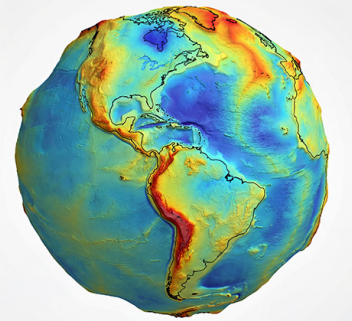




Gravimetría absoluta

AQUÍ PUEDES VER EL
EVENTO COMPLETO

Preguntas realizadas en el evento:

1. Durante la medición, cuando se presentan interferencias, ¿los datos registrados son descartados o qué tratamiento se les da?

Se evalúa la coherencia de las lecturas (caídas) dentro del conjunto de datos captados. Aquellas que comprometan la representatividad del conjunto pueden ser filtradas, dado que el ruido sísmico transitorio (provocado por la movilidad en zonas aledañas) puede introducir errores. Esta situación justifica la exclusión de registros ruidosos. No obstante, la eliminación de conjuntos completos debe limitarse a escenarios excepcionales, a fin de evitar alteraciones arbitrarias que afecten la validez del análisis.

2. ¿La Gravimetría absoluta puede contribuir a los estudios relacionados con el cambio climático? De ser así, ¿de qué manera?

Sí, de manera fundamental. La Gravimetría absoluta establece estaciones de control terrestre de altísima precisión espacial y temporal. Estas estaciones sirven como puntos de calibración y validación (*ground truth*) para misiones satelitales globales. Esto permite monitorear de forma continua el balance de masas de agua a gran escala, detectar variaciones en acuíferos transfronterizos, evaluar el derretimiento de capas de hielo y analizar cambios dinámicos en el nivel del mar, asociados con el cambio climático global.

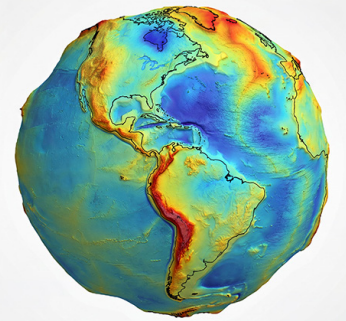
3. ¿Qué aportes tiene la Gravimetría absoluta en los estudios volcánicos o sísmicos?

Los estudios locales, como el monitoreo de volcanes, regularmente se basan en gravimetría relativa. Permite detectar variaciones microgalvánicas previas a erupciones debidas al ascenso de magma o cambios de densidad en la cámara volcánica, así como deformaciones corticales postsísmicas.

4. Me imagino que la determinación del sitio donde se instala el equipo no es aleatoria. ¿Qué condiciones ideales deben considerarse para seleccionar un punto de medición?

Los criterios para seleccionar un sitio para el establecimiento de una Estación Gravimétrica Absoluta (EGA) incluyen diversos factores que garantizan la estabilidad y precisión de las mediciones, tales como:

- **Marca.** Las estaciones deben marcarse de acuerdo con características del lugar y con las condiciones ambientales predominantes en el mismo, de tal forma que permita su fácil localización y perdurabilidad.
- **Estabilidad.** El sitio seleccionado debe estar en una zona estable, libre de vibraciones, para garantizar que las lecturas observadas sean de alta calidad, dar preferencia a zonas donde el manto rocoso esté aflorado, que no esté sujeto a perturbaciones o interferencia local; evitar lugares cercanos a carreteras o calles con tránsito denso, existencia de huecos o ausencia de masa por debajo de la superficie, que no se vea afectada por el trabajo de maquinaria de grandes dimensiones, fallas geológicas, cuerpos de agua y tubería subterránea.
- **Accesibilidad.** Seleccionar lugares donde se cuente con expectativas de durabilidad del entorno, sin planes de modificación previsibles y de fácil acceso.
- **Espacio.** El sitio seleccionado debe contar con espacio suficiente para hacer lecturas simultáneas con dos gravímetros.



Gravimetría absoluta

AQUÍ PUEDES VER EL
EVENTO COMPLETO

Preguntas realizadas en el evento:

5. ¿Qué proyectos consideran prioritarios para México en materia de Gravimetría durante la próxima década?

Consiste en consolidar la transición al nuevo marco internacional de gravedad, mediante la densificación de la RGG de primer orden (absoluta) y la modernización digital de la red relativa de segundo orden en zonas con alta dinámica geológica y urbana.

6. ¿Qué correcciones ambientales aplican durante el trabajo de campo y cómo determinan si una medición de gravedad absoluta es aceptable o si debe repetirse? Asimismo, ¿qué condiciones del sitio consideran críticas para la instalación del gravímetro absoluto (vibraciones, estabilidad del piso, temperatura, humedad, entre otras)?

Durante el procesamiento en campo se aplican rigurosas correcciones ambientales que incluyen mareas terrestres (sólidas y oceánicas), efectos de la presión atmosférica (atracción directa y deformación por carga) y el movimiento del polo (atracción centrífuga).

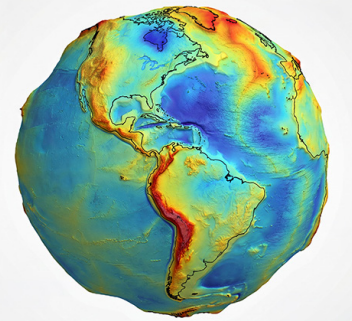
7. ¿Qué papel desempeña México dentro de las redes internacionales de observación gravimétrica?

México mantiene un rol de observador activo y proveedor de datos regionales alineados a los estándares de la Asociación Internacional de Geodesia (IAG). Aunque actualmente la red nacional no está integrada plenamente al núcleo del International Gravity Reference Frame (IGRF) global por carecer de una estación de monitoreo fundamental co-localizada (que combine gravimetría cuántica/continua, GNSS permanente y VLBI), el INEGI analiza una estrategia de modernización instrumental e infraestructura física con miras a cumplir los requisitos de la infraestructura global de geodesia (GGOS).

8. Los datos gravimétricos representan un insumo muy valioso, especialmente por contar con cobertura a nivel nacional. También resulta muy relevante que ya se estén aplicando las correcciones necesarias para obtener la anomalía de Bouguer, ya que esto permite realizar análisis más detallados de las estructuras del subsuelo. ¿Han considerado incorporar también el dato de anomalía residual? Considero que esta información podría contribuir a mejorar el nivel de detalle en la interpretación de estructuras geológicas del subsuelo para diversos fines. Asimismo, ¿podrían comentar dónde es posible consultar o descargar estos datos de acceso público?

El objetivo del proyecto es generar y proporcionar valores de aceleración de la gravedad correspondientes a las Estaciones Gravimétricas Absolutas y Relativas de la Red Geodésica Gravimétrica (RGG), como parte del grupo de datos del Marco de Referencia Geodésico, conforme a lo establecido en los artículos 26 y 99 de la Ley del Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica.

En este sentido, el alcance se centra en la determinación, validación y publicación de valores observados de gravedad mediante metodologías comprobadas y sustentadas en estándares internacionales, con el propósito de que los usuarios vinculen sus estudios geográficos a dicha red. La anomalía residual constituye un producto derivado de análisis e interpretación gravimétrica posterior.



Gravimetría absoluta

AQUÍ PUEDES VER EL
EVENTO COMPLETO

Preguntas realizadas en el evento:

Aunque hemos generado modelos nacionales de anomalías de gravedad, estos son considerados como productos de resolución media, puesto que sus datos de origen son puntos de la red gravimétrica de segundo orden, cuyo espaciamiento es de 4 a 6 km. Hasta ahora, el programa de mediciones del INEGI se ha enfocado en la cobertura nacional, sin pretender hacer densificaciones locales de alta densidad de datos, que es de donde surgen los modelos de anomalía residual.

Con respecto a la disponibilidad pública de los datos, los valores correspondientes a las estaciones gravimétricas absolutas observadas en 2018, en colaboración con el National Geodetic Survey (NGS) de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) de los Estados Unidos, se encuentran disponibles para consulta en el documento *Estaciones de gravedad absoluta en México*, publicado en el portal institucional del INEGI. Los resultados del gravímetro absoluto A10, generados a partir de 2020, aún no se encuentran visibles en el portal institucional, pero pueden ser solicitados a través de los canales institucionales de atención del INEGI. Los modelos gravimétricos 2010, con resolución de 2.5 minutos de arco, son de acceso libre en el sitio de descarga de la Red Geodésica Nacional (<https://www.inegi.org.mx/programas/rgn/#descargas>).

Por último, cabe mencionar que para finales de noviembre tenemos programada la liberación de los modelos en versión 2025, con resolución de 1 minuto de arco, acompañados de una publicación metodológica.

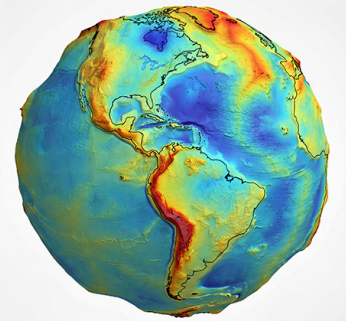
9. Desde la óptica de quienes trabajamos en temas de medio ambiente, resulta muy interesante saber que la gravedad puede reflejar cambios en la distribución de masas sobre la Tierra.

¿Consideran que, en el futuro, las observaciones gravimétricas podrían desempeñar un papel más relevante en el monitoreo de fenómenos como la disponibilidad de agua, la subsidencia del terreno o incluso algunos efectos asociados al cambio climático? En su opinión, ¿cuáles son las aplicaciones con mayor potencial en estos ámbitos para los próximos años?

Definitivamente, el rol de gravimetría tiende a incrementar su relevancia, sobre todo en la aplicación del monitoreo de agua subterránea. Especialistas en geofísica realizan levantamientos de gravimetría enfocados a medir la forma y dimensiones de los mantos acuíferos, lo que permite a los tomadores de decisiones impulsar proyectos. Claramente, este tema cobra relevancia en el contexto de México, puesto que se tiene registrada una tendencia de desertificación en vastas regiones del país.

10. ¿Se tienen detectadas zonas donde el valor de gravedad tenga mayor variabilidad en sus valores, en comparación con el modelo esperado?

En México, las zonas de variación extrema (anomalía de aire libre) se encuentran en los volcanes y en las fallas tectónicas, como es la Trinchera Mesoamericana, que se extiende mar adentro en las costas del sur de México y que es el origen de la actividad sísmica.



Gravimetría absoluta

AQUÍ PUEDES VER EL
EVENTO COMPLETO

Preguntas realizadas en el evento:

11. ¿Pueden comentar si la variación de datos gravimétricos implica una actualización de los datos que difunden todas las áreas de la subdirección?

Hasta el momento, los cambios temporales de gravedad no guardan relación con el cambio o actualización de otros datos de la Red Geodésica Nacional ni con actualizaciones en productos como los modelos de hundimiento del terreno o cambio de versión de los modelos gravimétricos.

12. Acerca de reuniones de BDG nacional, en el edificio sede en Aguascalientes, realizadas antes de la pandemia, se comentaba que a futuro posiblemente se publicarían como las EG de RGV y RGH en la plataforma del Mapa Digital de México (vía web) las Estaciones Base de Gravedad. ¿se llevará a cabo?

Actualmente, se están realizando trabajos de depuración y migración de la información a una nueva base de datos en la cual ya se estarían integrando las estaciones base de gravedad y estaciones absolutas. Una vez concluida, se informará de su disponibilidad en los diferentes sitios de internet del Instituto.

13. Considerando que diversos fenómenos geológicos, como la actividad tectónica, la subsidencia y el vulcanismo, pueden modificar la distribución de masas en la Tierra, ¿de qué manera el monitoreo de estos procesos contribuye a mejorar la determinación, actualización y precisión del modelo del geoide nacional, particularmente desde la perspectiva de la gravimetría?

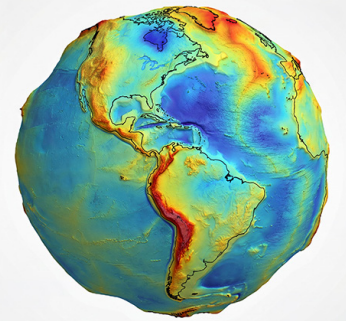
La información detallada sobre los cambios de distribución de masas de la Tierra podrá aprovecharse para construir un modelo del cambio temporal de las alturas geoidales. Esto es, un modelo que diga cuántos milímetros o centímetros por año se modifica el geoide en México. Actualmente, se carece de este tipo de modelo, que se considera como un complemento al modelo de geoide en los países más avanzados en este tema.

14. Desde la experiencia en geodesia, ¿consideran que incorporar el monitoreo de fenómenos geológicos en las tres redes geodésicas (horizontal, vertical y gravimétrica) aportaría un valor a la información que actualmente se produce?

Definitivamente. La integración formal del monitoreo geodinámico en las redes horizontal (GNSS), vertical (nivelación clásica) y gravimétrica (absoluta/relativa) constituye la cúspide de la 'Geodesia Integrada'. Este enfoque triconvergente aporta un valor extraordinario: permite aislar si un cambio observado en la superficie es volumétrico (deformación de la corteza) o puramente de masa (variaciones de fluidos subterráneos). Esto transforma la red geodésica de una infraestructura puramente cartográfica a una herramienta de alerta temprana ante riesgos geológicos y de cambio ambiental.

15. Quiero suponer que todas estas mediciones están muy relacionadas con la implementación del GGM25. ¿Durante cuánto tiempo se realizaron mediciones para poder lograr un cambio de geoide y qué criterios se tomaron para proponer un nuevo geoide? De continuar con las mediciones como hasta ahora se han realizado, ¿podría existir una nueva implementación de otro geoide?

Entre los modelos geoidales GGM10 y GGM25 se acumularon 15 años de levantamientos gravimétricos, que



Gravimetría absoluta

AQUÍ PUEDES VER EL
EVENTO COMPLETO

Preguntas realizadas en el evento:

representan un 127 % adicional a la cifra de datos que se tenía en 2010. De continuar las mediciones actuales, se esperaría contar con una mejora marginal en el modelo geoidal, puesto que la meta de cobertura nacional ya se encuentra cerca de ser alcanzada. Se considera que las mejoras significativas serán alcanzadas modernizando la metodología de medición para sacar ventaja del avance tecnológico reciente. Las mediciones de gravedad absoluta disponibles todavía no impactan en el modelo geoidal.

16. ¿Cómo puede fortalecerse la colaboración entre las instituciones académicas, los organismos productores de información geográfica y las dependencias gubernamentales para aprovechar mejor estos datos?

La colaboración interinstitucional se puede fortalecer a través de tres ejes estratégicos:

1. Comités Técnicos Especializados dentro del marco del SNIEG para estandarizar el intercambio de información.
2. Convenios Marco de Cooperación Científica con universidades de vanguardia para incentivar tesis de posgrado y proyectos de investigación aplicada utilizando el repositorio gravimétrico del INEGI.
3. Consorcios de Investigación Abierta que faciliten la transferencia tecnológica en métodos de procesamiento gravimétrico y geodinámico avanzado.

17. ¿Qué *softwares* se utilizan actualmente para el uso y manejo de los datos gravimétricos?

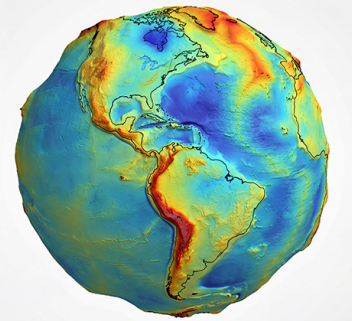
Para procesamiento básico del gravímetro absoluto se emplea el *software* “g” versión 9.2 de Micro-g LaCoste. Para la creación de modelos digitales gravimétricos se usa SHGeo (Stokes-Helmert Geoid) y GMT (Genneric Mapping Tools).

18. ¿Cómo inciden en los sistemas de navegación inercial los valores de los semiejes mayor (a) y menor (b) del elipsoide de referencia ITRF 2008 o WGS84?

Los parámetros geométricos de los semiejes mayor (a) y menor (b) definen el elipsoide de referencia a partir del cual se calcula matemáticamente la gravedad normal (γ). Los Sistemas de Navigation Inercial (INS) miden aceleraciones totales mediante acelerómetros. Para determinar la aceleración real del vehículo, el INS debe restar con extrema precisión la componente de la gravedad terrestre local. Si los semiejes o el marco de referencia (WGS84 o ITRF) presentan discrepancias, el cálculo de la gravedad normal introducirá un sesgo acumulativo (drift) en la integración numérica.

19. En el contexto de la elaboración de las cartas de gradiente horizontal y de zonificación de riesgo, ¿qué relevancia tendría incorporar datos de la Red Geodésica Vertical obtenidos mediante nivelación geodésica? ¿Consideran que esta información contribuiría a mejorar la precisión, confiabilidad o interpretación de estos productos?

La Red Geodésica Vertical apoya en la evaluación de calidad de modelos digitales de terreno, que son el insumo para generar los mapas de gradiente horizontal. La red en sí carece de resolución suficiente para delinear estos



Gravimetría absoluta

AQUÍ PUEDES VER EL
EVENTO COMPLETO

Preguntas realizadas en el evento:

gradientes. Comúnmente, los bancos de nivel se encuentran espaciados cada 2 km, de modo que la información derivada sobre gradientes queda muy rebasada por casi cualquier modelo digital.

20. Desde una perspectiva institucional, uno de los principales desafíos para el INEGI es comunicar que la información gravimétrica no solo pertenece al ámbito especializado de la geodesia, sino que también constituye una fuente estratégica para comprender problemas de carácter público. Una forma de avanzar en su socialización es traducir los resultados técnicos en preguntas asociadas con problemas concretos. Por ejemplo, además de preguntar ¿cuál es la anomalía gravimétrica observada?, conviene plantear preguntas como ¿dónde se incrementa el riesgo de subsidencia? ¿Cómo cambia el almacenamiento hídrico regional? ¿Qué señales ayudan a analizar deformaciones corticales o actividad tectónica? Cuando la gravimetría se vincula con temas como agua, cambio climático, subsidencia, infraestructura, dinámica tectónica y desarrollo territorial, deja de percibirse como una disciplina aislada y se reconoce como un insumo útil para la gestión pública y la toma de decisiones.

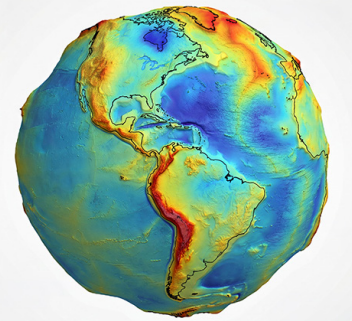
Efectivamente, representa uno de los desafíos más transformadores para el Instituto. El reto consiste en democratizar el uso de los datos geodésicos de alta especialización, traduciendo mediciones microgalvánicas complejas en variables legibles para la toma de decisiones en políticas públicas de alto impacto, tales como la gestión de riesgos ante hundimientos urbanos, la seguridad hídrica regional y la resiliencia climática de la infraestructura nacional.

21. ¿Existe actualmente una metodología definida para la transición del sistema de referencia gravimétrico IGSN71 hacia el nuevo Marco Internacional de Referencia de Gravedad con las nuevas EGA? En caso afirmativo, ¿cuál es el nivel de complejidad técnica y operativa asociado a dicha transición?

Sí, el INEGI se encuentra alineado a la resolución de la Asociación Internacional de Geodesia (IAG) para transitar del marco histórico IGSN71 al nuevo Marco Internacional de Referencia de Gravedad (IGRF). Operativamente, la complejidad actual es elevada debido a la asimetría temporal entre datos históricos y la densidad requerida de Estaciones Gravimétricas Absolutas (EGA). Técnicamente, la complejidad estriba en armonizar y recalcular las bases relativas antiguas para eliminar distorsiones acumuladas. Conforme se complete la instalación programada de estaciones absolutas base, el marco se tornará autoconsistente, reduciendo la complejidad operativa de los levantamientos rutinarios.

22. ¿En qué momento el INEGI comenzaría la transición al nuevo marco de referencia internacional de gravedad?

La transición inició con la incorporación de tecnología gravimétrica absoluta de última generación y se consolidará por fases: 1. Corto plazo: continuar con la fase experimental y el diseño de la red base de control fundamental; 2. Mediano plazo (3-5 años): integración activa al marco internacional IGRF conforme las especificaciones globales maduren, 3. Largo plazo (5-10 años): consolidación de una red dinámica, sirviendo de base fundamental para toda la cartografía y topografía nacional de alta precisión.



Gravimetría absoluta

AQUÍ PUEDES VER EL
EVENTO COMPLETO

Preguntas realizadas en el evento:

23. ¿Cuál es el futuro de la Red Geodésica Gravimétrica del INEGI en los próximos años? ¿Cuál es la visión u horizonte de desarrollo para esta red a mediano y largo plazo?

Esperamos que la red le aporte a México un acervo de información de nueva generación. Los puntos de referencia fundamental comenzarán a clarificar la verdadera magnitud de cambio que experimenta el campo de gravedad (gravedad absoluta); mientras que los levantamientos de gravimetría relativa nos darán una mucho mejor definición del mapa de gravedad a nivel nacional. Se prevé que la Red Geodésica Gravimétrica continúe fungiendo como información básica.

24. ¿Qué factores determinan la frecuencia con la que debe actualizarse un modelo geoidal para conservar su confiabilidad?

Para la cobertura de México, los datos nos indican que el geoide se mantiene bastante quieto en el tiempo. Esto relaja la necesidad de actualizarlo, puesto que continúa teniendo cambios muy pequeños, difíciles de detectar. No obstante, lo que sí está cambiando es el nivel de exigencia por parte de usuarios y las aplicaciones emergentes. Se sabe que los usuarios quisieran contar con precisión de 1 cm en sus resultados finales, y nosotros procuramos alcanzar esa meta de precisión. En este sentido, actualizamos el modelo geoidal cada vez que contamos con una solución significativamente mejor que la anterior. Es posible que cada 5 o 10 años se pueda contar con dicha actualización, pero es incierto hablar de una frecuencia fija porque las mejoras dependen de la disponibilidad de mejores datos de insumo: mejores modelos de observación satelital y mejor densidad de datos de gravedad en campo. Suelen pasar varios años para contar con un avance significativo.

25. ¿Cuál es la mayor área de oportunidad de la Red Geodésica Gravimétrica?

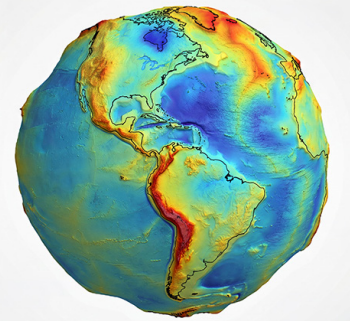
Existen varias áreas de oportunidad; sin embargo, la principal limitación para “democratizar” la gravimetría y sus aplicaciones es el costo del instrumental y la capacitación técnica de los operadores. Actualmente, nuestro país se encuentra a la vanguardia en Latinoamérica en este tema, no solo por las actividades que realiza el INEGI, sino también por el instrumento (FG5X-252) y el personal certificado con los que cuenta el CENAM para la ampliación de redes certificadas.

Por ello, en vista de la demanda internacional y de la capacidad nacional desarrollada, se podría afirmar que el área de mayor oportunidad es la expansión de la red gravimétrica nacional hacia Latinoamérica, comenzando por los países de Centroamérica y el Caribe, y posteriormente por los del Cono Sur.

Otra área de oportunidad que no debe descartarse es el desarrollo y/o la fabricación de instrumentación (gravímetros absolutos y relativos) mediante el uso de nuevas tecnologías emergentes.

26. ¿Ustedes llevan un registro estadístico y técnico de las mediciones de gravedad absoluta realizadas en el país? De ser así, ¿desde qué fecha se lleva a cabo esta actividad?

Sí, se tiene un registro detallado de las mediciones realizadas con gravímetros absolutos modernos, como los mostrados en la presentación. El primer levantamiento data de 1996 y fue realizado por el National Geodetic Survey



Gravimetría absoluta

AQUÍ PUEDES VER EL
EVENTO COMPLETO

Preguntas realizadas en el evento:

de los Estados Unidos de América sobre nueve sitios del sur de México. Adicional a esto, se tiene respaldo del resultado en levantamientos históricos y experimentales, de los cuales el más antiguo data de 1912, en la Ciudad de México.

27. ¿Tienen algún ejercicio para determinar el geoide magmático con datos gravimétricos?

Como tal, no existe un geoide magmático, ya que el magma no se distribuye de manera uniforme alrededor del planeta, sino que se concentra en zonas de debilidad de la corteza terrestre. Sin embargo, es posible investigar las intrusiones magmáticas mediante técnicas gravimétricas, debido a que la densidad del magma suele ser menor que la de la roca sólida circundante. Este contraste de densidades permite monitorear su ascenso y mapear su distribución utilizando gravímetros relativos.

28. ¿Existe o existirá un estudio por región para la ubicación y estimación de bases absolutas? Ya que infiero que las actuales están posicionadas en los puntos más cercanos a las zonas urbanas importantes, pero ¿qué ocurrirá con las que faltan?

El diseño de la Red Gravimétrica Absoluta obedece a una planeación estratégica nacional basada en criterios geodinámicos, geológicos y de cobertura óptima macro, más que a una lógica puramente político-regional o urbana. El plan de expansión contempla la instalación sistemática de bases en zonas remotas o áreas de frontera geológica para rellenar los vacíos de datos actuales. Esto asegura una distribución espacialmente homogénea y científicamente robusta, cuya información enriquecerá de forma integral los modelos regionales posteriores.

29. ¿Es posible contar con los documentos generados de los estudios mencionados con gravimetría? ¿Cuál sería el medio para solicitarlos?

De los cinco ejemplos mostrados, dos de ellos están publicados y pueden descargarse directamente (Esparza et al., 2020; Arzate et al., 2018). Otro corresponde a un estudio de subsidencia realizado para el IMPLAN del municipio de Querétaro. Los dos ejemplos restantes son casos en los que la gravimetría resulta útil y necesaria.

A través de la siguiente liga se puede acceder a las copias de las publicaciones correspondientes a los tres primeros ejemplos:

https://365inegi-my.sharepoint.com/:f/g/personal/gabriela_trejod_inegi_org_mx/IgB8tD6DWkrfQ4FUy8rPjU2_AfTqF_K6bTwFCDZagDDKbvo?e=8PxwBV