

Adquisición de datos gravimétricos con Corrección Urbana en la Cuenca de México. Elaboración de carta de anomalía de Bouguer y su análisis cualitativo preliminar

Carlos Pita de la Paz¹, Francisco E. Huante Arana¹, Marco A. Rubio Ramos¹, Juan C. Colchado Casas¹ y Maricela Ortiz Ruiz¹

Abstract

The Metropolitan Area of Mexico City (MAMC), hosting more than 25 million inhabitants, is located on the south-western side of the Basin of Mexico, a sink (2,200 m.a.s.l.) bordered (confined) cardinally by the four volcanic mountain ranges (3,400, 3,800, 3,900 and 3,000 m.a.s.l.; Las Cruces, Nevada, Chichinautzin and Guadalupe, respectively). This tectonic sink (2,200 m.a.s.l.) is part of the central-eastern sector of the Trans-Mexican Volcanic Belt, whose effusive products cover the southern sector of the Mexican Highlands Plateau on the eastern border of the Guerrero Terrain. The urbanization in the MAMC is exposed to a series of geological risks, particularly those derived from seismicity and soil-structure interaction. Subsurface structural architecture of the basin determines the lateral and vertical distribution of the lithological fill units. This arrangement directly governs the mechanical behavior of the subsoil, influencing the soil-structure interaction of the buildings constructed on the surface units. From the seismic record is well documented that the main urban damage and spatial distribution risk occurred near the borders of several depocenters and/or closer to surficial inferred structural lineaments. To characterize the deep geology, a gravity survey was undertaken in the MAMC with 2,048 ground stations and three fixed base stations, with a data acquisition spacing between 1 and 3 km in most of the metropolitan area. In areas of greater interest and dense urban infrastructure, more detailed sampling was applied with separations of 100 to 200 m. To improve the reliability of gravity interpretation in Mexico City, an urban gravimetric correction was implemented, allowing for a reduction in the anomalous effects of the infrastructure on the acquired data. The results obtained allows the delineation of anomaly limits and deep structures totally or partially hidden under the sedimentary units. These results constitute a basis for the evaluation of geological risk and the planning of mitigation strategies in the region.

Key words: Urban Gravity Survey, Building Correction, Basin of Mexico, Bouguer Anomaly, Mexico City Metropolitan Area.

Resumen

La Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), con una población superior a los 25 millones de habitantes, se ubica en el sector suroccidental de la Cuenca de México (CM). Esta cuenca está bordeada (confinada) cardinalmente por cuatro sierras volcánicas (3,400, 3,800, 3,900 y 3,000 m.s.n.m.; Las Cruces, Nevada, Chichinautzin y Guadalupe, respectivamente). Esta depresión tectónica (2,200 m.s.n.m.) forma parte del sector centro-oriental de la Franja Volcánica Trans-Mexicana, cuyos productos efusivos cubren el sector meridional del Altiplano Mexicano en la frontera oriental del Terreno Guerrero. El desarrollo urbano en la ZMCM está expuesto a una serie de riesgos geológicos, particularmente los derivados de la sismicidad y la interacción suelo-estructura. La configuración estructural profunda de la cuenca determina la distribución lateral y vertical de las unidades litológicas de relleno. Esta disposición gobierna directamente el comportamiento mecánico del subsuelo, condicionando la interacción suelo-estructura de las edificaciones construidas sobre las unidades superficiales. En particular, los mayores daños urbanos y la mayor exposición al riesgo sísmico se correlacionan espacialmente con los bordes de los depocentros y su cercanía a lineamientos estructurales superficiales. Para caracterizar la geología profunda en la mayor parte de la ZMCM, desde los materiales de relleno de la CM hasta el zócalo calcáreo o metamórfico en que sobreyacen a 2 o 3 km de profundidad, se realizó un estudio gravimétrico en la cuenca que incluyó 2,048 estaciones terrestres y tres estaciones de base fijas, con un espaciamiento de adquisición de datos entre 1 y 3 km. En zonas de mayor interés y densa infraestructura urbana, se aplicó un muestreo más detallado con separaciones de 100 a 200 m. Para mejorar la confiabilidad de la interpretación gravimétrica en la Ciudad de México, se implementó una corrección gravimétrica urbana, permitiendo una reducción en los efectos anómalos de la infraestructura sobre los datos adquiridos. Los resultados obtenidos permitieron delinear límites de anomalías gravimétricas y estructuras profundas total o parcialmente ocultas bajo las unidades volcánicas y vulcanosedimentarias superficiales. Estos resultados constituyen una base fundamental para la evaluación del riesgo geológico y la planificación de estrategias de mitigación en la región.

Palabras clave: Gravimetría urbana, Corrección por edificios, Cuenca de México, Anomalía de Bouguer, Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

Received: February 11, 2025; Accepted: July 17, 2025; Published on-line: October 1, 2025.

Editorial responsibility: Dr. Joel Rosales-Rodríguez

* Corresponding author: Francisco Enrique Huante Arana, fhuate89@gmail.com

¹ Geotem Ingeniería. Ciudad de México, México

Pita de la Paz, Carlos; Huante Arana, Francisco E.; Rubio Ramos, Marco A.; Colchado Casas, Juan C.; Ortiz Ruiz, Maricela

<https://doi.org/10.22201/igeof.2954436xe.2025.64.4.1859>

1. Introducción

La Cuenca de México (CM) abarca una superficie aproximada de 9,223 km² con altura promedio de 2,240 m.s.n.m., y está ubicada en el sector emergido del Altiplano Meridional Mexicano (AMM). La CM consiste de una enorme y profunda depresión (Pérez-Cruz G., 1988; Campos *et al.*, 2015; González Torres *et al.*, 2015), tectónicamente segmentada. A escala regional, ocupa la parte centro oriental de la Subprovincia de Lagos y Volcanes de Anáhuac: los parteaguas son elevados complejos volcánicos con altura promedio de 3,600 m.s.n.m., y bordean totalmente los lagos interiores, no teniendo salida natural hacia el mar (Segers-trom, 1962). Las divisorias hídricas montañosas funcionan como importantes zonas de recarga natural, permitiendo la transferencia hídrica hacia los distintos depocentros de la CM. El flujo es a través de una intrincada red de drenaje (subparalelo en la zona poniente y subdendrítico al oriente), controlando espacialmente la distribución somera de los acuíferos locales. Los cinco lagos internos originales funcionaron adicionalmente como espacio para la acumulación de la descarga local, así como receptáculos de los voluminosos depósitos volcánicos y detríticos.

La Ciudad de México (CDMX) está asentada en el sector sur poniente de la CM y, hasta el 2021, alojaba una población de 9,209,944 personas con más de 2,756,319 viviendas particulares (INEGI, 2021). En este escenario urbano se desarrollan diferentes fenómenos que periódicamente incrementan los riesgos naturales y amenazas geológicas (UNISDR, 2009), por ejemplo: en las zonas de lagos se tienen inundaciones y asentamientos diferenciales del terreno o subsidencias (Solano *et al.*, 2017), en las zonas de transición o de piedemonte se tiene inestabilidad de laderas y procesos de remoción de masas (Carlos Valerio *et al.*, 2012; Novelo Casanova *et al.*, 2021) y en toda la cuenca se tiene exposición a incendios, sequías, contaminación atmosférica y eventos sísmicos, distantes o locales, con inusuales y contrastantes valores de aceleración del terreno y efectos de sitio (Figuroa, 1971; Chávez Pérez, 1993; Díaz-Rodríguez, 2006; CDMX, 2013; Esteva Maraboto, 2017).

Derivado del crecimiento urbano, en la región noroccidental del Estado de México, se modificaron radicalmente los lagos de Zumpango y Xaltocán, los cuales fueron progresivamente desecados; el Lago de Texcoco, en la región norte de la CM, fue intensamente urbanizado y parcialmente recuperado. Al sur de la CM, los lagos de Xochimilco y Chalco, dado su valor ambiental, funcionan como Área Natural Protegida; aunque el uso de suelo ha sido paulatinamente modificado. Estos antiguos cuerpos de agua lacustres consisten en subcuencas interiores con depocentros independientes e interconectadas a profundidad. En superficie están delimitadas por parteaguas locales y en el subsuelo por sistemas de fallas profundas (Campos *et al.*, 2015).

Entre la variedad de herramientas del conocimiento apli-

cado para coadyuvar en la resolución de problemas urbanos, resaltan las aportaciones tecnológicas definidas en el Atlas de Sustentabilidad Geofísica y enfocadas en lograr una ciudad sostenible y resiliente (Capello *et al.*, 2021). Estas herramientas pueden mejorar aspectos específicos del Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) N°11, particularmente en la reducción de la vulnerabilidad ante desastres naturales destinadas en lograr sociedades y ciudades *incluyentes, seguras, resilientes y sustentables* (Esteva Maraboto, 2017; ONU-HABITAT, 2021). Las técnicas geofísicas más implementadas son las magnéticas, gravimétricas, sísmicas, electromagnéticas y de resistividad eléctrica, cada una aportando valiosos resultados para conocer mejor la arquitectura geológica del subsuelo de la ciudad.

2. Antecedentes

Los antecedentes de exploración geofísica para conocer la estructura geológica de la CM fueron realizados en el año 1953 por el Ing. Guillermo Hernández Moedano, elaborando el primer Mapa de Anomalía de Bouguer por medio de mediciones gravimétricas, documento que ha sido un referente para múltiples investigaciones posteriores y dedicadas a modelar la estructura del basamento del relleno sedimentario de la CM. Derivado del sismo de 1985 que afectó gravemente la ciudad y con el apoyo de la Agencia de Cooperación Internacional del Gobierno de Japón (JICA, por sus siglas en inglés), se realizó en el año 1989 una campaña de exploración que comprendió un total de 556 mediciones gravimétricas (Santoyo, 1996). En la sección 5 (Discusión) se colocaron los mapas antes mencionados (Figura 10) y su comparación cualitativa con la campaña realizada en este trabajo (Figura 11).

Uno de los trabajos que ha aportado un conocimiento invaluable en la estructura del subsuelo en los primeros 400-500 m de profundidad de la CM, es el realizado en el año de 1986 por el grupo de exploración geofísica de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), el cual fue encomendado por el Comité de Reconstrucción del área metropolitana a consecuencia del sismo de 1985. El trabajo comprendió 365 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) con aberturas AB/2 de hasta 1,000 m y 39 tendidos sísmicos de refracción de 2 km de longitud. Los resultados de estas exploraciones fueron presentados en el año 1988 por los ingenieros Benhumea y Vázquez en un documento titulado "Estudios Geofísicos del Valle de México" (CFE, 1988).

Anteriormente, ya se han realizado trabajos dentro de la zona de cuenca mediante varias metodologías geofísicas, principalmente con datos gravimétricos. Algunos de estos trabajos han sido desarrollados para correlacionar la geofísica con la geología estructural a escala regional, tanto en la parte centro-oriental de la Franja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM) como de la CM,

realizando algunas mediciones, perfiles o modelos gravimétricos correlacionados con la geología inferida (Marsal y Mazari, 1969; Molina y Urrutia, 1993; Álvarez, 2017). Fueron realizados otros trabajos dentro de algunas subcuencas con fines más someros y enfocados a problemáticas locales mediante distintas metodologías sísmicas o gravimétricas (Campos *et al.*, 1997; Huizar *et al.*, 1997; Campos *et al.*, 2000; Campos y Sánchez, 2000; Campos *et al.*, 2003; Campos *et al.*, 2015; Álvarez, 2017; González *et al.*, 2020; Vergara y Aguirre, 2020; Campos *et al.*, 2024).

Estudios previos de investigación geofísica basados en técnicas sísmicas en la parte central de México han sido realizados por: Urrutia-Fucugauchi *et al.*, 1987; Pérez Cruz, 1988; Chávez Pérez, 1993, Campos *et al.*, 2000; Campos y Sánchez, 2000, entre otros. Estudios recientes basados en análisis gravimétrico han sido realizados principalmente por Campos *et al.* (2024). En distintas zonas urbanas de otras partes del mundo se han realizado previamente estudios gravimétricos (Dilalos *et al.*, 2018; Dilalos y Alexopoulos, 2020; Trogu *et al.*, 2012). En Atenas, Grecia, se implementó esta metodología para la determinación estructural de la cuenca profunda del subsuelo, y en Cagliari, en la Isla de Cerdeña, Italia, en la generación de una herramienta efectiva para la evaluación de riesgos y planeación urbana; en esta región se encuentran cavernas o zonas con rocas alteradas que conllevan a posibles futuros socavones o derrumbes.

Recientemente, Geotem Ingeniería en 2024 ejecutó una serie de mediciones gravimétricas terrestres distribuidas estratégicamente en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM): Campaña GTM2024. El objetivo de este trabajo es reforzar el conocimiento detallado de ciertos comportamientos geotécnicos en zonas de mínimos gravimétricos reportados en campañas anteriores, principalmente en las porciones sur y poniente de la cuenca, tales como asentamientos diferenciales, amplificación sísmica, flujos subterráneos o interacción suelo-estructura. Estas zonas evidencian paquetes de materiales de baja densidad, contrastando fuertemente con una estructura asociada a un máximo gravimétrico, desde la Sierra de Guadalupe en el sector norte, hasta el Cerro de la Estrella, en el sur-oriente de la ciudad.

3. Configuración Geotectónica de la región central de México

La implementación de la técnica gravimétrica fue enfocada en conocer a mayor detalle la distribución y estructura de la CM con intervalos de investigación profundos, de 1 a 2 km. El objetivo fue determinado por el contexto geológico regional donde está asentada la CDMX. La CM tiene una longitud de $\approx 100\text{-}110$ km y promedio de anchura ≈ 60 km, alojando en su totalidad a la urbe y, parcialmente, a diversos municipios del Estado de México e Hidalgo (Figuras 1 y 2).

En la zona central del territorio continental mexicano, el hipotético basamento calcáreo profundo es poco conocido debido a la gama e intensidad de procesos que ha sufrido posterior al Mesozoico (Aguayo y Marín, 1987; Urrutia-Fucugauchi *et al.*, 1987). El conocimiento sobre la evolución geológica en la región del AMM se fundamenta con mayor rigor científico a partir de la propuesta inicial de Campa y Coney (1983) sobre los Terrenos Tectonoestratigráficos. Los modelos actualizados de este sector del AMM se basan en información de afloramientos dispersos, los cuales reflejan la complejidad geodinámica de las secuencias marinas Cretácicas y magmáticas Cenozoicas que descansan sobre el basamento pre-Mesozoico, particularmente asociado a procesos previos de rotación y traslación cortical en la frontera oriental del Terreno Guerrero, el borde septentrional del Terreno Mixteco y el sector sur-poniente del Terreno Sierra Madre (Cabral Cano *et al.*, 1986; Moran-Zenteno, 1986; Urrutia-Fucugauchi *et al.*, 1987; Centeno-García y Silva Romo, 1997; Moran-Zenteno *et al.*, 2004). Modelos más recientes sobre la configuración del basamento del sector continental mexicano han sido redefinidos en 1993 por Sedlock *et al.* y, posteriormente, por Keppie en 2004 (Figura 1). La estructura de la región central del AMM presenta mayor complejidad debido a: 1) los procesos de exhumación y deformación del Cretácico tardío, y 2) el emplazamiento de la potente cobertura volcánica asociada al magmatismo heterogéneo de la FVTM durante el Eoceno-Mioceno temprano (Ferrari *et al.*, 2000). Las implicaciones respecto a los límites tectonoestratigráficos, que fungen como basamento de la CM y determinaron el comportamiento estructural de las unidades que lo cubren, son aún inciertas, dada la potente cobertura de litologías más recientes. Los materiales sobre los que se asienta la urbe representan la aportación de cinco sistemas magmáticos de escala regional y que cardinalmente delimitan la depresión (De Cserna, 1989; Arce *et al.*, 2017; Arce *et al.*, 2019).

Múltiples procesos geológicos a escala continental, desde finales del Cretácico hasta el Reciente generaron lineamientos corticales dentro y fuera de la depresión tectónica que constituye la CM (Segerstrom, 1962; Aguayo y Marín, 1987; De Cserna *et al.*, 1988; Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989; Sedlock *et al.*, 1993; Alaníz-Álvarez y Nieto-Samaniego, 2005; Gómez-Tuena *et al.*, 2005). La CM abarca desde la parte baja septentrional de la Sierra de Pachuca hasta el extremo meridional de la Sierra de Chichinautzin, donde, en ambos casos, afloran secuencias calcáreas marinas del Cretácico. La progresiva deformación y fallamiento del Mioceno-Cuaternario está plasmado en los más importantes sistemas de fallas regionales: a) Acambay-Pastores al NW, b) Tizayuca al NE, c) Ixtlahuaca-Otomí en el centro occidental, d) Tenango al SW y e) Xicomulco-Xochimilco/La Pera al S (Figura 2).

Zonas independientes de debilidad cortical permitieron el ascenso y abastecimiento diferenciado de los complejos volcá-

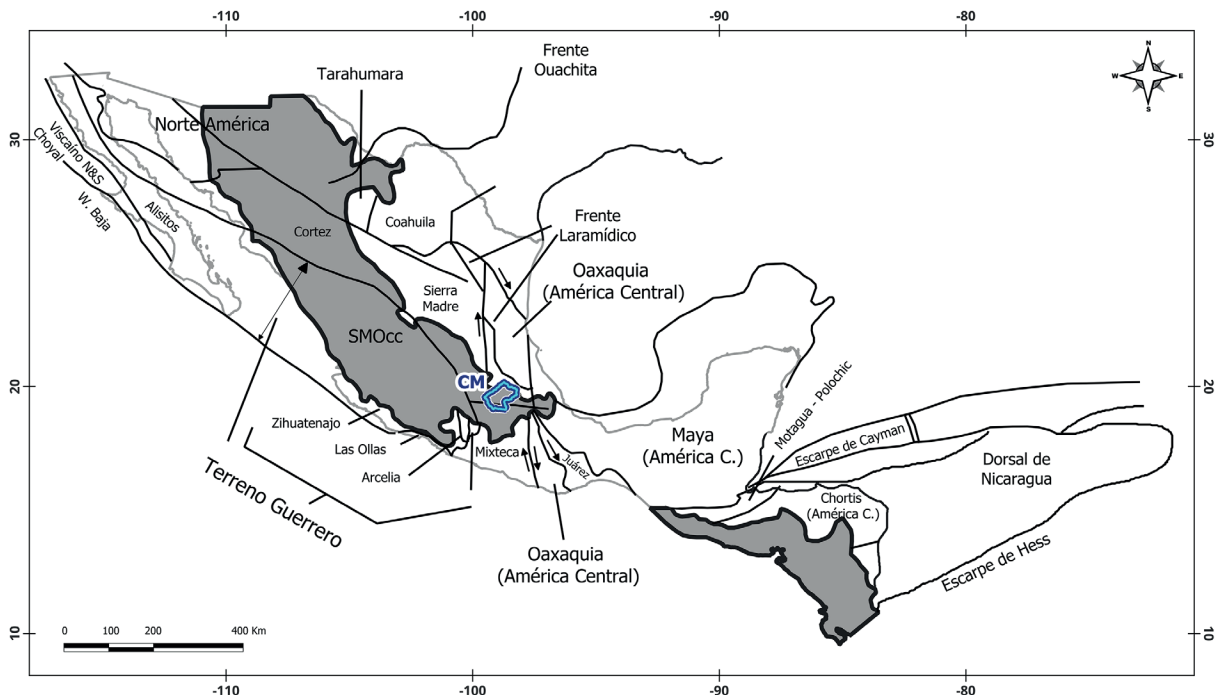


Figura 1. Distribución y límites de Terrenos Tectonoestratigráficos de la República Mexicana de acuerdo a Keppie (2004). El polígono azul corresponde a la CM.

nicos, separando las Cuencas de Toluca-Atlacomulco (CTA) al poniente, la CM en la zona central, la Cuenca de Puebla-Tlaxcala (CPT) al oriente y la Fosa de Cuernavaca en el sector sur. Las estructuras principales forman parte de una red de fallas extensionales profundas de intra-arco, parcialmente ocultas por las unidades que colmataron, desde el Oligoceno, los diferentes depocentros de la CM (Mooser, 1975; De Cserna *et al.*, 1988; Pérez-Cruz, 1998; Arce *et al.*, 2019).

El cierre natural definitivo de la antigua cuenca exorreica, con dirección de flujo hídrico hacia la Fosa de Cuernavaca, ocurrió con el emplazamiento de los productos volcánicos básicos e intermedios de la Sierra de Chichinautzin al final del Plioceno (Mooser, 1975). El contexto endorreico imperante desde el Neógeno hasta el Reciente involucró procesos y patrones de régimen hídrico muy diferenciados respecto a entornos de flujo exorreicos (Carlos Valerio *et al.*, 2012). El reiterado uso del término de *valle* para referirse al actual contexto endorreico de la CM y que opera desde el Cuaternario (Mooser, 1975; Bradbury, 1989) puede conllevar a inadecuadas interpretaciones petrofísicas e hidroestratigráficas, aspectos heredados de la evolución geológica y correspondientes ambientes de depósito, incluyendo: sistemas de interconductividad hidráulica, canalizaciones superficiales, distribución granulométrica, espesor de la sedimentación, destino de los productos de intemperismo, mecanismos de compactación y diagénesis, así como la respuesta del terreno ante eventos sísmicos.

Los productos efusivos del vulcanismo colmataron progresivamente estas depresiones interiores y constan de múltiples secuencias alternadas, predominantemente vulcanoclásticas y lacustres, poco o no consolidadas y con frecuencia discordantes o traslapadas entre sí. La profundidad, distribución, espesor y composición de estas litologías generan contrastantes patrones de respuesta ante eventos sísmicos (Chavacán Ávila, 2007).

La complejidad de la secuencia de colmatación está documentada en los pozos profundos exploratorios Copilco, Mixhuca, Roma, Texcoco, Tulyehualco-1 y San Lorenzo Tezonco. El intervalo más superficial consta de potentes secuencias volcánicas, vulcanoclásticas y lacustres del Cenozoico que sobreyacen al zócalo profundo de la provincia volcánica. El modelo geológico de la CM propuesto por Pérez-Cruz (1988), basado en información de pozos y sísmica de reflexión, divide en cuatro unidades las litologías de relleno: Unidad de Arcillas Lacustres, Unidad Volcánica Superior e Inferior y calizas basales. Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera (1989) separan los productos del vulcanismo asociados a la culminación oriental de la Sierra Madre Occidental respecto a los del Arco Volcánico Transamericano y que es controlado por fallamiento normal Cuaternario. Arce *et al.* (2019) documentaron la complejidad estratigráfica de relleno de la CM a partir del registro de pozos profundos, resaltando la variación en las edades del vulcanismo marginal que cubre los materiales conglomeráticos del Grupo Balsas que descansan discordantemente sobre las calizas de

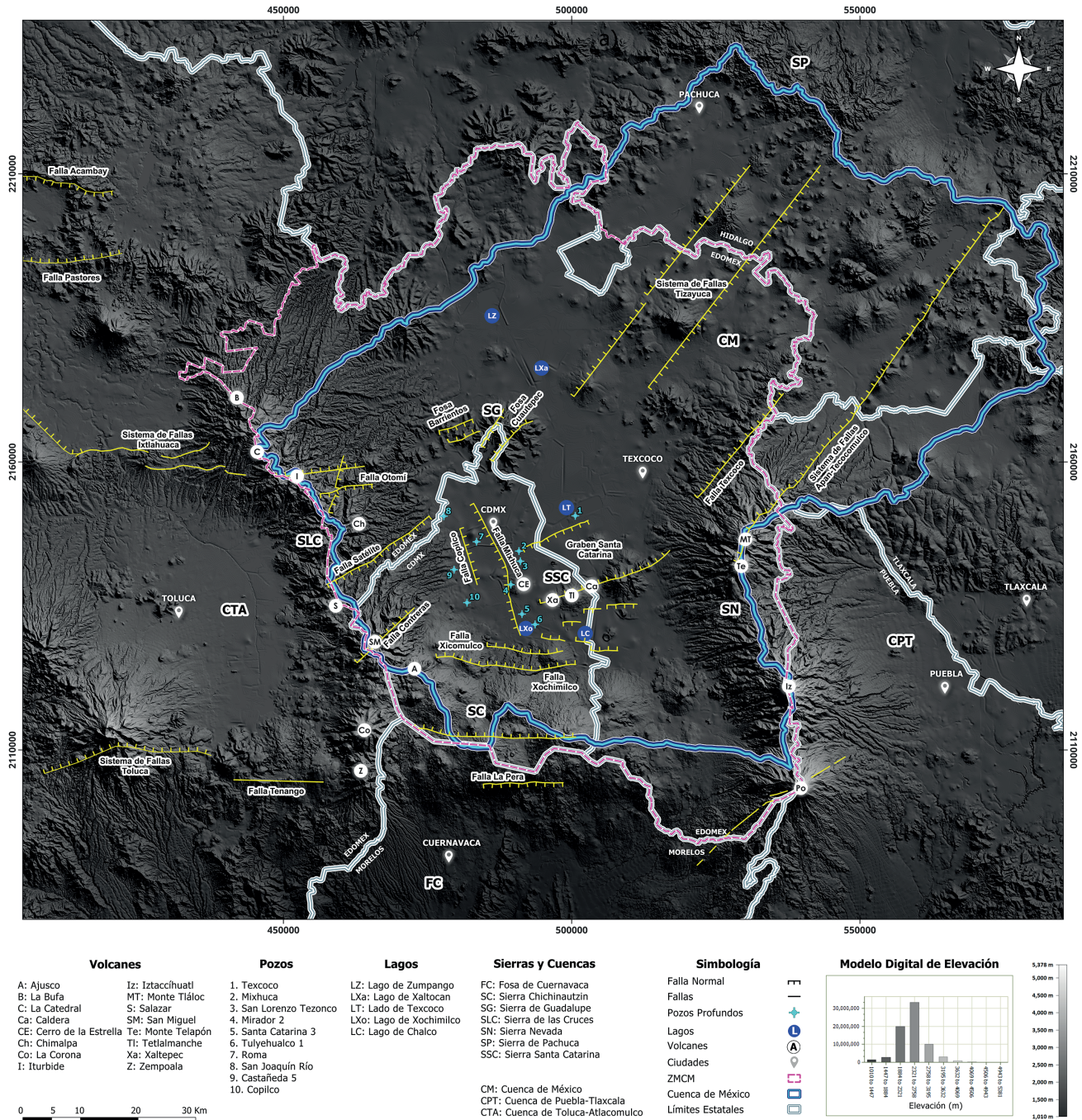


Figura 2. Principales estructuras en la región central del AMM.

las formaciones Mexcala y Morelos. González Torres *et al.* (2015) sugirieron la subsidencia regional de la CM y el acomodo diferencial de distintas unidades volcánicas de la FVTM. Estos autores documentaron la compleja variación de espesores derivada de sistemas regionales de fallamiento, a partir del análisis del registro litológico de pozos profundos, mostrando la complejidad e intercalación de unidades volcánicas por encima de las rocas calcáreas del Cretácico.

4. Metodología

El escenario urbano está frecuentemente expuesto a actividad sísmica de subducción o intraplaca, incrementando la vulnerabilidad de 25 millones de personas que habitan la ZMCM. Para una adecuada evaluación del riesgo sísmico, es necesaria la implementación de técnicas y métodos geofísicos que complementen las características morfoestructurales

someras y descifren la disposición profunda de la CM. Entre los métodos más útiles se encuentran los estudios gravimétricos. La distribución espacial de los daños derivados de los eventos sísmicos de 1985, 2017 y 2022 mostraron la influencia de fallamientos regionales adyacentes y estructuras internas que delimitan las diferentes subcuencas de la CM. En los casos de los sismos de: 1957 (San Marcos, Guerrero. $M = 7.8$, Prof. 33 km); 1985 (La Mira, Michoacán. $M = 8.1$, Prof. 15 km); 2017 (Chiautla de Tapia, Puebla. $M = 7.1$, Prof. 51 km), y 2022 (Coalcomán, Michoacán. $M = 7.7$, Prof. 12 km), el área de mayor afectación en la infraestructura urbana en la CDMX ocurrió en la parte central de la CM, denominada Zona de Lagos.

El estudio geofísico abarcó completamente el territorio de la CDMX, gran parte del Estado de México y áreas colindantes de los estados de Morelos, Tlaxcala e Hidalgo. La realización de las mediciones gravimétricas representó un gran reto debido al continuo y caótico tránsito automotriz, la cobertura de infraestructura urbana y la sobrepoblación que está asentada en la ZMCM. A estos datos se les aplicaron las correcciones y reducciones gravimétricas necesarias, como: reducción de la gravedad teórica normal, corrección por aire libre y marea, reducción de Bouguer con correcciones de terreno y urbana. También se calculó una anomalía residual de segundo grado para lograr una mejor interpretación de los resultados. El flujo de procesamiento de los datos gravimétricos se muestra en el siguiente diagrama (Figura 3):

4.1 Adquisición de datos y bases gravimétricas

El levantamiento geofísico de la Campaña GTM2024 consistió de 2,048 mediciones gravimétricas estratégicamente ubicadas dentro de la CM y zonas aledañas, las cuales se realizaron desde diciembre de 2023 hasta septiembre de 2024. Para la adquisición de la información fueron utilizados los gravímetros CG-5 y CG-6 SCINTREX®, con resoluciones de 0.001 y 0.0001 mgal, respectivamente. El área de estudio abarcó una superficie aproximada de 173.5×146.5 km, correspondiente a un área total de 2,541,775 ha. Tomando en cuenta las características urbanas, se colocaron tres bases gravimétricas estratégicamente distribuidas en la zona de estudio. Cada una de las bases fue ligada a la Red Geodésica Gravimétrica del INEGI con marco geodésico IGSN71.

Considerando la compleja movilidad urbana en el área se planificaron líneas de estaciones gravimétricas sobre las principales vías de acceso de la ciudad, con espaciamientos de 1, 2 y 3 km para zonas externas a la CDMX. En zonas de mayor interés exploratorio el espaciamiento fue menor, de 100 y 200 m al centro y poniente de la CDMX. Para obtener la ubicación de cada una de las estaciones gravimétricas fueron utilizados Sistemas de Posicionamiento Global Diferencial (DGPS, por sus siglas en inglés). Los equipos están compuestos por dos antenas receptoras *Atlas o GRX* de la marca *Topcon®*. El método de adquisición fue en modo estático para garantizar mayor resolución en las coordenadas. La precisión alcanzada fue en escala centimétrica en el Sistema Geodésico Mundial WGS84.

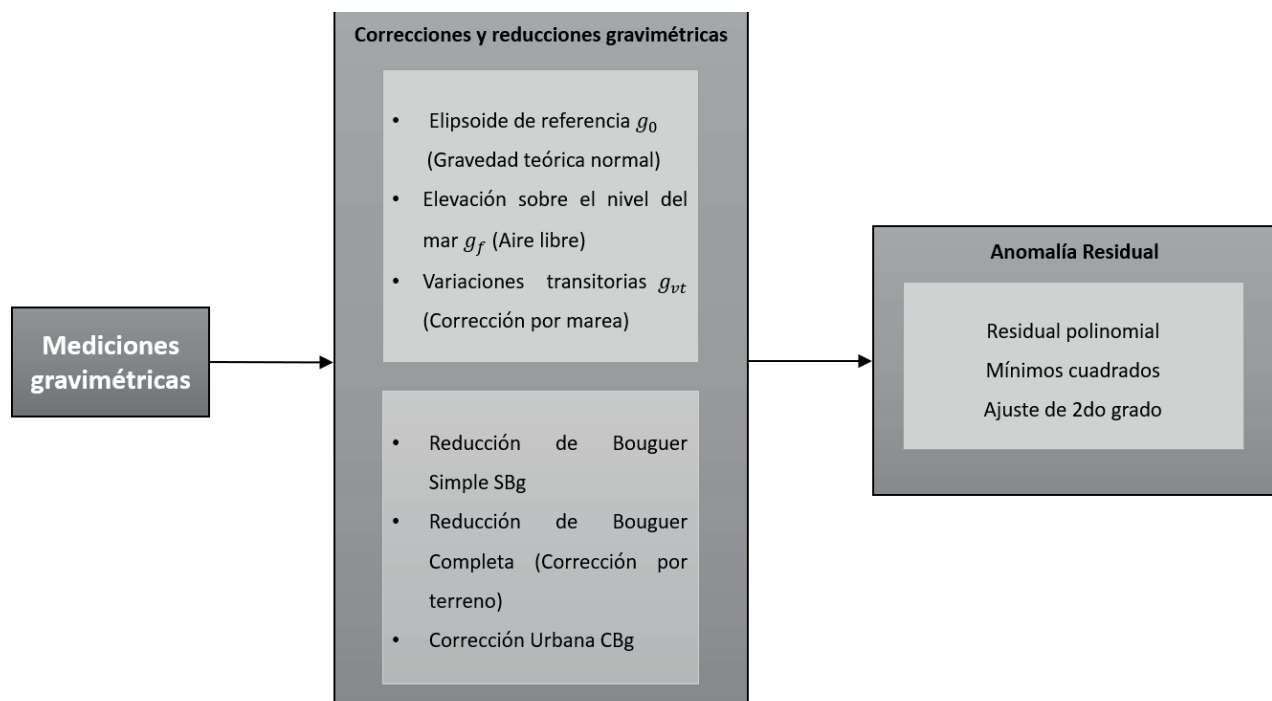


Figura 3. Diagrama de la metodología de procesamiento para los datos gravimétricos en la CM.

4.2 Procesamiento de datos y reducción gravimétrica

Las correcciones de las mediciones gravimétricas fueron realizadas con el software *Oasis Montaj*®, cuyo módulo *Gravity* ejecuta las correcciones de manera semiautomática. El software permite escoger cuatro distintos Elipsoides de Referencia: 1930, 1967, 1980 y 1984. El que fue utilizado en el proceso de este proyecto fue el Sistema Geodésico Mundial de 1984 para la reducción con la gravedad teórica:

$$g_0 = 9.7803267714 \left(\frac{1 + 0.00193185138639 \operatorname{sen}^2 \lambda}{\sqrt{1 - 0.00669437999013 \operatorname{sen}^2 \lambda}} \right) [m/s^2]$$

donde λ es la latitud de la estación gravimétrica (Hinze et al., 2005). La corrección por aire libre se realizó con las alturas registradas mediante el DGPS para cada estación

$$g_{fa} = -0.308596 H_s$$

donde H_s es la altura de la estación respecto al Elipsoide de Referencia (Blakely, 1996). La reducción simple de Bouguer consiste en calcular un estrato equivalente, horizontalmente infinito, con densidad homogénea y espesor constante, que va desde la elevación de cada estación hasta el nivel medio del mar. La atracción gravitacional de este estrato equivalente es añadida a la anomalía por aire libre.

Aunque no siempre correcto en todas las zonas, comúnmente se utiliza para la corrección por terreno el valor de densidad de 2.67 g/cm^3 , el cual corresponde a la densidad media de la Corteza Terrestre. En el caso de estudio de la CM y para tener una adecuada reducción de Bouguer, se consideró su contexto geológico y cuya densidad cortical predominante, en general, debe ser menor debido a la potente cobertura de rocas volcánicas, vulcano-sedimentarias y depósitos lacustres que colmataron paulatinamente el interior de la depresión. Para seleccionar la densidad adecuada se toma en cuenta la ausencia de correlación entre la anomalía de Bouguer y el relieve topográfico, siempre y cuando se reduzca el efecto del equilibrio isostático (Fukao et al., 1981).

Esta reducción del efecto isostático se obtuvo mediante el uso de anomalías residuales (Caratori et al., 2007), aplicando un filtro *Butterworth* pasa-altas (longitud de onda de 65 km). El análisis comparativo consideró múltiples correcciones de Bouguer aplicando densidades entre 2.2 y 2.67 g/cm^3 . La evaluación mediante gráficas de dispersión (*Cross-Plots*: anomalía vs. topografía) mostró que la densidad óptima para esta región fue de 2.4 g/cm^3 (Figura 4).

Para la densidad de 2.4 g/cm^3 se obtuvo un error cuadrático medio de 0.00768 con una pendiente de 0.00149 , cercana a cero. De esta forma, la corrección de terreno se realizó con el software *Oasis Montaj*® utilizando mapas del Modelo Digital de Elevaciones (DEM, por sus siglas en inglés) del INEGI con un radio de distancia de 15 km, asumiendo una densidad constante para la corrección de Bouguer de 2.4 g/cm^3 . Finalmente, de forma secuencial se realizó la corrección urbana (la cual se explicará posteriormente) para obtener la reducción gravimétrica de la CM, referida como Anomalía Completa de Bouguer (Figura 5).

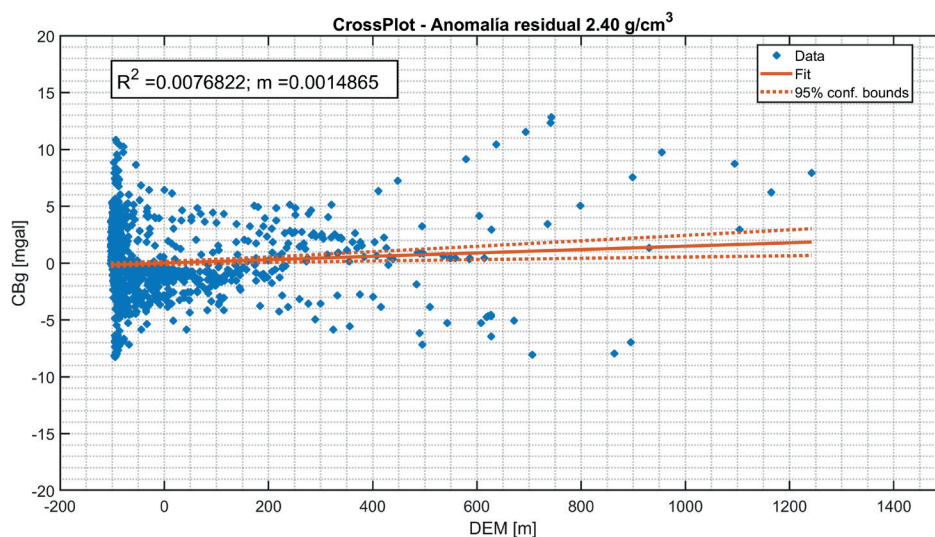


Figura 4. Gráfica de dispersión de la Anomalía Residual de Bouguer y el relieve topográfico con densidad de 2.4 g/cm^3 de la Campaña GTM2024. Las cruces azules indican los datos, la línea roja indica la línea de tendencia calculada mediante mínimos cuadrados y las líneas rojas punteadas indican el intervalo de confianza del 95%.

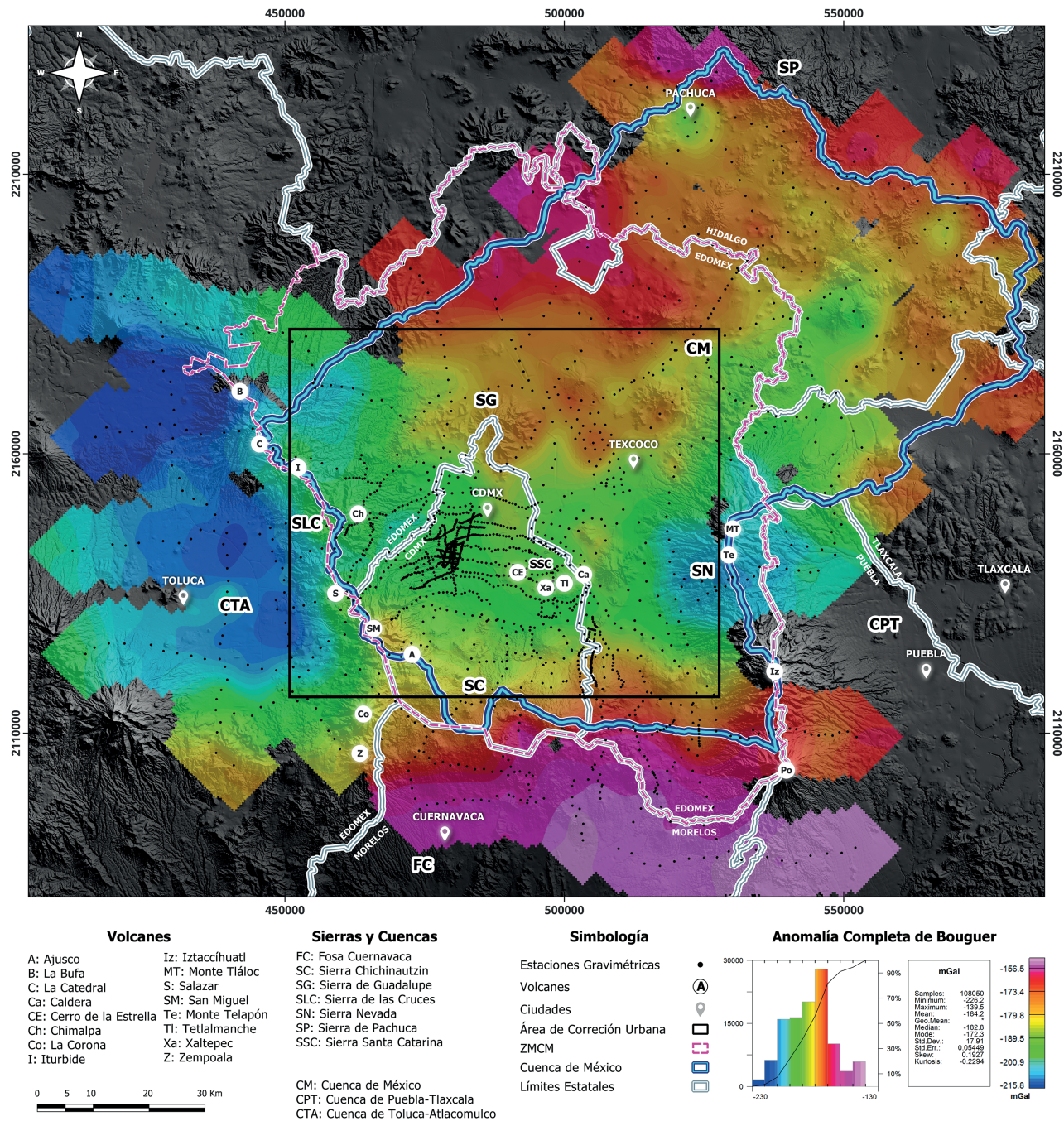


Figura 5. Anomalía Completa de Bouguer de la Campaña GTM2024. El recuadro interior indica la zona en la que se realizó la Corrección Urbana.

La Anomalía Completa de Bouguer presenta valores desde -226.1555 hasta -139.5078 mgal. Los valores altos se presentan en la zona norte de Morelos y poniente de Puebla, regiones que delimitan el sur de la CM, también se determinaron valores altos al norte de la ZMCM y nororiente de la CM. Esta estructura regional asemeja una franja horizontal de mínimo gravimétrico con rumbo E-W que se hace más angosta al centro de la CM. En la zona urbana de la CDMX se observa

una estructura local de rumbo N-S de mayor respuesta gravimétrica que va desde el Cerro de la Estrella y se extiende hasta la Sierra de Guadalupe, dando continuidad con los altos gravimétricos al norte de la CM.

Se observa adicionalmente la existencia de una notable zona de mínimo gravimétrico en la CTA, ubicada al poniente del Estado de México, la cual se acentúa hacia el norte. Esta zona constituye el límite occidental de la CM y está delimitada

al oriente por la Sierra de las Cruces. Se observa también una zona con bajos valores gravimétricos al oriente del Estado de México y norte de Puebla, en los alrededores de los montes Tláloc y Telapón. Los valores intermedios se observan prácticamente en toda la CDMX y las zonas aledañas del Estado de México, dando continuidad a los mínimos que se encuentran alrededor del Monte Tláloc y de la CTA.

4.3 Corrección gravimétrica urbana

Dentro de la CDMX existe una gran cantidad de infraestructura urbana, especialmente en la zona centro y poniente de la ciudad. La corrección urbana requerida puede llegar a cientos de microgales, particularmente en casos donde las mediciones se han realizado a menos de 10 m de grandes estructuras: ~90 m – 30 pisos (Dewu, 2014). Durante la campaña GTM2024 fueron realizadas múltiples mediciones dentro de la urbe, algunas muy cercanas a grandes edificios, por lo que fue necesario realizar una corrección de anomalía gravimétrica debido a tal infraestructura (Figura 6).

Este proceso fue propuesto y desarrollado por Dilalos *et al.* (2018) en la zona urbana de Atenas, Grecia para tomar en cuenta la atracción gravitacional generada por los grandes edificios de la urbe. En este trabajo, la corrección se realizó solamente en la zona urbana de la CDMX y zonas colindantes con el Estado de México debido a las grandes edificaciones que se tienen

(recuadro interior de la Figura 5). La Anomalía Completa de Bouguer (Figura 5) fue el resultado de la suma de la corrección por terreno y por edificios a la reducción simple de Bouguer.

Se consideraron dos tipos de mapas: DSM (Modelo Digital de Superficies, por sus siglas en inglés) y DEM (Modelo Digital de Elevaciones, por sus siglas en inglés) obtenidos mediante técnicas de LiDAR con resolución espacial de 5 m. También, fue necesario enmascarar las zonas de vegetación del DSM (bosques, parques, árboles grandes, etc.). Se creó una máscara para discriminar las zonas urbanas de las de vegetación a partir de una segmentación de índices espectrales en imágenes satelitales.

La densidad promedio de los edificios en la CDMX fue calculada mediante las cargas máximas obtenidas en las Normas y Especificaciones para Estudios, Proyectos, Construcción e Instalaciones de 2014 para la CDMX, en el Volumen 4 (Seguridad Estructural) del Tomo I (Disposiciones y Criterios Generales). Mediante este análisis fue estimada una densidad promedio de edificios de 0.477 g/cm^3 .

La diferencia entre los modelos DSM y DEM, aplicando un enmascaramiento para las zonas de vegetación, permite obtener un mapa de alturas de edificaciones. Estimando la densidad promedio de estas estructuras, es posible calcular la anomalía gravimétrica generada por las construcciones en el polígono de estudio. Este cálculo se realizó mediante el módulo *Terrain Corrections* del menú *Gravity* en el software *Oasis Montaj@*, cuyo resultado corresponde a la corrección urbana (Figura 7).



Figura 6. Grandes edificaciones de la CDMX. Los puntos en rojo en la imagen superior muestran algunas de las estaciones gravimétricas de la Campaña GTM2024.

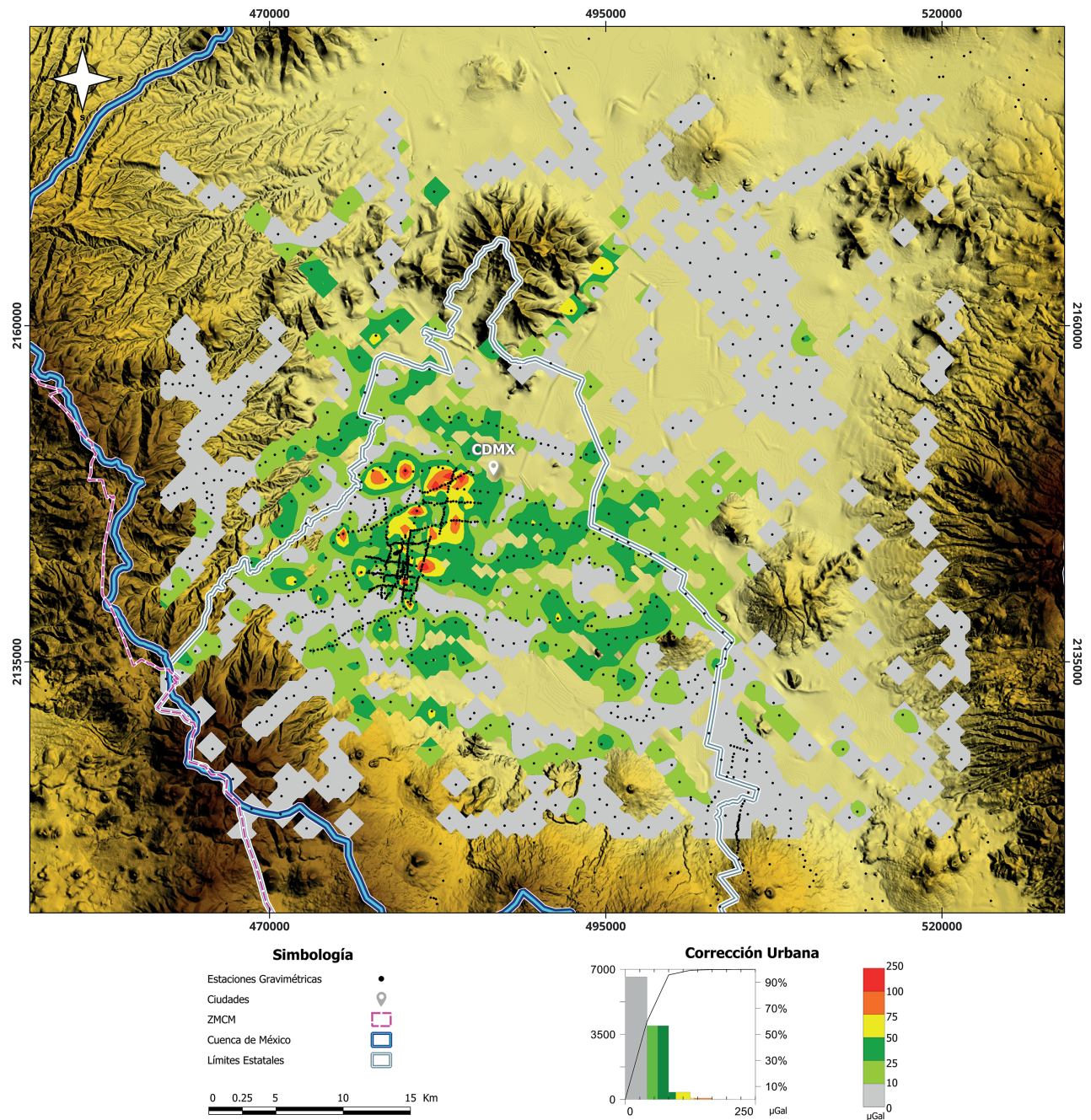


Figura 7. Corrección urbana en la CDMX.

La corrección urbana presenta un rango desde 0 hasta 250 μgal , cuyos máximos se encuentran en las zonas centro y poniente de la urbe, coincidente con las grandes edificaciones de la zona de Polanco y Avenida Reforma. También, existen altos valores en los alrededores de edificios que se encuentran en las avenidas Revolución, Insurgentes y del poniente de Periférico. El resto de la zona urbana de la CDMX tiene valores intermedios cercanos a 50 μgal , mientras que el resto de la zona de análisis tiene valores cercanos a cero.

5. Interpretación

Fue calculada una anomalía regional polinomial de segundo grado mediante el mayor ajuste de los datos por mínimos cuadrados a una superficie cuadrática. La anomalía residual se calculó como la diferencia entre la Anomalía Completa de Bouguer y la anomalía regional de segundo grado, lo cual permitió observar algunos rasgos someros removiendo el efecto regional (Figura 8).

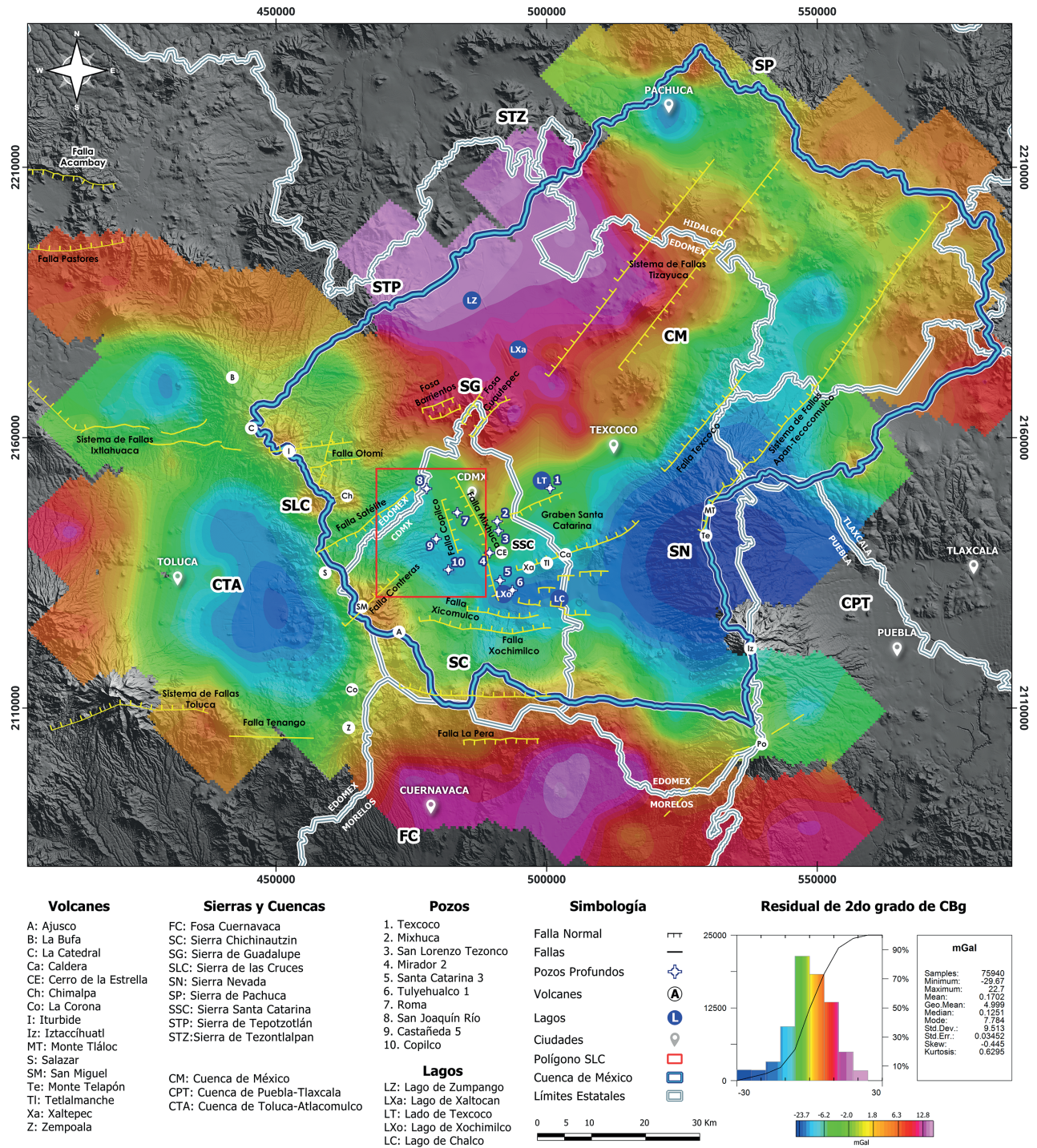


Figura 8. Anomalía residual de segundo grado de la Campaña GTM2024. El recuadro interior indica la zona urbana de detalle al poniente de la CDMX.

La Anomalía residual de segundo grado presenta valores en el rango de -29.6717 hasta 22.7001 mgal. En este mapa se conservan las principales depresiones regionales como la CTA, al poniente de la Sierra de las Cruces, y la CPT, al oriente de la Sierra Nevada. En la porción sur de CDMX también se identifican una serie de mínimos gravimétricos localizados en los lagos de

Chalco y Xochimilco, mostrando un desarrollo hacia la zona poniente de CDMX. Los máximos gravimétricos se observan al norte del Estado de México y sur de Hidalgo, así como en la parte norte de Morelos, mientras que el mínimo gravimétrico de la CTA delimita el SW de la CM.

A escala local se define también una estructura determinada

por un máximo gravimétrico de rumbo N-S y que se extiende desde el Cerro de la Estrella hasta la Sierra de Guadalupe. Este borde inicia en las estribaciones del máximo gravimétrico de las fosas de Cuauhtepc y Barrientos hacia los límites con el Estado de México en la Sierra de Tepotzotlán y del estado de Hidalgo, en la Sierra de Tezontlalpan. Es notable el centro de la CM, donde la distribución gravimétrica de valores bajos se vuelve más pronunciada en los alrededores de los montes Tláloc y Telapón, y acotada por el sistema de fallas Texcoco hasta el Graben de Santa Catarina, un mínimo gravimétrico que se extiende al NE a lo largo del Sistema de Fallas Apan-Texcocomulco, en la zona del Lago de Texcoco y hacia el estado de Hidalgo. En el caso de la zona de lagos de Chalco y Xochimilco, el bajo gravimétrico, asociado a la depresión interior, está delimitado al sur por el Sistema de Fallas Xochimilco-Xicomulco, mientras que el borde norte corresponde a la extensión de la Sierra de Santa Catarina, que aloja a los volcanes de Xaltepec, Tetlalmanche y La Caldera. Hacia el borde poniente del bajo gravimétrico en el centro de la CM, el análisis del registro estratigráfico desarrollado por Gonzales Torres *et al.* (2015), señala que la secuencia volcánica y vulcanoclástica en el pozo Roma no alcanza el contacto con la secuencia calcárea Cretácica a 3,220 m de profundidad, mientras que el Pozo Mixhuca (2,060 m), al oriente de la Falla Mixhuca, cortó los sedimentos marinos del Cretácico a $\approx 1,600$ m de profundidad. Algo similar ocurre en los pozos Texcoco y San Lorenzo Tezonco, donde la secuencia calcárea no fue cortada a 2,065 m y $\approx 2,000$ m de profundidad, respectivamente, mientras que, en el Pozo Mixhuca, en el borde del alto gravimétrico, el contacto con la secuencia Cretácica fue registrado a $\approx 1,600$ m de profundidad.

Aunque en el mapa gravimétrico se conservó la nomenclatura de estructuras inferidas por otros autores, la orientación del gradiente gravimétrico permite deducir, acorde a los trabajos de De Cserna *et al.* (1988), Pérez-Cruz (1988) y Álvarez y Camacho (2024), que las inclinaciones de algunos lineamientos son en sentido contrario a hipótesis previas. Para enfatizar el alcance del procesamiento e importancia de los resultados, se calculó adicionalmente la Anomalía residual de segundo grado en la zona urbana de detalle al poniente de la CDMX (Figura 9).

En la zona urbana de detalle del sector poniente de la CDMX y a lo largo de las fallas Contaderos y Santa Fe sobre la parte central de la Sierra de las Cruces se define una estructura con una respuesta gravimétrica intermedia a alta en la denominada Zona Poniente de la CDMX. Esta estructura presenta una orientación general hacia el NE, con un máximo local concentrado en el Cerro de Chapultepec, extendiéndose hacia el sur hasta la zona de Plateros-Mixcoac y el Pozo Castañeda 5. Hacia el oriente, este máximo gravimétrico está flanqueado por la Falla Copilco, lo que evidencia un notable contraste de densidad respecto a la planicie de la zona del Pozo Roma, donde se registran res-

puestas de menor intensidad gravimétrica. El desarrollo de esta estructura es paralelo a las fallas Contaderos y Santa Fe, y actúa como una estructura divisoria entre los mínimos gravimétricos locales del SE y NW.

Este patrón de contrastes gravimétricos sugiere la presencia de materiales de mayor competencia mecánica, que representan pilares estructurales, mientras que los bordes de los mínimos gravimétricos pueden corresponder a materiales más frágiles y asociados con los productos del vulcanismo acumulados en los flancos de los edificios volcánicos o en los márgenes de depresiones o fosas tectónicas. Además, los bordes transicionales entre los elementos de bajos y altos gravimétricos juegan un papel crucial, ya que en estas zonas los cambios en la presión hidrostática pueden generar variaciones en la presión interna de los materiales, haciéndolos más susceptibles a deformaciones o procesos de inestabilidad. Estos gradientes pueden influir en la dinámica del flujo de fluidos subterráneos y en la respuesta mecánica del subsuelo. En este contexto, los altos gravimétricos actúan como barreras que limitan el movimiento de fluidos y generan acumulaciones diferenciales de presión, propiciando procesos de sobrepresión o despresurización en las zonas más frágiles. Estos efectos pueden potenciar la generación de fracturamiento secundario, subsidencia diferencial y posibles fallas inducidas, elementos fundamentales en la caracterización del comportamiento geomecánico de la región.

La Sierra de las Cruces ha sido dividida en tres grandes bloques por García-Palomo *et al.* (2008). El bloque central está delimitado hacia el norte en el límite estatal con el Estado de México y hacia el sur por la Falla Texcalatlaco, que separa la zona del mínimo gravimétrico en el límite sur de la CM. Esta configuración resalta el marcado control estructural del borde poniente de la CM, particularmente donde el desarrollo episódico de las estructuras volcánicas determina los contrastes altitudinales. La litología de esta sierra está compuesta predominantemente por derrames de lava junto con domos de composición andesítica a dacítica, alternados con secuencias piroclásticas que incluyen flujos de pómez, depósitos de flujos de detritos, materiales lodosos y acumulaciones de avalanchas de escombros. Estos materiales, generados por la actividad magmática durante el Plioceno-Pleistoceno, yacen en discordancia sobre las calizas cretácicas.

6. Discusión

En este trabajo se logró abarcar un área muy extensa con mediciones gravimétricas al centro del país con la Campaña GTM2024, lo cual no se había realizado anteriormente con tal extensión, enfrentando los grandes retos de movilidad y accesibilidad de esta gran urbe que es la ZMCM. Como se indicó

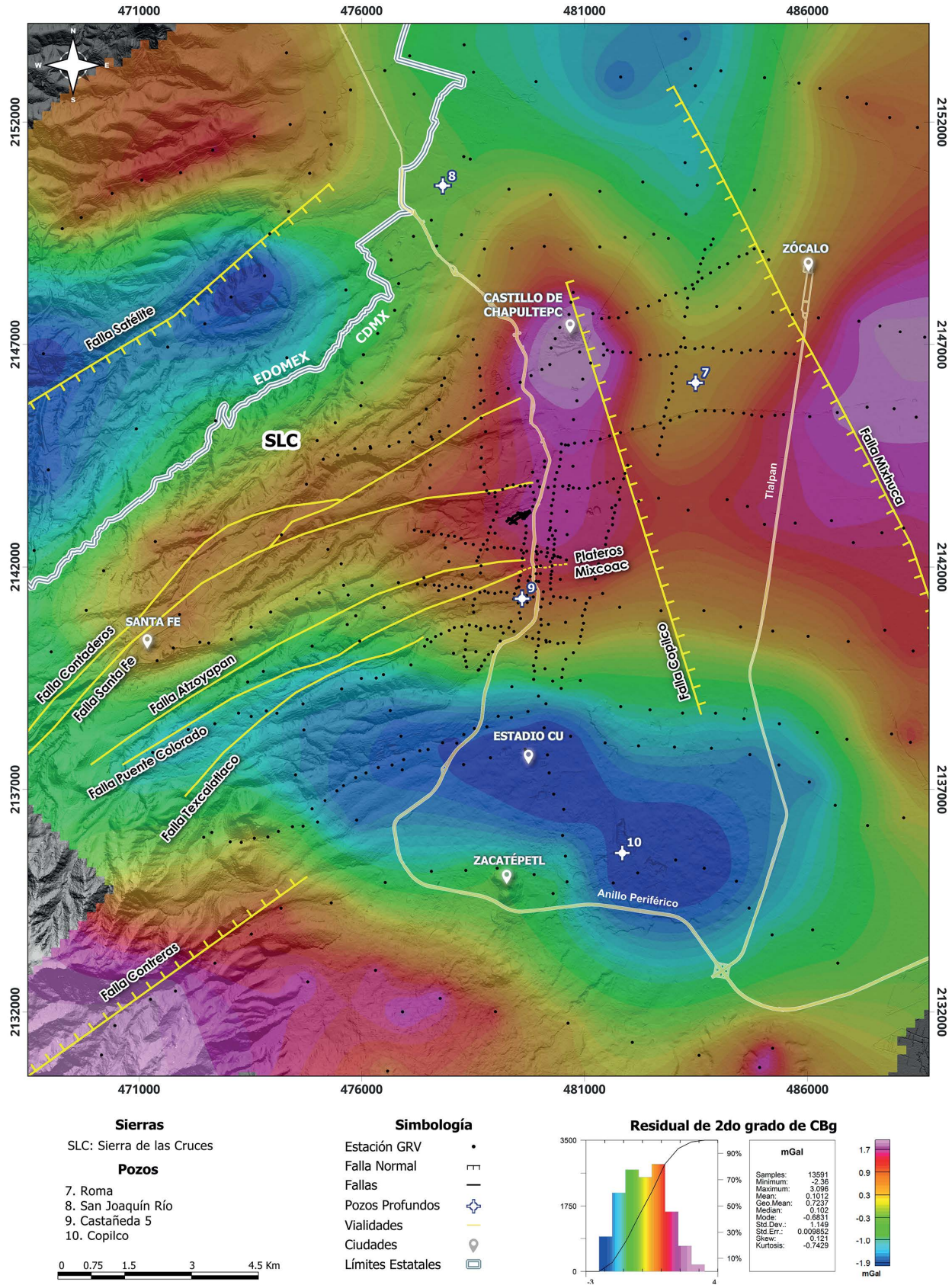


Figura 9. Anomalía residual de segundo grado en la zona urbana de detalle al poniente de la CDMX de la Campaña GTM2024.

al inicio de este trabajo, existen antecedentes de adquisiciones gravimétricas dentro de la CM. En esta sección realizamos una comparación de los trabajos realizados en 1953 por el Ing. Guillermo Hernández Moedano, quien mostró el primer mapa de Anomalía de Bouguer dentro de la CDMX y zonas colindantes; la campaña de exploración geofísica de 1989 con el apoyo de JICA dentro de la zona urbana de la CDMX y el mapa resultado de la Campaña GTM2024 realizado en este trabajo (Figura 10).

Se configuraron algunos perfiles de interés dentro de la CM para comparar la diferencia en resolución espacial y amplitud de las distintas campañas gravimétricas dentro de la CM (Figura 11).

7. Conclusiones

La actualización de la información gravimétrica en la CDMX mediante procesos robustos de métodos geofísicos es esencial para obtener resultados confiables y evitar interpretaciones erróneas. Para ello, es fundamental aplicar correcciones convencionales y seleccionar adecuadamente la densidad en la corrección por terreno, así como emplear técnicas avanzadas

de reducción gravimétrica, tal como la corrección urbana. Estas metodologías han sido aplicadas en este estudio debido a la complejidad geológica y urbana de la ZMCM, una de las metrópolis más grandes del mundo, con múltiples problemáticas geodinámicas y de infraestructura. Contar con mediciones gravimétricas precisas es crucial para abordar los desafíos de la ciudad, como los daños causados por sismos provenientes de la costa del Océano Pacífico, los microsismos que actualmente ocurren en la zona poniente de la CDMX y el complejo sistema acuífero dentro de la CM.

En este contexto, la implementación de la corrección urbana en estudios gravimétricos es indispensable para garantizar una interpretación precisa de los resultados. La influencia de infraestructuras de gran magnitud debe ser considerada en zonas densamente urbanizadas para minimizar sesgos en los datos y mejorar la fiabilidad de los modelos gravimétricos aplicados a la evaluación geodinámica de la región.

Los límites del basamento pre-Mesozoico en el sector norte de la FVTM, donde se encuentra la CM, aún no han sido completamente definidos. Sin embargo, estudios regionales y registros de pozos profundos indican que la depresión presenta una estructura compartimentada, cuyos límites estructurales

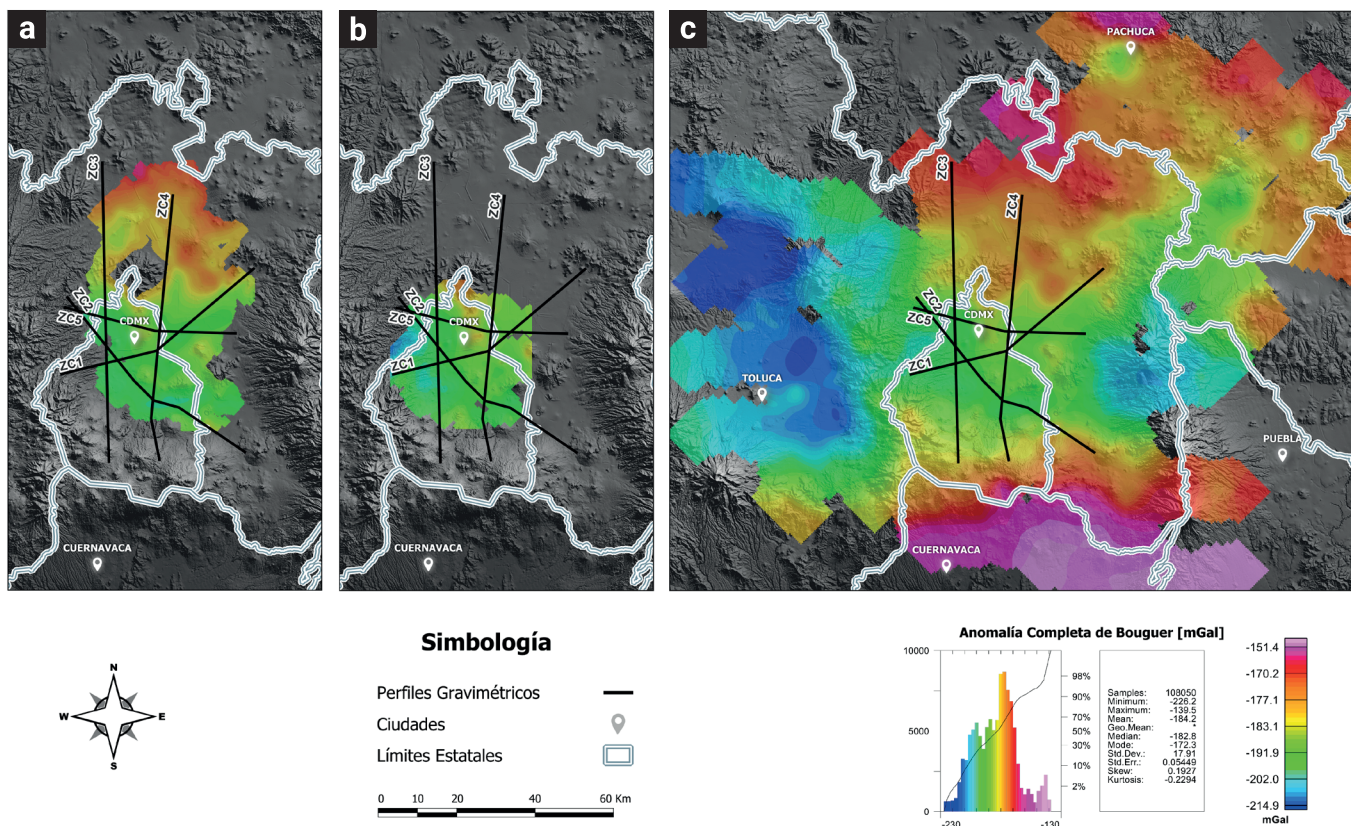


Figura 10. Comparación entre los antecedentes de mediciones gravimétricas dentro de la CM respecto a la actual Campaña GTM2024. a) Mapa CBg 1953; b) Mapa CBg 1989 (JICA); c) Mapa CBg Campaña GTM2024.

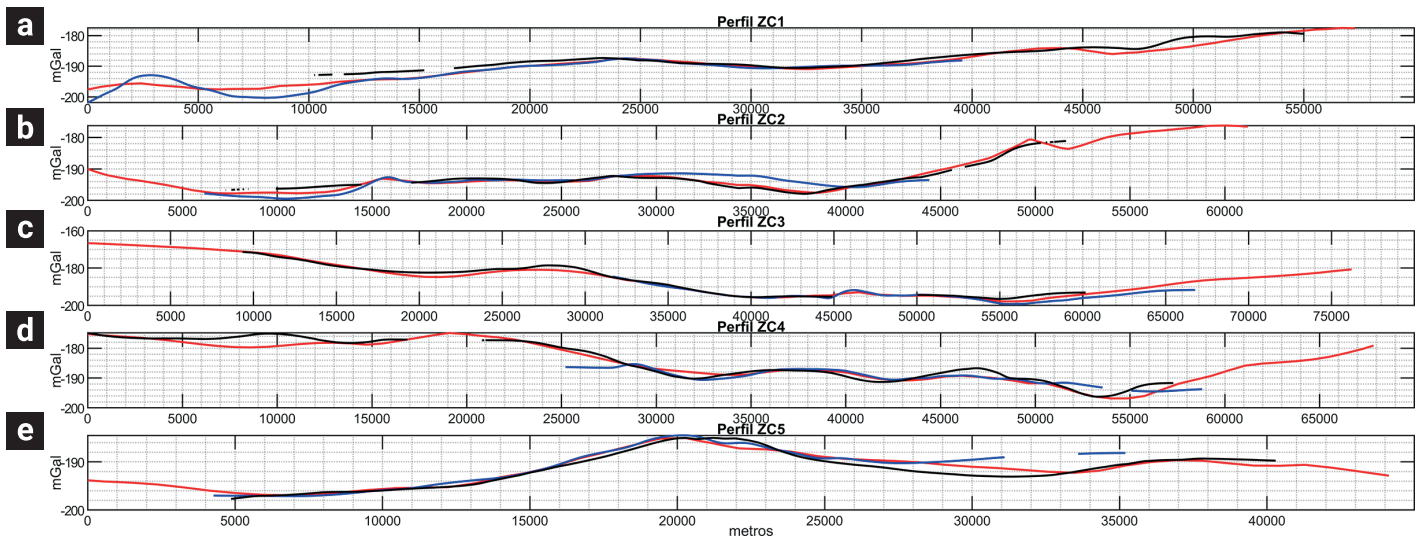


Figura 11. Comparación entre los antecedentes de mediciones gravimétricas dentro de la CM respecto a la actual Campaña GTM2024. a) Perfil ZC1, b) Perfil ZC2, c) Perfil ZC3, d) Perfil ZC4, e) Perfil ZC5. Las líneas de color rojo son de la Campaña GTM2024, las líneas de color azul son de las mediciones de JICA de 1989 y las líneas de color negro son de las mediciones de 1953.

han sido heredados de la geodinámica Cenozoica. El análisis gravimétrico dentro de la CM puede permitir inferir con mayor certeza estos lineamientos a partir de contrastes y gradientes gravimétricos bien definidos, lo que podría ayudar a delimitar bordes estructurales coincidentes con los sistemas de fallas regionales que rodean la CM.

La identificación de los bordes estructurales a través de contrastes gravimétricos, en la zona urbana de detalle al poniente de la CDMX y en zonas de piedemonte y taludes, ha permitido reconocer una serie de bloques hundidos y elevados. Estos se correlacionan con la distribución morfoestructural de distintos depocentros y sierras menores dentro de la CM.

Con los resultados mostrados en este trabajo, al usar una anomalía residual polinomial, a la cual no se le puede asignar una profundidad definida o estimada, es difícil determinar cuantitativamente los alcances verticales de la CM. Aun así, podemos asumir que los efectos predominantes de los gradientes gravimétricos pueden alcanzar, total o parcialmente, los primeros 2 a 4 km de profundidad. Tal consideración se basa en los mapeos estructurales sustentados en la litología reportada en los pozos profundos de la CDMX, los cuales cortan parte del basamento calcáreo a profundidades próximas a los 2 km.

La fragilidad de ciertos materiales dentro de la CM puede ser estudiada mediante el mapeo de algunos contrastes gravimétricos. De manera local, los altos gravimétricos pueden representar estructuras competentes que actúan como barreras mecánicas, mientras que los mínimos gravimétricos pueden corresponder a sectores de menor densidad susceptibles a cambios en la presión de fluidos. La acumulación o liberación repentina de presión en estas zonas puede generar fracturamiento secundario, reactiva-

ción de fallas, subsidencia diferencial y procesos de inestabilidad que afectan la infraestructura urbana y el comportamiento geotécnico del subsuelo. La disposición espacial y el arreglo de estos lineamientos resultan fundamentales para evaluar áreas de riesgo geológico, dado el historial de afectaciones en zonas estratégicas de la ciudad.

8. Agradecimientos

Los autores agradecen el compromiso y dedicación de las personas dedicadas al trabajo de campo: Juan Alberto Reyes Talonia, Oliver Villa Sanluis, Marco Antonio López Valencia, Javier López Valencia, Edwin Alejandro Arizaga Frago, Ezequiel García Veloz, David Alberto Bárcenas López y Erick García Rafael. De igual forma, se agradece a Marlenn Olán Ríos por la recopilación de los mapas DSM y DEM y a los comentarios y aportaciones de Alfredo Sánchez Galindo y Olivia Dianara Pita Sllim. El ánimo para concluir el presente manuscrito recae en el compromiso con la Mtra. Myriam Urzúa y los colaboradores de la Red ECOs en Riesgo Geológico para la Ciudad de México. Se agradece a Geotem Ingeniería por el financiamiento de este trabajo, por brindar los instrumentos necesarios y desarrollar toda la logística para las brigadas de campo.

9. Disponibilidad de datos

Los datos pueden estar disponibles bajo requerimiento: cpita@geotem.lat

10. Referencias

- Aguayo-Camargo, J. E. y Marín-Córdova, S. (1987). Origen y evolución de los rasgos morfotectónicos postcretácicos de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. 48(2), 5-39. doi: <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM1987v48n2a2>
- Alaníz-Álvarez, S. A. y Nieto-Samaniego, A. F. (2005). El sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende y la Faja Volcánica Transmexicana, dos fronteras tectónicas del centro de México activas durante el Cenozoico. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Volumen Conmemorativo del Centenario Grandes Fronteras Tectónicas de México*. 57(1), 65-82. doi: <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2005v57n1a4>
- Álvarez, R. (2017). Mapping Geologic Interfaces that may alter seismic wave propagation in the Mexico City basin. *Geofísica Internacional*, 56(1), 37-56. doi: <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2017.56.1.1733>
- Álvarez, R. y Camacho, M. (2024). The N-S Extension of The Mexico Basin is Confirmed by Gravity Analysis. *Transactions on Engineering and Computing Sciences*, 12(3). 149-174. doi: <https://doi.org/10.14738/tecs.123.17139>
- Arce, J. L., Cruz-Fuentes, D., Ramírez-Luna, A., Herrera-Huerta, I. A. y Girón-García, P. (2017). Pómez Bosque de Tlalpan, producto de una erupción de gran magnitud en el margen suroeste de la cuenca de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 34(3), 274-288. doi: <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2017.3.485>
- Arce, J. L., Layer, P. W., Macias, J. L., Morales Casique, E., García Palomo, A., Jiménez Domínguez, F. J., Benowitz, J. y Vásquez Serrano, A. (2019). Geology and stratigraphy of the Mexico Basin (Mexico City), central Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of Maps*. 15(2), 320-332. doi: <https://doi.org/10.1080/17445647.2019.1593251>
- Blakely, R. (1996). *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*. Cambridge University Press.
- Bradbury, J. P. (1989). Late Quaternary Lacustrine paleoenvironments in the Cuenca de México. *Quaternary Science Reviews*, 8(1), 75-100. doi: [https://doi.org/10.1016/0277-3791\(89\)90022-X](https://doi.org/10.1016/0277-3791(89)90022-X)
- Cabral Cano, E., Morán Zenteno, D. J., Urrutia Fucugauchi, J. (1986). Paleomagnetismo y terrenos tectonoestratigráficos de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. 47(2), 89-102. doi: <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM1986v47n2a3>
- Campa U., M. F. y Coney, P., (1983). Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distributions of Mexico: *Canadian Journal of Earth Sciences*. 20(6), 1040-1051. doi: <https://doi.org/10.1139/e83-094>
- Campos-Enríquez, J. O., Alatríste, D. R., Huizar, R., Marines, R. & Alatorre, M. A. (2003). Subsurface structure of the Tecocomulco sub-basin (northeastern Mexico basin), and its relationship to regional tectonics. *Geofísica Internacional*. 42(1), 3-24. doi: [10.22201/igeof.00167169p.2003.42.1.356](https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2003.42.1.356)
- Campos-Enríquez J. O., Delgado O., Chávez R., Gómez P., Flores E. L. & Birch F. S. (1997). The subsurface structure of the Chalco sub-basin (Mexico City) inferred from geophysical data. *Geophysics*, 62(1), 23-35. doi: <https://doi.org/10.1190/1.1444123>
- Campos-Enríquez, J. O., Lermo, J. F., Antayhua, Y. T., Chavacán, M. & Ramón, V. M. (2015). The Aztlán Fault System: control on the emplacement of the Chichinautzin Range volcanism, southern Mexico Basin, Mexico. Seismic and gravity characterization. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. 67(2), 315-335. doi: <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2015v67n2a13>
- Campos-Enríquez, J. O., Vázquez, C., Keppie, J. D., Quintero, W. & Espinosa, J. M. (2024). Shallow crustal structure of Eastern trans-Mexican volcanic belt: Gravity and magnetic constraints. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 454, 108163. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2024.108163>
- Campos-Enríquez J. O., Rodríguez, M. y Delgado-Rodríguez, O. (2000). Contribution to the tectonics of the northern portion of the central sector of the trans-Mexican Volcanic Belt, in: Delgado-Granados, H, Aguirre-Díaz, G., Stock, J.M., (Eds.), *Cenozoic Tectonics and Volcanism of Mexico* (pp. 223-235) Boulder Colorado, Geological Society of America. doi: <https://doi.org/10.1130/0-8137-2334-5.223>
- Campos-Enríquez, J. O. y Sánchez-Zamora, O. (2000). Crustal structure across southern Mexico inferred from gravity data. *Journal of South American Earth Sciences*, 13(6), 479-489. doi: [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(00\)00045-6](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(00)00045-6)
- Capello, M. A., Shaughnessy, A. y Caslin, E. (2021). The Geophysical Sustainability Atlas: Mapping geophysics to the UN Sustainable Development Goals. *The Leading Edge*, 40(1), 10-24. doi: <https://doi.org/10.1190/tle40010010.1>
- Caratori, F., Graziano, F., Cocchi, L., Carmisciano, C. & Stefanelli, P. (2007). Determining the optimal Bouguer density for a gravity data set: implications for the isostatic setting of the Mediterranean Sea. *Geophysical Journal International*, 169(2), 380-388. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2007.03340.x>
- Carlos Valerio, V., López Miguel, C., Alcántara Ayala, I. (2012). Mass movement processes associated with volcanic structures in Mexico City. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 79, 48-74.
- Centeno-García, E. y Silva-Romo, G. (1997). Petrogenesis and tectonic evolution of central Mexico during Triassic-Jurassic time: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 14(2), 244-260.
- CFE (1988). *Estudios Geofísicos del Valle de México*. Departamento de estudios geofísicos. Superintendencia de estudios Zona Centro. Comisión Federal de Electricidad.
- Chavacán Avila, M. R. (2007). *Catálogo de sismicidad local para la Cuenca de México*. [Tesis de Maestría]. Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado en Ciencias de la Tierra.
- Chávez Pérez, S. (1993). Modelado sísmico de la cuenca de la ciudad de México. *Geofísica Internacional*, 32(1), 111-130. doi: <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.1993.32.1.1358>
- De Cserna-Gombos, Z. (1989). An outline of the geology of Mexico. In a Bally, a. W., y Palmer, A. R., (Eds.), *The Geology of North America -An Overview*. (pp. 233-264) *The Geology of North America*. doi: <https://doi.org/10.1130/DNAG-GNA-A.233>

- De Cserna-Gombos, Z., Fuente-Duch, M., Palacios-Nieto, M., Truay, L., Mitre-Salazar, M., Mota-Palomino, R. (1988). Estructura geológica, gravimetría, sismicidad y relaciones neotectónicas regionales de la cuenca de México: Boletín del Instituto de Geología, 104, 71.
- Dewu, Y. (2014). The Influence of Building on Urban Gravity Surveys. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. 19(3), 157-164. doi: <https://doi.org/10.2113/JEEG19.3.157>
- Díaz-Rodríguez, J. A. (2006). Los Suelos Lacustres de la Ciudad de México. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 6(2) 111.
- Dilalos, S. & Alexopoulos, J. D. (2020). The contribution of an urban gravity survey to the determinable perspective of Athens city (Greece) underground structure. *Springer Nature Applied Sciences*, 2, 1797. doi: <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03466-8>
- Dilalos, S., Alexopoulos, J. D. & Tsatsaris, A. (2018). Calculation of building Correction for urban gravity surveys. A case study of Athens metropolis (Greece). *Journal of Applied Geophysics*, 159, 540-552. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2018.09.036>
- Esteva Maraboto, L. (2017). Reducir el riesgo sísmico con acciones concertadas. *Geotecnia*, 7(245).
- Ferrari, L., Pasquarè, G., Venegas-Salgado, S., & Romero-Rios, F. (2000). Geology of the western Mexican Volcanic Belt and adjacent Sierra Madre Occidental and Jalisco block. In a. Delgado-Granados, H., Aguirre-Díaz, G., and Stock, J. M. (Eds.), *Cenozoic Tectonics and Volcanism of Mexico*. Geological Society of America. doi: <https://doi.org/10.1130/0-8137-2334-5.65>
- Figueroa, J. A. (1971). Sismicidad en la Cuenca del valle de México. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
- Fukao, Y., Yamamoto, A., & Nozaki, K. (1981). A method of density determination for gravity correction. *J. Phys. Earth*, 29, 163-166.
- García-Palomo, A., Juan Zamorano, J., López-Miguel, C., Galván-García, A., Carlos-Valerio, V., Ortega R., Macías, J. L. (2008). El arreglo morfoestructural de la Sierra de Las Cruces, México central. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 25(1), 158-178.
- Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, Ma. T., Ferrari, L. (2005). Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. 58(3), 227-283.
- González Torres, A. E., Morán Zenteno, D. J., Mori, L., and Martiny, B. M. (2015). Revisión de los últimos eventos magmáticos del Cenozoico del sector norte-central de la Sierra Madre del Sur y su posible conexión con el subsuelo profundo de la Cuenca de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. 67(2), 285-297. doi: <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2015v67n2a11>
- González-Flores, E., Campos-Enríquez, J. O., Valenzuela-Wong, R., Torres-Verdín, C., Rivera-Recillas, D. E. and Camacho-Ramírez, E. (2020). Shallow structure of the Chalco and Xochimilco sub-basins (southern Mexico basin) based on wave propagation modelling and seismic data, *Journal of South America earth Sciences*, 103, 102722. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102722>
- Hinze, W., Aiken, C., Brozena, J., Coakley, B., Dater, D., Flanagan, G., Forsberg, R., Hildenbrand, T., Keller, G., Kellogg, J., Kucks, R., Li, X., Mainville, A., Morin, R., Pilkington, M., Plouff, D., Ravat, D., Roman, D., Urrutia-Fucugauchi, J., Véronneau, M., Webring, M. and Winester, D. (2005). New standards for reducing gravity data: The North American gravity database. *Geophysics*, 70(4), J25-J32. doi: <https://doi.org/10.1190/1.1988183>
- Huizar, R., Campos-Enríquez, J. O., Lermo, J. F., Delgado, O. & Huidobro, A. (1997). Geophysical and hydrogeological characterization of the sub-basin of Apan and Tohac (Mexico basin). *Geofísica Internacional*, 36(4), 217-233. doi: <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.1997.36.4.667>
- INEGI (2021). Censo de Población y Vivienda 2020. Comunicado de Prensa Núm. 98/21.
- Keppie J. D. (2004). Terranes of Mexico Revisited: A 1.3 Billion year Odyssey. *International Geology Review*, 46(9), 765-794. doi: <https://doi.org/10.2747/0020-6814.46.9.765>
- Lermo Samaniego, J. F., Sanchez-Sesma, F. J., Ramos Pérez, E., Álvarez Monroy, I., Jiménez Méndez, N., Torres Cuenca, R., Machado González, O. R. (2013). Actualización de la Zonificación Sísmica de la Ciudad de México y áreas aledañas-parte norte (Informe Técnico ISCDF/CEC-04/2020-13). Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería. (<https://transparencia.cdmx.gob.mx/storage/app/uploads/public/603/44b/1c6/60344b1c69beb045505965.pdf>)
- Marsal, R. J. & Mazari, M. (1969). The subsoil of Mexico City, (2a. ed.) Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
- Molina, R., & Urrutia, J. (1993). Deep Crustal Structure of Central Mexico derived from interpretation of Bouguer Gravity Anomaly Data. *Journal of Geodynamics*, 17(4). doi: [https://doi.org/10.1016/0264-3707\(93\)90007-S](https://doi.org/10.1016/0264-3707(93)90007-S)
- Mooser, F. (1975). Historia geológica de la cuenca de México. En: A. Roberto Ríos Elizondo (Ed.) *Memoria de las Obras del Sistema de Drenaje Profundo del Distrito Federal*, T. 1 (pp. 7-38). Talleres Gráficos de la Nación.
- Moran-Zenteno, D. J. (1986). Breve revisión sobre la evolución tectónica de México. *Geofísica Internacional*. 25(1). doi: <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.1986.25.1.799>
- Moran-Zenteno, D. J., Alba-Aldave, L. A., Solé, J. and Iriondo, A. (2004). A major resurgent caldera in southern Mexico: the source of the late Eocene Tilzapotla ignimbrite. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 136(1-2), 97-119. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2004.04.002>
- Novelo-Casanova, D. A., Suárez, G., Cabral-Cano, E., Fernández-Torres, E. A., Fuentes-Mariles, O. A., Havazli, E., Jaimes, M. Á., López-Espinoza, E. D., Martín-Del Pozzo, A. L., Morales-Barrera, W. V., Morales-Rodríguez, H. L., Nieto-Torres, A., Rodríguez-Elizarrarás, S. R., Solano-Rojas, D., Velasco-Herrera, V. M. (2021). The risk atlas of Mexico City, Mexico: a tool for decision-making and disaster prevention. *Natural Hazards*, 111, 411-437. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05059-z>
- ONU-HABITAT. (2021). United Nations Human Habitat Reporte Anual

2021. United Nations Human. <https://onu-habitat.org/index.php/ONU-habitat-reporte-anual-2021>
- Pérez-Cruz, G., 1988. Estudio Sismológico de Reflexión del Subsuelo de la Ciudad de México. [Tesis de Maestría]. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
- Santoyo, M. A. (1996). Estudios del subsuelo en el Valle de México. In. Estudios del subsuelo en el valle de México. Cuadernos de Investigación 34. Centro Nacional de prevención de Desastres.
- Sedlock, R. L., Ortega-Gutierrez, F., Speed, R. C. (1993). Tectonostratigraphic terranes and tectonic evolution of Mexico. Geological Society of America. Special Paper 278. doi: <https://doi.org/10.1130/SPE278>
- Segerstrom, K. (1962). Geology of South-central Hidalgo and Northeastern Mexico. Geological Survey Bulletin 1104-C. doi: <https://doi.org/10.3133/b1104C>
- Solano, R. D. E., Wdowinski, S. M., Cabral-Cano, E., Osmanoglu, B. (2017) NH32A-08: Differential subsidence in Mexico City and implications to its Collective Transport System (Metro). AGU Fall Meeting.
- Trogu, A., Ranieri, G., Piga, C. & Piroddi, L. (2012). Gravity survey: a tool for urban planning. 811-820.
- UNISDR (2009). Terminología sobre Reducción del Riesgo de Desastres. Naciones Unidas. <https://www.undrr.org/>
- Urrutia-Fucugauchi, J., Moran Zenteno, D. J., Cabral Cano, E. (1987). Paleomagnetism and tectonics of Mexico. Geofísica Internacional, 26(3), 429-458. doi: <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.1987.26.3.1314>
- Vázquez-Sánchez, E. y Jaimes-Palomera, R. (1989). Geología de la Cuenca de México. Geofísica Internacional. 28(2), 133–190. doi: <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.1989.28.2.1026>
- Vergara-Huerta, F. y Aguirre, J. (2020). One-dimensional seismic velocity model of the sub-basin of Chalco, Mexico. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 300, 1–8. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2020.106426>