

MEASURED CRUSTAL DEFORMATION IN THE IMPERIAL VALLEY, CALIFORNIA

B. E. Lofgren

U. S. Geological Survey, Sacramento, California, USA

Summary

Precise geodetic surveys since 1972 indicate that significant vertical deformation of the land surface continues in Imperial Valley, California. Measured vertical changes as great as 3.5 cm per year indicate that two types of tectonic movement are occurring: (1) a downward regional tilt of the valley surface from the Mexican border northward toward Salton Sea, and (2) a deepening of the structural trough presently occupied by Salton Sea. A comparison of 1972-77 change contours with 1927 topographic contours shows gross parallelism, suggesting that the recent deformation is a continuation of the tectonism that formed the Salton trough. Ground movement since 1972 has tended to steepen slightly the gradients of streams, canals, and drains on the valley floor and to increase the capacity of Salton Sea. A usable record of eight years of background measurements of tectonic change are available prior to the impact of geothermal production in Imperial Valley.

Introduction

Imperial Valley is part of a deep, sediment-filled structural trough on the border between the continental block of western United States and the oceanic block of the eastern Pacific. Major and minor faults, largely masked by young alluvium¹ traverse the relatively flat valley surface. Currently, this is one of the most tectonically active areas of the country. Within the valley, at least four known geothermal resource areas (fig. 1) are being considered for electric-power generation. Present contracts schedule geothermal production in three scattered areas within 2 years.

One of the potential hazards of geothermal production in Imperial Valley is the threat of induced land subsidence and crustal deformation.² Survey networks of precise vertical and horizontal control have been monitored since 1972 to detect possible crustal deformation prior to geothermal production, and thereby establish background rates of tectonic movement prior to the impact of induced changes.³ This report consists essentially of three maps of measured vertical changes in the land surface based on 5 years of leveling control as part of the Imperial Valley geothermal subsidence detection program coordinated by Imperial County. All leveling in this interpretive study was by the National Geodetic Survey, Imperial County, The Imperial Irrigation District, and the U.S. Bureau of Reclamation. Funds for the leveling were provided by numerous private and government organizations.

Three epochs of leveling control are the basis for the maps in this report, (1) October

1971-February 1972, (2) November 1973-May 1974, and (3) November 1976-April 1977. All changes are based on a free adjustment of field survey data by the National Geodetic Survey. This entails the holding of only one bench mark in the network as an assumed-stable reference. In this study, bench mark Y58, 50 km southwest of El Centro, shows zero change; all other marks show their relative movement with respect to bench mark Y58. Free-adjustment elevations for all bench marks in the network for each of the three epochs of leveling were computed by the National Geodetic Survey; reference tabulations are in the files of the Geological Survey and the Imperial County surveyor's office.

Only vertical changes are considered in this report. No attempt is made here to report or interpret the small rates of horizontal ground movement being measured as part of this geothermal research investigation.

Measured Changes

Figure 1 shows the network of first-order and second-order leveling, geothermal areas (anomalies) and principal canals in Imperial Valley, and also the contours of relative change in land-surface elevation for the 2-year period 1972-74. Changes are with respect to bench mark Y58 and considerably outside of the structural trough southwest of El Centro. Although change contours are quite irregular, and numerous isolated closed-contoured areas appear, the general trend of change was a quite uniform down-to-the-north tilt of the land surface toward Salton Sea. The rate of change in elevation was about 3 cm per year in the 70 km between the Mexican border and the Sea.

Measured changes in land-surface elevation for the 3-year period 1974-77 are shown in figure 2. Change contours during this period reflect two distinct types of deformation, (1) a downward tilt toward the north of about 3 cm per year, and (2) an apparent deepening of the structural trough. Significantly, the shapes of the -2-cm and -4-cm change contours define a deforming trough extending considerably south of the Mexican border. It is also noteworthy that the control mark in bed-rock terrain in the southeast corner of the mapped area showed only 2 cm of change during this 3-year period.

Figure 3 shows the combined changes of figures 1 and 2 spanning the years from 1972 to 1977, and also the generalized 1927 topographic contours of the valley floor. This longer base of reference gives a more reliable picture of the complex and rapid tectonic deformation occurring at depth beneath the camouflaging, relatively flat, valley

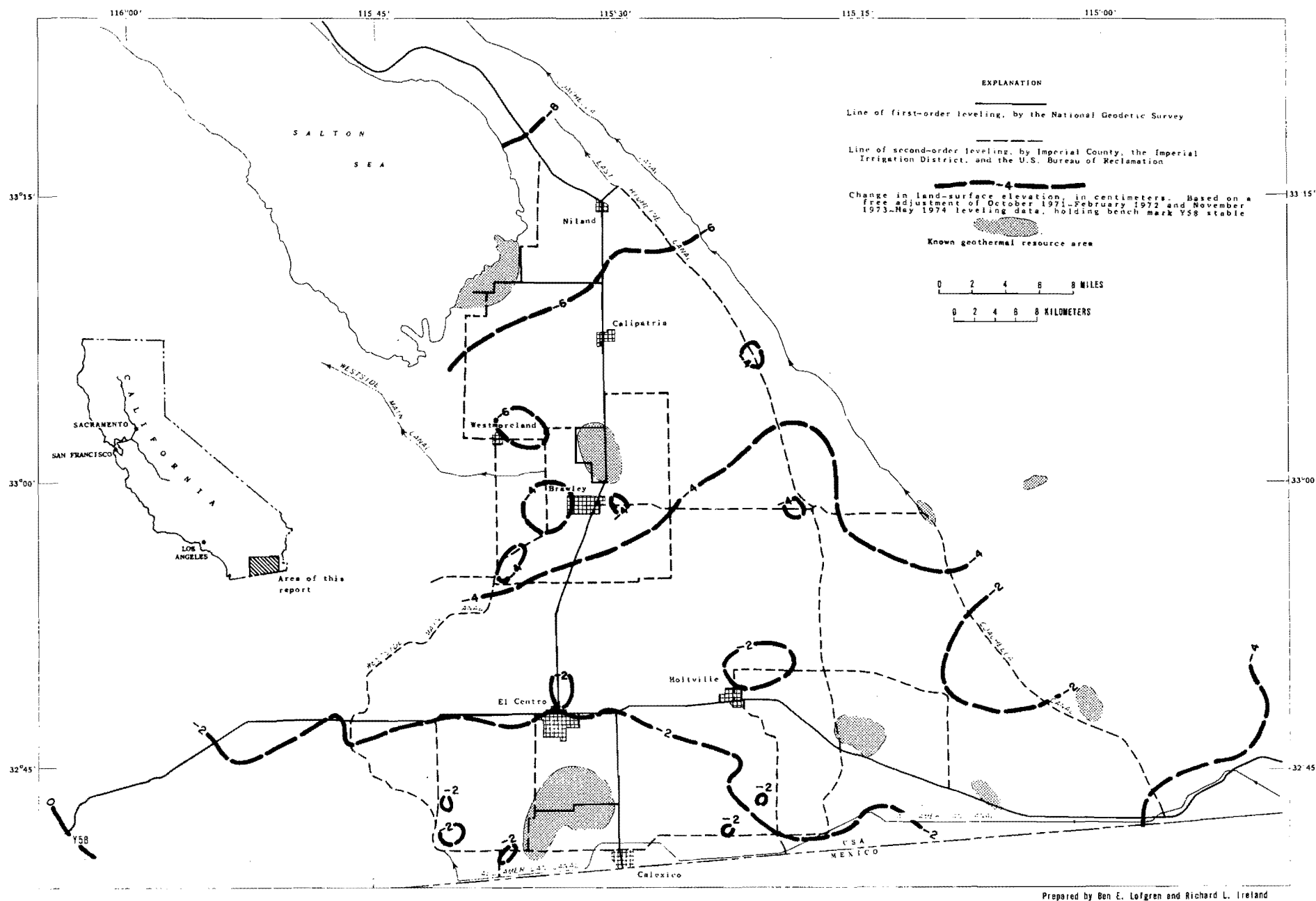


Figure 1. Measured change in land-surface elevation, 1972-74, Imperial Valley, California

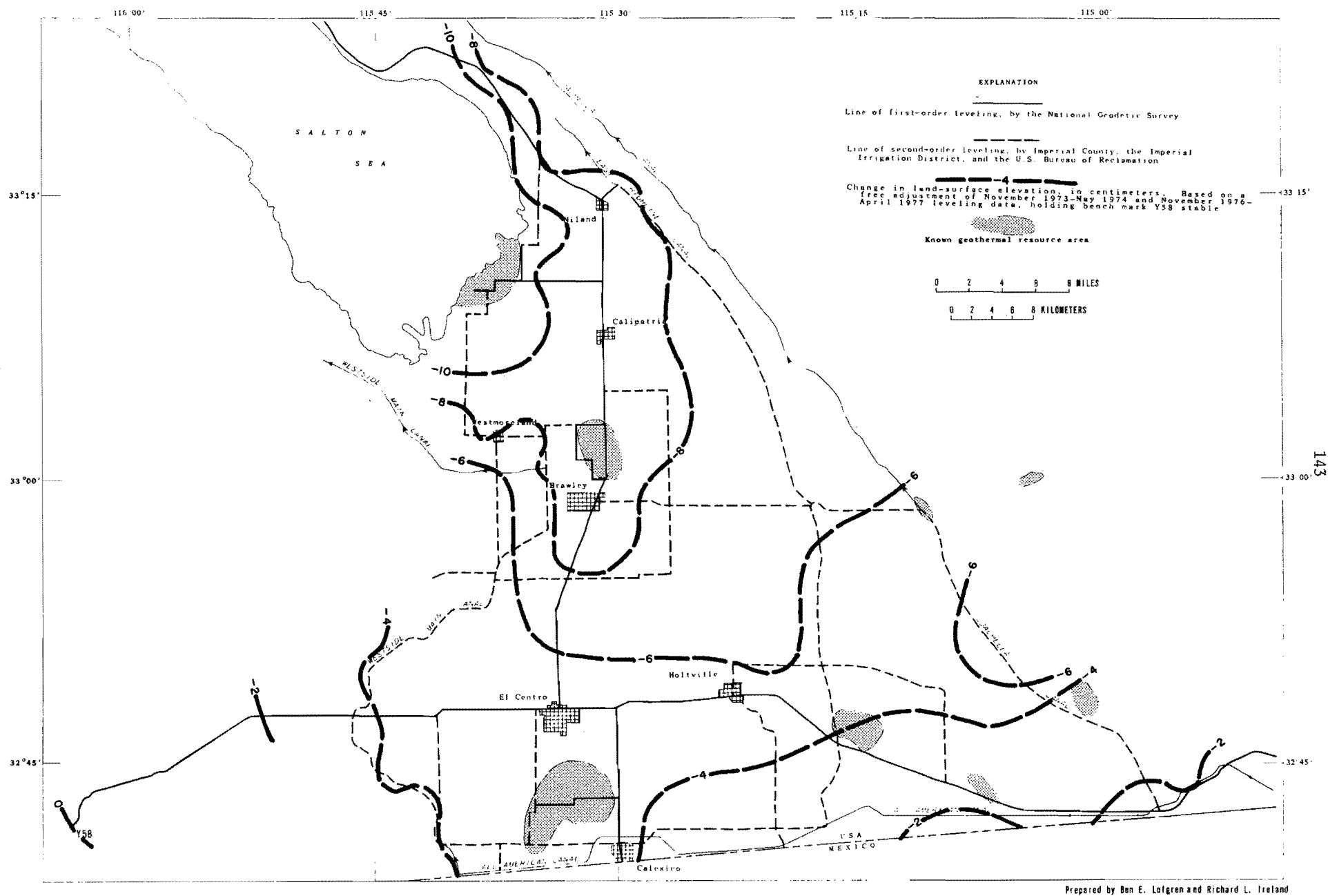


Figure 2. Measured change in land-surface elevation, 1974-77, Imperial Valley, California

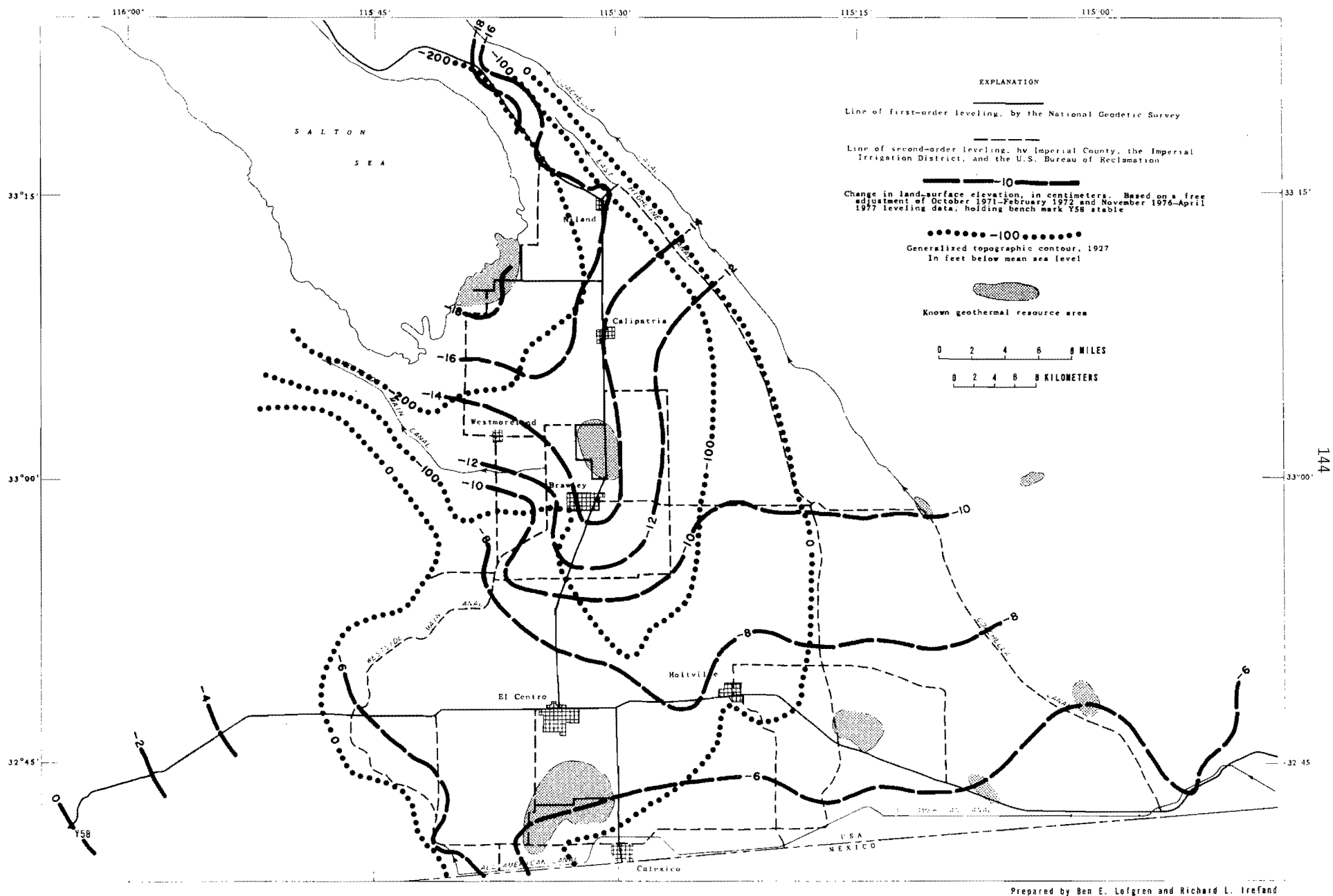


Figure 3. Measured change in land-surface elevation, 1972-77, Imperial Valley, California

floor. Change contours for this 5-year period clearly reflect the same patterns of vertical tectonic deformation, (1) the down-to-the-north tilt of about 3 cm per year from the Mexican border to Salton Sea, and (2) the marked deepening of the structural trough presently occupied by Salton Sea. Of particular interest is the close parallelism between the 1972-77 change contours, the 1927 topographic contours of the valley trough and the present shoreline of the Sea (fig. 3). One gets the strong impression that changes of the past 5 years are a continuation of the same tectonic processes that formed the Salton trough during past millennia. Even the northeast-trending transverse fault system south of Brawley that was so active during the January 1975 earthquake swarm⁴ is reflected in the change contours of 1972-77.

Conclusions

- (1) Significant tectonic deformation continues on the floor of the Imperial Valley structural trough. The configuration and rates of vertical changes are in apparent harmony with tectonic trends that have persisted through past millennia. Most of the deformation is apparently aseismic.
- (2) Measured ground movement from 1972 to 1977 indicates a relative deepening of the structural trough, with the cropland at the southern shoreline of the Sea sinking about 3.5 cm per year with respect to bench mark Y58 outside of the trough. This crustal deformation has tended, in general, to steepen the gradient of streams, canals, and drains, and to increase the storage of the Salton Sea. Not all of the inundation of croplands at the south end of the Sea is due to rising water in the Sea; some is due to the sinking of the land surface--at rates as great as 4 cm per year.
- (3) Because geothermal production and groundwater developments to date are minimal in Imperial Valley, all measured 1972-77 changes are attributed to tectonism.
- (4) The possible loading effect of water and sediment in the Salton trough since the turn of the century on observed sinking of the trough should be investigated. Reservoir loading frequently causes a down-warping of crust, due to the stresses imposed on the underlying basement. It is entirely possible that part of the tectonic change measured by the 1972-77 leveling is related to the loading of imported irrigation water and the filling of the Sea. There is no evidence of any other type of man-induced subsidence in the valley.
- (5) In order to differentiate natural tectonism from induced changes caused by geothermal developments, it is essential that the collection of geodetic data be continued as geothermal developments progress.

References

- ¹Dutcher, L. C., Hardt, W. F., and Moyle, W. R., Jr., 1972, Preliminary appraisal of ground water in storage with reference to geothermal resources in the Imperial Valley area, California: U.S. Geol. Survey Circ. 649, 57 p.
- ²Lofgren, B. E., 1973, monitoring ground movement in geothermal areas: Am. Soc. Civil Engineers Ann. Hydraulics Div. Specialty Conf., 21st, Bozeman, Mont., 1973, Proc., p. 437-447.
- ³—, 1974, Measuring ground movement in geothermal areas of Imperial Valley, California: Conf. on Research for the Development of Geothermal Energy Resources, Pasadena, Calif., 1974, Proc., p. 128-138.
- ⁴Johnson, Carl E., and Hadley, David M., 1976, Tectonic implications of the Brawley earthquake swarm, Imperial Valley, California: Seismol. Soc. America Bull., v. 66, no. 4, p. 1133-44.

DEFORMACION DE LA CORTEZA TERRESTRE MEDIDA EN EL VALLE IMPERIAL, CALIFORNIA

Resumen

Los levantamientos geodéticos de precisión llevados a cabo desde 1972, indican que la importante deformación vertical de la superficie terrestre continúa en el Valle Imperial, California. Los cambios verticales medidos, hasta de 3.5 cm por año, indican que están ocurriendo dos tipos de movimientos tectónicos: (1) un ladeo regional descendente de la superficie del valle,

desde la frontera con México hacia el Mar de Salton, y (2) una profundización de la depresión estructural actualmente ocupada por el Mar de Salton. Al comparar los cambios en las curvas de nivel entre 1972-1977 con las curvas de nivel de 1927 se observa en términos generales un paralelismo, lo que sugiere que la deformación reciente es una continuación del tectonismo que formó la Depresión de Salton. Desde 1972 el movimiento del terreno ha tendido a incrementar ligeramente

la pendiente de los ríos, canales, y drenes del valle y a aumentar la capacidad del Mar de Salton. Existen ocho años de registros con datos de base sobre cambios tectónicos anteriores al comienzo de la producción geotérmica en el Valle Imperial.

Introducción

El Valle Imperial es parte de una profunda depresión estructural, rellena con sedimentos, en el límite entre el bloque continental del oeste de los Estados Unidos y el bloque oceánico del Pacífico oriental. Fallas mayores y menores, en gran parte enmascaradas por el aluvio reciente, cruzan la superficie relativamente plana, del valle¹. Actualmente, ésta es una de las áreas tectónicamente más activas del país. En el valle se están considerando por lo menos cuatro áreas con recursos geotérmicos conocidos (Figura 1), para la generación de energía eléctrica. Dentro de un lapso de dos años los contratos actuales programan producción geotérmica en tres áreas.

En el Valle Imperial uno de los peligros potenciales de la producción geotérmica es la posibilidad de inducir asentamientos del terreno y deformaciones de la corteza². Desde 1972 se han medido las redes de levantamiento de precisión de control vertical y horizontal, para detectar posibles deformaciones de la corteza anteriores a la producción geotérmica, estableciendo así la intensidad de la deformación tectónica antes de sentir los efectos de los cambios inducidos³. Este informe consiste esencialmente de tres mapas que indican los cambios verticales medidos en la superficie del terreno, basados en cinco años de trabajos de nivelación parte del programa de detección de asentamientos debidos a actividades geotérmicas en el Valle Imperial, coordinado por el Condado Imperial. Toda la nivelación en este estudio interpretativo fue realizado por: el U.S. National Geodetic Survey, el Condado Imperial, el Imperial Irrigation District y el U.S. Bureau of Reclamation. Los fondos para la nivelación fueron proporcionados por numerosas organizaciones gubernamentales y privadas.

Tres períodos de control de nivelación constituyen la base para los mapas que se presentan en este informe, (1) octubre 1971-febrero 1972, (2) noviembre 1977-mayo 1974, y (3) noviembre 1976-abril 1977. Todos los cambios están basados en un ajuste libre de datos de campo recopilados por el National Geodetic Survey. Esto implica que se tiene sólo una mojonera en la red como referencia supuestamente estable. En este estudio, la mojonera Y58, 50 km al suroeste de El Centro, no indica cambios; todas las otras mojoneras muestran su movimiento relativo con respecto a la estación Y58. Para cada uno de los períodos de nivelación, el National Geodetic Survey calculó la elevación libre de ajustes de todas las estaciones de la red. Las tabulaciones de referencia están en los archivos del Geological Survey y en la oficina del topógrafo del Condado Imperial.

En este informe se consideran solamente los cambios verticales. No se presenta información ni interpretación alguna acerca de los pequeños movimientos horizontales del terreno que se están determinando como parte de este proyecto de estudios geotérmicos.

Cambios Medidos

La Figura 1 muestra la red de nivelación de primer y segundo orden, las áreas geotérmicas (anomalías) y canales principales en el Valle Imperial, así como para el bienio 1972-74 las curvas de iguales cambios relativos de elevación de la superficie del terreno. Los cambios indicados son relativos a la mojonera Y58 localizada al suroeste de El Centro a una distancia considerable de la depresión tectónica. Aunque las curvas de igual cambio son bastante irregulares, y aparecen numerosas áreas aisladas con curvas cerradas, la tendencia general del cambio de la superficie del terreno fue un ladeo descendente bastante uniforme hacia el Mar de Salton, al norte. En los 70 km entre la frontera con México y el Mar de Salton la tasa de cambio de elevación fue de aproximadamente 3 cm por año.

En la Figura 2 aparecen los cambios medidos de la elevación de la superficie del terreno para el período 1974-77. Las curvas en dicha figura reflejan dos tipos distintos de deformación, (1) un ladeo descendente hacia el norte de aproximadamente 3 cm por año, y (2) una aparente profundización de la depresión estructural. La forma de las curvas de -2 y -4 cm definen claramente una cubeta de deformación que se extiende considerablemente al sur de la frontera con México. También vale la pena hacer notar que la mojonera establecida en roca firme en el extremo sureste del área estudiada mostró durante este período de tres años solamente un cambio de 2 cm.

La Figura 3 combina los cambios indicados en las Figuras 1 y 2, abarcando el período 1972-1977, y muestra también los contornos topográficos del valle generalizados para el año 1927. Estos datos de referencia, por cubrir un período más largo, nos proporcionan un panorama más confiable de la compleja y rápida deformación tectónica que está ocurriendo en profundidad, debajo del piso relativamente plano del valle, que la enmascara. Las curvas de igual cambio para este período de cinco años reflejan claramente las mismas características de deformación tectónica vertical: (1) el ladeo descendente de aproximadamente 3 cm por año, desde la frontera con México al Mar de Salton, al norte y (2) la profundización marcada de la depresión estructural actualmente ocupada por el Mar de Salton. De especial interés es el estrecho paralelismo entre las curvas para el período 1972-1977, los contornos topográficos de la depresión del valle para el año 1927, y la actual línea de ribera del Mar de Salton (Figura 3). Se tiene la impresión de que los cambios de los últimos cinco años son una continuación de los mismos procesos tectónicos que formaron la Depresión de Salton durante los últimos milenios. Incluso el sistema de fallas transversales de rumbo noreste, al sur de Brawley que fue tan activo durante el enjambre de sismos de enero de 1975⁴, está reflejado en las curvas correspondientes al período 1972-1977.

Conclusiones

(1) Continúa una deformación tectónica significativa en la depresión estructural del Valle Imperial. La configuración y la velocidad de los cambios verticales aparentemente están en armonía con el tectonismo que ha persistido a través de los

pasados milenios. La mayor parte de la deformación es aparentemente asísmica.

(2) El movimiento del terreno medido durante el período 1972-1977 indica una profundización relativa de la depresión estructural, con los campos de cultivo junto a la ribera sur del Mar de Salton hundiéndose alrededor de 3.5 cm por año, en relación con la mojonera Y58 localizada fuera de la depresión. En general, esta deformación de la corteza ha tendido a hacer más marcado el gradiente de los ríos, canales, y drenes, y a aumentar la capacidad del Mar de Salton. No toda la inundación de las tierras de cultivo en el extremo sur del mar se debe al aumento de nivel de sus aguas, sino en parte se debe al hundimiento de la superficie del terreno - a un ritmo de hasta 4 cm por año.

(3) Dado que en la actualidad en el Valle Imperial la producción geotérmica y la extracción de aguas subterráneas son mínimas, todos los cambios medidos de 1972-1977 se atribuyen al tectonismo.

(4) Debe investigarse el posible efecto del peso del agua y de los sedimentos de la Depresión Salton sobre los hundimientos observados desde principios de siglo. El peso de represas frecuentemente causa alabeos hacia abajo de la corteza, debido a los esfuerzos impuestos al basamento

subyacente. Es posible que parte de los cambios de origen tectónico determinados por los estudios de nivelación del período 1972-1977 se relacionen con la sobrecarga debida al agua de riego importada y al llenado del Mar de Salton. No hay evidencia en el valle de ningún otro tipo de asentamiento inducido por la actividad del hombre.

(5) Para diferenciar entre el tectonismo natural y los cambios inducidos causados por el desarrollo de recursos geotérmicos, es esencial que se continúe la recolección de datos geodéticos conforme progresan dichos desarrollos.

Títulos de Figuras

Figura 1. Cambios de elevación de la superficie terrestre medidos durante el período 1972-1974. Valle Imperial, California.

Figura 2. Cambios de elevación de la superficie terrestre medidos durante el período 1974-1977. Valle Imperial, California.

Figura 3. Cambios de elevación de la superficie terrestre medidos durante el período 1972-1977. Valle Imperial, California.