidas.

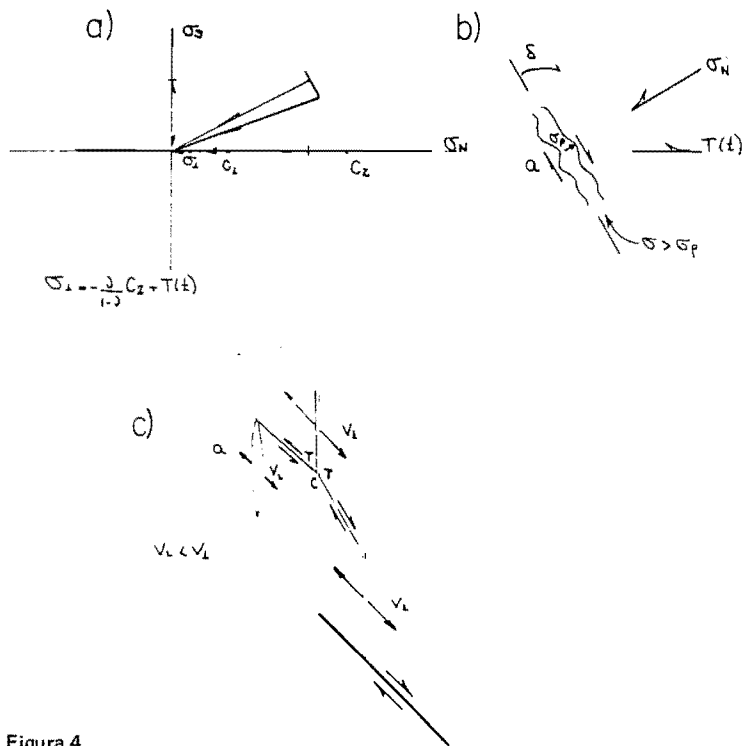


Figura 4.

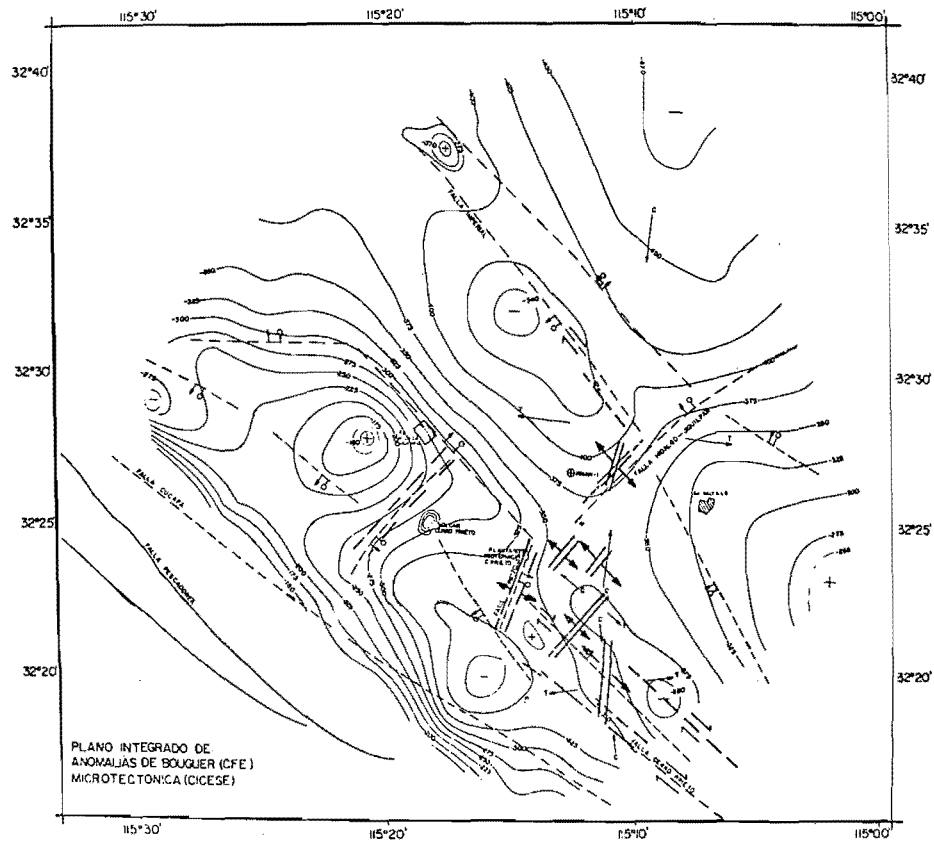


Figura 5. Plano integrado de: anomalías de Bouguer (CFE), microtectónica (CICESE).

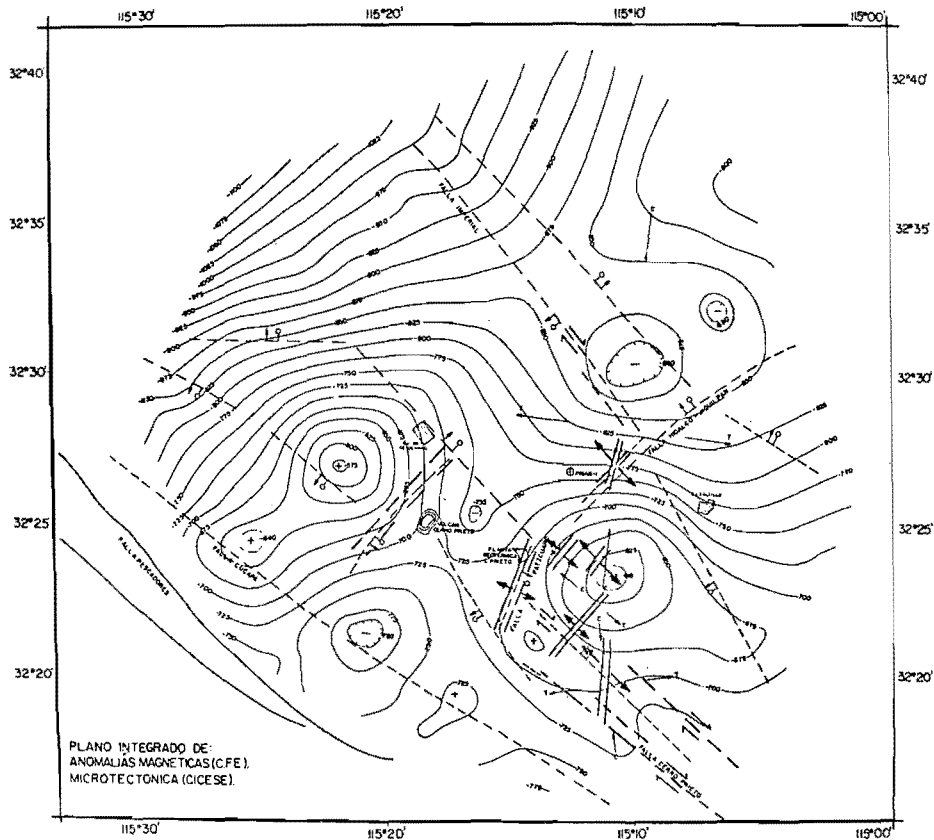


Figura 6. Plano integrado de: anomalías magnéticas (CFE), microtectónica (CICESE).

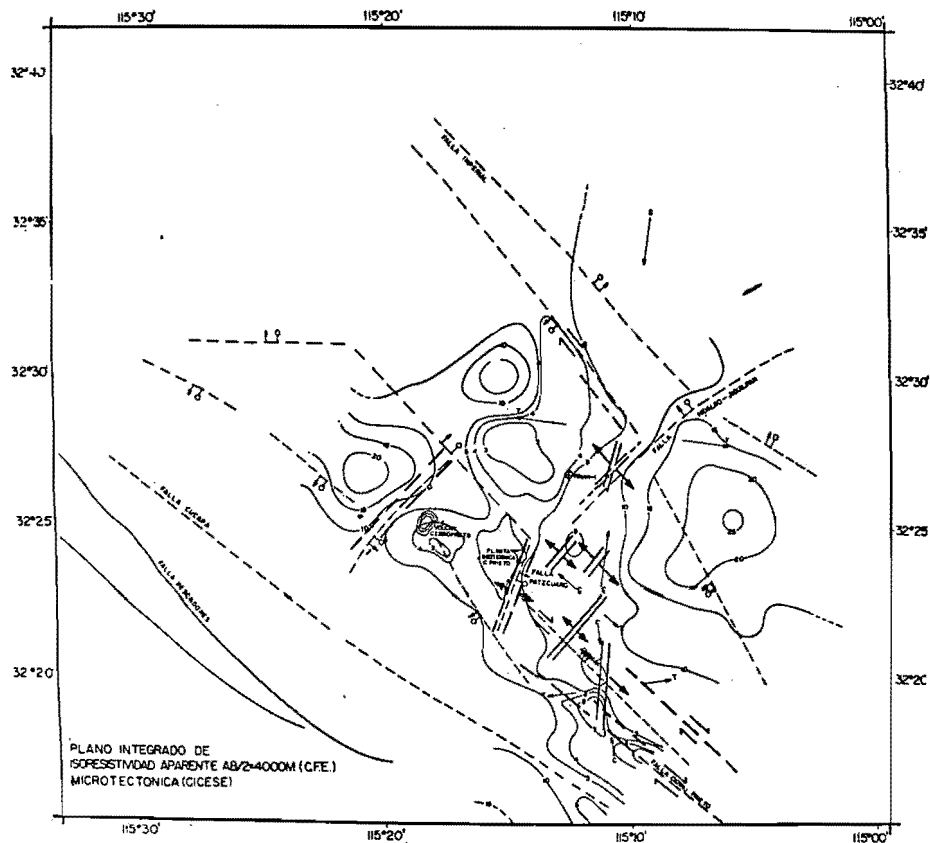


Figura 7. Plano integrado de: isoresistividad aparente $AB/2 = 4000$ (CFE), microtectónica (CICESE).

MICROTECTONIC AND POTENTIAL FIELD ANOMALY STUDIES AT THE CERRO PRIETO GEOTHERMAL FIELD

ABSTRACT

Seismicity studies in the Cerro Prieto geothermal field have yielded a unique set of data which exhibits a strong correlation between the fault system delineated by the epicenter distribution and associated focal mechanisms, and gravity, magnetic and resistivity anomalies. The data also indicates that the geothermal field is characterized by local tensional stresses which permit the flow of hydrothermal fluids from depth to the surface.

The existence of the region's fault system, interpreted on the basis of gravity anomalies, is further supported by the distribution of earthquake epicenters. In this way, the fault system shows that the faults have high permeability for hydrothermal flows.

The regional Bouguer anomalies point to the existence of two local tectonic troughs (grabens). One is

located southeast of the geothermal field near the Ejido Victoria; the other is to the northeast of the field. The seismic data indicates that the first trough is located in a field of tensional stress. Although the information is incomplete, there are indications that the second trough is located in the same stress field.

The correlation with magnetic anomalies is not as clear as in the previous case. In the Ejido Victoria region, the relative maxima of the magnetic anomalies are also correlated with the tensional stress fields.

The overall picture of the resistivity anomalies follows the alignment of the regional stress fields, which indicates that the permeability induced by seismic faulting allows the flow of low resistivity geothermal fluids in the region located within the tectonic troughs.

INTRODUCTION

Seismic studies in seismically active geothermal fields have proven to be a useful exploration tool. It has been generally accepted that geothermal fields are located in tectonically active regions under a regime of tensional stresses. The commonly accepted geophysical model of a field requires the following: a deep heat source, or sufficiently large magma chamber to guarantee the operation of the geothermal plant for a time period that would insure its profitability. A zone with sufficient permeability for heat transport to near surface reservoirs by geothermal fluids. Along the length of the fault, earthquake induced fracturing provides the permeability needed to extract the geothermal fluids.

Passive seismic methods have also been used recently to obtain quantitative estimates of size and depth of low velocity anomalous regions possibly produced by changes in rock composition and/or regions with anomalously high temperature with a small fraction of partial melting. This last interpretation is the most accepted on the basis of local tectonism.

Recently, a large effort has been directed to the study of S and coda seismic wave attenuation. The main argument for this work is based on laboratory studies in which anomalous attenuation (low Q value) has been observed to be related to geometric dispersion produced by intense fracturing, and/or high temperature fluid saturation of rocks.

Due to, on one hand, the necessity for quantitative estimates of size, depth, location of heat source and reservoir, and, on the other hand, the fact that passive seismic methods are still in a state of development, it is important to test our models deduced from local seismicity with other geophysical studies such as: temperature gradients,

and resistivity, gravity, and magnetic anomalies. In the regional microearthquake study of the Cerro Prieto Geothermal Field, Reyes (1979), Albores *et al.* (1980) demonstrated that the geothermal field can be explained on the basis of the system of tectonic stresses induced by the Cerro Prieto-Imperial transform fault system. In the present study we found that there is a strong correlation between the microtectonic structure and the pattern of geophysical anomalies. For the present, we shall only make a qualitative joint interpretation of the various geophysical studies conducted at Cerro Prieto, since three-dimensional models of highly heterogeneous media are still in a state of early development.

Consequently, our interpretation rests solely on arguments based on our knowledge of prior studies, and on heuristic arguments. If we were to develop a geophysics-based model for the Cerro Prieto geothermal field, it could be argued that due to the complexity of the sedimentary cover laid by the Colorado River, the sediments must be fractured, either according to a random pattern, or following the observed regional fracture pattern (interpreted from seismicity studies) in the deep portions of the crust (5 to 10 km). In the first case it would be reasonable to expect the resistivity anomalies to follow an irregular pattern, suggesting that even if it were possible to determine deep and highly permeable zones for the circulation of geothermal fluids, the reservoirs would be randomly distributed near the surface, in which case sophisticated active seismic methods would be needed to locate such reservoirs.

In the second case, it is reasonable to expect that the pattern of resistive anomalies follow the regional trends of tensional tectonical stresses. The gravimetric and magnetic anomalies must be similar to the graben type anomalies observed at the basins at the Gulf of California — for example, the Guaymas and Farallon basins.

If we were to idealize the structure of the Imperial-Mexcali Valley, we would have to use a model similar to those of the Gulf of California basins to the south (Fisher and Rusnak, 1964), since it belongs to the same tectonic region. The heat flow studies of Lawyer (1973) show the role played by the sedimentary cover in a region of thick sediments. The sediments distribute the heat flow anomaly produced by deep hydrothermal circulation towards the walls of the graben, as observed at the Guaymas basin. In the opposite case, that of a thin sedimentary cover, as, for instance, in the Delfin and Salsipuedes basins, there is little effect on the heat flow anomaly and it displays the expected distribution, that is, with a maximum over the center of the graben. In this case, the heat flow anomaly has been interpreted by Lawyer (1973) as produced by the intrusion of a system of dikes rising from the mantle.

In the present study we found a strong correlation among the different geophysical observations, all of which may be used to predict the most probable location of geothermal reservoirs.

SUMMARY OF THE RESULTS OF PREVIOUS SEISMIC STUDIES

In the past, seismicity studies have been made using small portable arrays. The results have been reported in a previous article by Albores *et al.* (1980), and in a technical report GEO79-01 (CICESE, June, 1979). Following is a brief discussion of the results. Figure 1 shows a detailed map of seismic epicenters studied at various times between 1971 and 1978 (Table I). Figure 1 shows two main trends. The first follows a trend which parallels the strike-slip faults of the Brawley Imperial-Cerro Prieto fault region; the second is transverse to the strike-slip fault system, with movement predominantly perpendicular to it, in a N-NW direction. This fault pattern is expected in a region of shearing stresses caused by the relative motion of the Pacific and North American plates. The pattern of seismic faulting is summarized as follows:

TABLE 1. OBSERVATION PERIODS

May 1974	—	July 1975
January 1977	—	May 1978

1. At the southern end of the Imperial Fault, the seismic faulting is characterized by a movement in the direction of the strike with a trend of about N 40°W. Calculated focal depths vary between 6 and 13 km. The epicenter distribution located toward the middle of the graben, and intersecting the southern end of the fault, suggests that the epicenters are associated with normal faulting with an almost vertical displacement, and parallel to the direction of the greatest regional compressional stresses.

2. In the vicinity of Ejido Nuevo Leon, 2 km east of the geothermal plant, the faulting occurs along a normal fault, with an estimated strike of N 40°E. Calculated focal depths range from 6 to 11 km.

3. In the vicinity of Delta station, faulting occurs along a normal fault, striking predominantly N 40°E.

4. In the vicinity of Ejido Cucapa, the seismicity occurs along a N 40°E trend which connects the Pescadores Cucapa faults.

5. The seismic faulting on the Cerro Prieto fault in the vicinity of Ejido Victoria is characterized by motions in the direction of strike, with a trend of N 45°W. It is accompanied by normal faulting with a predominant NS trend, and multiple faulting paralleling the Cerro Prieto fault.

EXPLANATION OF THE SEISMIC FAULT PATTERN

The surface trace of the Imperial-Cerro Prieto faults immediately suggests a right lateral displacement in the active regional faulting of the Salton trough (defined to include the Imperial and Mexcali troughs). As a consequence of the fault's presence, there must be tensional stresses acting in the graben region encompassed by both faults, causing the crust to be subject to ductile thinning and intense fracturing. As one consequence of the continuous process of build-up and release of regional tectonic stresses (mainly shearing), secondary fracturing in the direction of maximum compression (predominantly NS) must be occurring and is characterized mainly by tensional fracturing (in the direction of greatest regional tensional stress), and along-strike fracturing oriented mainly in the direction of greatest regional shearing stresses (N 45°W).

The development of secondary tensional fractures oriented in the direction of maximum compressional stresses resulting from the stress release of strike-slip faults is a commonly observed fact. This direction occurs at an angle of 45° with respect to the strike of the trend of the Cerro Prieto and Imperial faults, which are aligned in the direction of greatest regional shearing stresses. This type of fractures has been widely documented in structural geology treatises (see Billings, 1972, for example).

Recently, the details of secondary faulting induced by seismic faulting have received a great deal of attention, as in the case of observations of the aftershocks of the Guatemala earthquake (February 4, 1976, Langer and Bollinger, 1979). There, it was clearly observed that some aftershocks were oriented in the expected direction for induced faulting. Chinneri (1963 I, II) using elastic dislocation theory, calculated the stress changes caused by the creation of a vertical rectangular dislocation (rectangular strike-slip fault) with uniform displacement in a half space. The direction of maximum compressional stresses induced by the presence of rectangular dislocation or seismic faulting (see Figure 2) can be superposed over any initial stress distribution and thus be used to determine the possible locations of secondary fracturing resulting directly from the movement along the strike of the master fault. In a larger scale, there is an accumulation of evidence supporting the fact that swarms of magma dikes are oriented in the direction of largest compressional stresses. The opening of these fractures occurs in the direction of largest tensional stresses.

Based on the above, we can argue that the trends which are oblique to the Cerro Prieto fault (lines N-N' and M-M', Figure 2) correspond to seismic faulting associated with tensional faulting aligned in the direction of largest local compressional stresses.

Figure 2 shows an interpretation of the seismic faulting during the Victoria swarm, using Chinneri's (1966 I, II) results, and scaling the dimension of the aftershock zone. It can be seen that the line of greatest compressional stresses, located on the NW end of line V-V', coincides with the trends of line N-N' and support the hypothesis of normal tensional faulting in this direction. In the intermediate regions, the interpretation is ambiguous, but does not contradict the basic results.

Figure 3 illustrates an interpretation of the regional seismic fault pattern. It is derived partly from results of the seismic swarm of Estación Victoria; from focal mechanisms; from seismicity patterns; from the results of gravity and magnetic anomalies by Razo (1978); from results based on drilling samples by I. Puente; and based on our intuition and our knowledge of studies carried out in the Gulf of California and other regions with similar tectonic characteristics.

INTERPRETATION

Based on the overall results of this study, and in particular to the study of the Victoria swarm (Reyes, Gonzales, 1980), it is possible to present an argument for the mechanism of seismic faulting in the Salton trough. It is commonly observed that seismic swarms frequently occur in volcanically active zones. The mechanism which appears to be most convincing is that of a reduction of the normal stresses which seal the fracture zone by means of an increase in pore pressure due to the injection of fluids at a depth of the same order as the deepest focal depths. It is not suggested that the fluid pressure be high, since we have argued that the direction of greatest tensional stresses is perpendicular to the hinged faults. The seismic sequence of the swarm can occur simply when the pore pressure increases enough to overcome the normal stresses across the fracture zone. Conversely, the continuous tectonic process caused by the relative movement of the American-Pacific plates creates a gradual increase in the shearing stresses along the Imperial-Cerro Prieto fault system which in turn causes a gradual increase in regional tensional stresses with a resulting reduction in the normal stresses. This causes a reduction in the effective pore pressure, and as a consequence, the migration of fluids from high pressure regions (greater depth) to low pressure zones. The net effect of this process is a mechanical disequilibrium of the fault system which causes the migration of low viscosity fluids to regions of volume dispersion, causing a reduction in the friction which holds together the strike-aligned fracture zones, and with the resulting release of tectonic stresses by seismic fracturing. This process is shown schematically in Figure 4. The focal mechanisms of Albores *et al.* (1980), Figures 7, 8 and 9, indicate that even though the direction of the fault plane is well defined (perpendicular to the Cerro Prieto

and Imperial faults), it does not coincide with the azimuth of the largest regional compressional stresses. Nonetheless, the direction of seismic slippage (V_1) is almost parallel to this direction, indicating that the local spreading of the crust occurs in the direction of greatest tensional stresses.

In light of the above model, Hill (1977, 1978) has proposed a model for seismic swarms. In this model, the local spreading of the crust occurs in the direction of largest tensional stresses (Figure 4) by means of the injection of magma via dikes whose largest dimension is aligned with the direction of greatest compressional stresses. The swarm sequences are due to shearing failures along conjugate strike faults and/or due to the collapse of normal faults. This local spreading of the crust is distributed throughout the spreading volume due to the arrangement of right-lateral faults which connect the dikes or normal faults.

Figure 3 presents the arrangement of the tectonic pattern deduced from the above results and discussions. As can be noted; the tectonic pattern is highly complex. Nevertheless, it is possible to reveal some uniquely important features:

The regional tectonic stresses induce seismic failure on preexisting faults or faults contemporary to the initiation of tectonic activity in the Salton Sea province (4 million years ago). Locally, the direction of largest stresses may be different from that of regional stresses due to the heterogeneity of the composition of the crust. For example, in the tectonic system under examination, to preserve the right-lateral movement along the strike of the Cerro Prieto fault, the spreading velocity along the line N-N' must be greater than along line C-C', causing a rotation of the local spreading center C-C'. If we continue this argument, we immediately note that the spreading velocity must be greater along the highlighted local centers (Figure 3, double solid lines), and decrease laterally to preserve the consistency with the direction of greatest regional stresses. If this were not so, left-lateral strike-slip faulting would appear to be in opposition to the regional trends. Consequently, dikes and normal faulting will result, depending on such factors as: local variations of crustal spreading velocity; and viscosity and volume of magma in the mantle or lower crust available to become part of the spreading volume. In the first case, if the local spreading velocity is sufficiently high, basaltic magma of low viscosity originating in the deep portions of the crust must migrate to the shallower portions of the crust, and consequently melt the silica dominated upper crust, causing the evolution of local spreading centers to occur near centers of silicic volcanism, as in the case of the composition of the Cerro Prieto volcano. When the local spreading velocity is

small, normal and/or strike-slip faulting will be the predominant mechanism.

In light of the above arguments, we have observed that earthquake swarms, silicic volcanism, and geothermal activity are predominantly associated with zones which are locally dominated by tensional tectonic stresses, as shown in Figure 3. In particular, we have demonstrated that this observation is valid in the neighborhood of the Cerro Prieto geothermal field, and in the region of the Victoria swarm (Points CG and EV respectively).

In conclusion, it is possible to establish that in the central portion of the Cerro Prieto-Imperial graben, the crustal spreading velocity is greater than that which occurs laterally, causing the existence of tension zones shown in Figure 3, axis (T). In particular, it is interesting to observe that two such zones coincide with the zone of producing wells and high heat flow of the Cerro Prieto geothermal field.

CONCLUSIONS

The results of the analysis of Bouger anomalies, of magnetic and resistivity anomalies published by Razo (1978) and the results of the Puentes (1978) study of the Cerro Prieto geothermal field, jointly with the results presented in this study and summarized in Figure 3, show a high correlation which is discussed in the following paragraphs.

1. In the most northern portion of the Cerro Prieto depression, the western flank of the Imperial horst coincides with the trace of the Imperial fault. The focal mechanism deduced from the seismic events indicates that the present movement of the fault is of right-lateral strike-slip type. The scarcity of seismic activity does not offer enough information about the active fault trace. Nonetheless, the focal mechanism, the distribution of events, and the estimated focal depth argue in favor of Razo's (1978) interpretation about the existence of the Imperial horst and his estimated depth of basement.

2. The focal mechanism of the events with an oblique trend relative to the Imperial fault indicates seismic faulting along a normal fault with an almost vertical displacement toward the NW. The distribution of epicenters does not show a well defined trend, suggesting that faulting in this region is associated with a complex system of normal faults whose regional trends are clearly discernible in the map of regional anomalies (see Figure 5), and which shows a regional gradient whose maximum and minimum are found 10 km SE and 17 km NW of Ejido Saltillo respectively. The direction of the inflection curve of the gravimetric contours has a NE-SW trend. Nevertheless, the determination of the trace of the strike of this fault system is marginal,

due to the absence of gravity measurements between lines 1 and 2 of Razo and Fonseca.

3. In the region between the geothermal field and Ejido Nuevo Leon, the seismic fault system points to a system of normal faults with an almost vertical displacement of 30° towards the SE. For comparison, the Pátzcuaro fault, inferred by Razo, shows the same characteristics. Even though there is not enough data, that which we have suggests a right lateral strike-slip fault system connecting the system of normal faults, as illustrated in Figure 3. Majer *et al.* (1979), in their study of shallow seismicity in the region, have found evidence of strike-slip faulting.

4. Towards the southern end, the distribution of aftershocks of the Victoria swarm shows two parallel alignments, one of which coincides with the trace of the Cerro Prieto fault, and inferred from surface fracture observations (Kovach *et al.*, 1962, Figure 4, aligned along the FFCC railroad). It is difficult to decide which of the two traces represents the regional alignment of the Cerro Prieto fault. In contrast Razo's interpretation shows the trace to occur somewhere between both trends. From a detailed analysis of the shape of the Bouger map, one can see that the gravity low appears as a valley which is elongated towards the NW, with positive lateral gradients (NE). Razo concluded that the Bouger shape reflects the existence of both faults. A quantitative interpretation is, however, tenuous, given the data available.

Other trends deduced from the analysis of Bouger anomalies do not show any seismic activity which might corroborate the existence of those trends. This suggests that the current tectonic deformation is not significant along those trends.

The correlation with magnetic anomalies shown in Figure 6 is not as simple as in the preceding case. Nonetheless, some features of the anomaly highs are rather unique. The Cerro Prieto volcano is located over the NE flank of a 600 gamma magnetic high and 18 mgal gravity high found west of Ejido Michoacán. Contrasting with this, the volcanic manifestations of the Obsidian Buttes lie on a 15-20 mgal high. Biehler *et al.* (1964) argued that this gravity high is caused by volcanic rocks and possible also by a deep arrangement of highly metamorphosed rocks. In the case of Cerro Prieto, Razo indicated that the similarity between the gravity and magnetic anomalies is a direct reflection of a basement whose shape represents the NW end of the Cerro Prieto Horst, with an estimated depth of 1300 to 1900 meters. Toward the SE the Horst is estimated to be 2500 meters deep. This points to the presence of a normal fault, all of which argues in favor of Hill's model, discussed above.

In his study of resistivity anomalies (Figure 7), Razo found a high correlation between them and the large subsurface tectonic structures. In particular, it can be noted that low resistivity anomaly in the area of the producing geothermal field is closely related to the Cerro Prieto and Patzcuaro faults. Towards the SE, in the region of the Victoria swarm, we have observed that the trend and location of the resistivity lows coincides with the distribution of aftershocks. This indicates that the secondary porosity produced by seismic faulting provides the necessary permeability to permit the flow of low resistivity geothermal fluids. The distribution of epicenters whose trend connects the Cerro Prieto fault with the Imperial fault also shows good agreement with the low resistivity trends (4-5 ohms), as shown in Figure 7.

The above results show us that structural analysis based on the simultaneous analysis of simple Bouguer anomalies and the distribution of seismic faulting provides us with a very powerful tool for understanding the processes of tectonic deformation. In particular, we can observe that the Cerro Prieto trough, which is reflected in the alignment of the Bouguer gravity lows, is a product of the ductile thinning of the crust in response to tensional tectonic stresses induced by the geometry of the spurs of the active Imperial-Cerro Prieto faults.

Seismic faulting provides sufficient permeability for the circulation of geothermal fluids, as shown by the correlation between the resistivity anomalies and the epicenter distribution.

The seismicity pattern and the composite focal mechanisms occurring in the fault planes previously described suggest that the distribution of tectonic deformation (seismic slipping) in the Mexicali valley takes place mainly along two main tectonic trends: i) parallel faults, including the Imperial-Cerro Prieto system of transform faults; ii) a system of faults oblique to the Imperial-Cerro Prieto trend, involving at least normal faulting.

The results of prior studies in the Salton Sea province and in the Gulf of California by Hill *et al.* (1975), Lomnitz *et al.* (1970), Reichle (1976), and Thatcher and Brune (1971) indicate to us that the regional tectonic forces induced by the relative movements of the (North-western) Pacific plate with respect to the American plate produces tensional tectonic forces in the Cerro Prieto graben, causing crustal spreading with the resulting thinning of the crust. Local spreading of the crust is

required by the local off-set of the Imperial-Cerro Prieto fault system. Our data, together with geological studies (I. Puente) show that within the Cerro Prieto graben, the crust breaks down in a series of blocks bounded by planes whose orientation parallels the Imperial-Cerro Prieto system (as seen at points A and E in Figure 1), and by the set of oblique fractures with a normal faulting component. This points to a NW-SE directed tension, as shown by the seismicity distribution in the graben and the composite focal mechanisms (points B and C). When this fracture system is examined in light of Hill's (1977) model, it suggests that swarms occur as a result of the injection of magmatic fluids. The existence on the crust of these zones of complex fracturing can also explain the high heat flow observed in the Mexicali valley, since the fractures produce high permeability zones through which the brines can flow.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study was jointly financed by the Coordinadora Ejecutiva de Cerro Prieto (CFE) and the Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE), through the Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE). Data gathered during the first observation period was obtained with NSF and NASA funding. During this period, the field work was done by Alejandro Nava and Steve Day.

We would like to thank especially Ing. Hector Alonso (CFE), Ing. Guillermo Fernandez de la Garza (IIE), and Dr. Pablo Mulas (ITE) for the support and encouragement they provided to this study.

We have benefitted from discussions of the geology and geophysics of Cerro Prieto with Ing. Hector Alonso, Ing. Antonio Razo, and Ing. I. Puente.

We are especially thankful to Dr. Saul Alvares Borrego, Director General, Lic. Marco A. Esponda, Comptroller, and the administrative staff of CICESE for their constant support in the realization of this project. In addition, we thank Yolanda Inowe for her patience and ability in preparing this manuscript, and Vicente Navarro for his ability in drafting the figures.

FIGURE AND TABLE CAPTIONS

- Figure 1. Cerro Prieto Seismicity (1977-78).
- Figure 3. CFE Inferred Faults.
- Figure 5. Joint Map of Bouguer Anomalies (CFE) and Microtectonics (CICESE).
- Figure 6. Joint Map of Magnetic Anomalies (CFE) and Microtectonics (CICESE).
- Figure 7. Joint Map of $AB/2 = 4000$ ohm-meters Apparent Resistivity Surface, and Microtectonics (CICESE).
- Table 1. Observation Periods.