

El nivel del mar es mucho más alto que lo supuesto en la mayoría de las evaluaciones de riesgos costeros

Katharina Seeger - Philip S. J. Minderhoud

Síntesis

Los impactos del aumento del nivel del mar y otros riesgos en las costas del mundo vienen determinados por la altura del nivel del mar en la costa y la elevación del terreno¹. La integración correcta de ambos aspectos es fundamental para realizar evaluaciones fiables del aumento del nivel del mar y del impacto de los riesgos costeros^{2,3}, pero a menudo no se tiene debidamente en cuenta ni se lleva a cabo de forma adecuada. En este trabajo demostramos que más del 99 % de las evaluaciones de impacto analizadas manejaron de forma inadecuada los datos sobre el nivel del mar y la elevación del terreno, lo que les llevó a valorar erróneamente el nivel del mar en relación con la elevación costera. Según nuestra revisión bibliográfica, el 90 % de las evaluaciones de riesgos asumen niveles del mar en la costa

basados en modelos de geoide, en lugar de utilizar mediciones reales del nivel del mar. Nuestros metaanálisis a escala global muestran que el nivel del mar costero medido es más alto de lo que se supone en la mayoría de las evaluaciones de riesgos (desviaciones medias [desviación estándar] de 0,27 m [0,76 m] y 0,24 m [0,52 m] para dos geoides de uso común). A nivel regional, sobre todo en el Sur Global, el nivel medio del mar medido puede situarse más de 1 m por encima de los geoides globales, registrándose las mayores diferencias en la región del Indo-Pacífico. En comparación con las hipótesis sobre el nivel del mar costero basadas en el geoide, los valores medidos sugieren que, con una hipotética subida relativa del nivel del mar de 1 m, entre un 31 % y un 37 % más de territorio y entre un 48 % y un 68 % más de personas (lo que elevaría las estimaciones a entre 77 y 132 millones) quedarían por debajo del nivel del mar. Nuestros resultados ponen de relieve la necesidad de reevaluar los estudios de impacto costero existentes y de mejorar los estándares de la comunidad investigadora, lo que podría tener implicaciones para los elaboradores de políticas, la financiación climática y la adaptación costera.



Photo by Robert So: <https://www.pexels.com/photo/flood-gauge-in-calm-waters-with-reflection-36336154/>

Inicio

El aumento del nivel del mar (ANM) supone un alto riesgo para las extensas llanuras costeras de todo el mundo, incluidos los deltas fluviales y las llanuras costeras de baja altitud y densamente pobladas. Según el Sexto Informe de Evaluación (AR6) del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) (escenarios socioeconómicos compartidos (SSP) 1-1,9 a SSP 5-8,5)⁴, se prevé que el nivel medio del mar (MSL) aumente entre 0,28 m y 1,01 m para 2100, en comparación con el registrado entre 1995 y 2014. Teniendo en cuenta las profundas incertidumbres sobre la dinámica de las capas de hielo polares, estas proyecciones podrían aumentar en varios metros⁴. Este aumento se ve amplificado por el movimiento vertical negativo del terreno, es decir, el hundimiento del terreno, un fenómeno natural pero cada vez más acelerado por la actividad humana en las llanuras costeras^{5, 6}, lo que provoca mayores tasas de aumento relativo del nivel del mar (ARNM)^{7, 8}. En consecuencia, los impactos del ARNM y de las inundaciones costeras (y combinadas) están estrechamente relacionados con la elevación costera respecto al nivel del mar. Por lo tanto, evaluar la exposición y la vulnerabilidad costeras requiere el uso de información sobre la elevación, que suelen proporcionar los modelos digitales de elevación (MDE). Al constituir la base fundamental de cualquier evaluación de este tipo de impactos y exposición, la calidad (principalmente la precisión vertical y la resolución espacial) de los MDE es fundamental para la precisión y fiabilidad de los datos derivados, y se aborda ampliamente en la literatura científica (véase, por ejemplo, la ref. 9).

Aunque en varias regiones del Norte Global se dispone de información altimétrica de alta calidad —por ejemplo, obtenida mediante lidar aéreo— (véase, por ejemplo, la ref. 10), los mejores datos altimétricos disponibles para la gran mayoría de las zonas costeras de todo el mundo proceden de satélites. La disponibilidad global de datos altimétricos por satélite ha permitido realizar estudios sin precedentes (a escala mundial) sobre el aumento del nivel del mar y los riesgos costeros (véase, por ejemplo, la ref. 11). Sin embargo, los modelos digitales de elevación (MDE) obtenidos desde el espacio pueden presentar errores verticales de hasta varios metros, contener artefactos de detección o interpolación, o estar desactualizados, lo que afecta a la calidad de las evaluaciones de riesgos costeros, especialmente en llanuras costeras planas y en proceso de hundimiento, así como en deltas fluviales densamente poblados^{10,12,13}. Además de tener en cuenta la incertidumbre vertical de los datos de elevación, el uso de modelos digitales de elevación (MDE) en las evaluaciones de riesgos costeros requiere combinar correctamente la elevación costera con la altura local del nivel del mar y realizar la conversión adecuada a un sistema de referencia vertical común^{2,3}. Mediante una revisión sistemática en la que se evaluaron los recientes estudios sobre los impactos del aumento del nivel del mar y la evaluación de riesgos costeros, constatamos que estos pasos cruciales a menudo no se tenían en cuenta o se realizaban de forma incorrecta. En lugar de considerar la altura real y local del nivel del mar, se suele suponer que el nivel del mar costero es igual al geoide global (o, en algunos casos, incluso al elipsoide), que suele estar desactualizado, al que suelen hacer referencia los MDE globales de acceso abierto cuando están disponibles.

Un geoide es un modelo de superficie equipotencial que aproxima el nivel medio del mar (NMM) basándose en la gravedad y la rotación de la Tierra. Dado que la calidad del geoide depende de las observaciones gravitatorias, las incertidumbres en los modelos globales del geoide pueden alcanzar varios metros en regiones que adolecen de escasez de datos gravitatorios (véanse, por ejemplo, las referencias 14 y 15), situadas principalmente en el Sur Global. Además, la altura real de la superficie del mar no viene determinada únicamente por la gravedad y la rotación de la Tierra, sino también, por ejemplo, por las corrientes oceánicas y la circulación a gran escala, los vientos, las mareas, la temperatura del agua del mar y la salinidad. Como resultado, la altura media temporal de la superficie del mar puede desviarse considerablemente (hasta varios metros) del geoide, y esa diferencia es la denominada topografía dinámica media (TDM)

La omisión generalizada de referenciar adecuadamente la elevación costera al nivel del mar local medido suele dar lugar a una subestimación de la altura real del nivel del mar en la costa en las evaluaciones (globales) de la subida del nivel del mar y de los riesgos costeros, y puede introducir errores de una magnitud tan grande como un siglo de subida del nivel del mar prevista para las regiones afectadas del mundo^{2,3}. Mediante metaanálisis, cuantificamos las implicaciones de las omisiones o errores más frecuentes (es decir, la conversión incorrecta o la ausencia de conversión del sistema de referencia vertical) en las estimaciones del número de personas expuestas y de la superficie costera a escala mundial y regional. Para evaluar las implicaciones más amplias de nuestros hallazgos, cuantificamos la magnitud de la posible subestimación o error de valoración en los estudios de evaluación incluidos en los informes más recientes del IPCC (AR6).

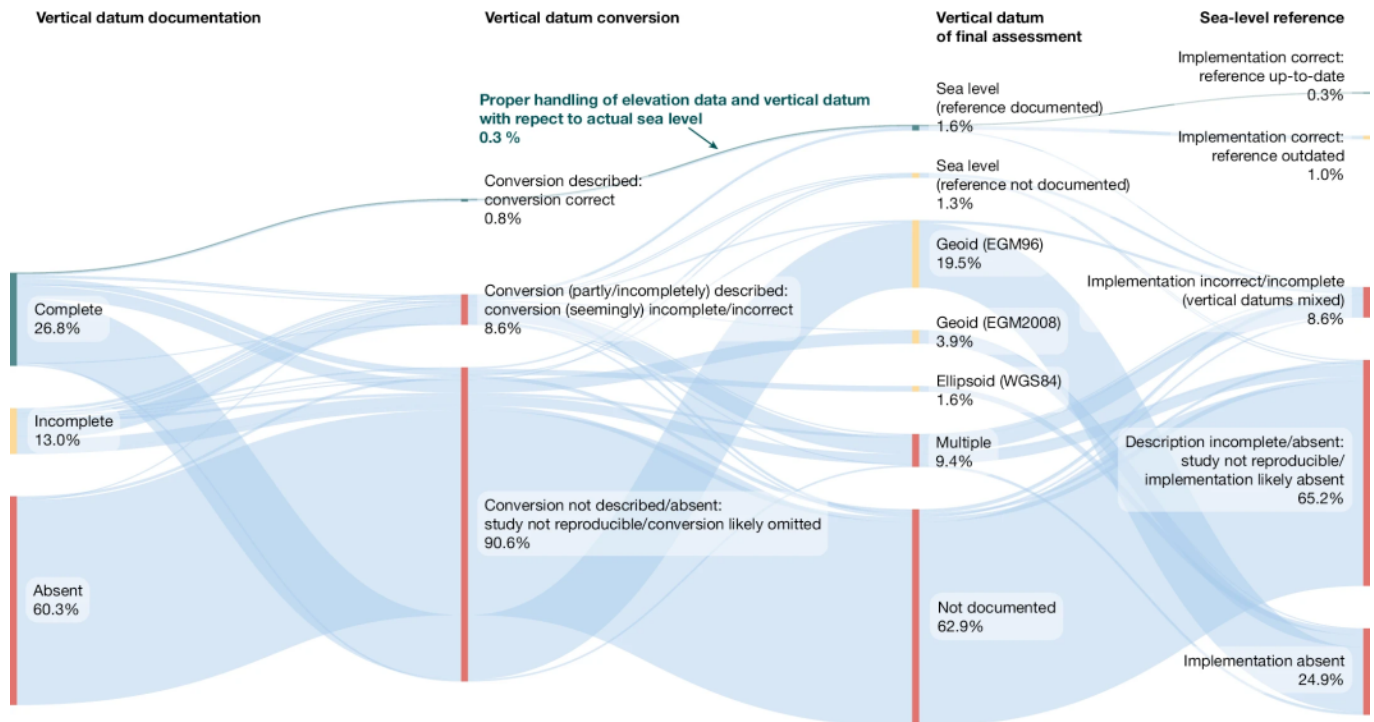
Para facilitar futuras (re)evaluaciones adecuadas de los impactos de los riesgos costeros, hemos convertido varios modelos digitales de elevación (DEM) globales de última generación a la altura del nivel del mar en la costa y los hemos puesto a disposición listos para su uso (véanse las secciones «Disponibilidad de datos» y «Disponibilidad de código»). Concluimos con recomendaciones concretas, como directrices para la documentación de datos y listas de verificación para la revisión por pares, con el fin de garantizar una alineación correcta del datum vertical en futuras publicaciones y mejorar los estándares de investigación de la comunidad. Con ello, pretendemos evitar que se sigan propagando en el futuro metodologías erróneas que causaron este punto ciego en toda la comunidad y dieron lugar a subestimaciones generalizadas de la subida del nivel del mar en las zonas costeras y de las evaluaciones del impacto de los riesgos.

La mayoría de los estudios sobre riesgos costeros carecen de rigor

Hemos evaluado 385 publicaciones científicas revisadas por pares (seleccionadas de forma sistemática mediante una búsqueda bibliográfica guiada por las directrices PRISMA, publicadas entre 2009 y 2025, de las cuales más del 53 % en los últimos 5 años) sobre el aumento del nivel del mar (ANM) y/o el aumento relativo del nivel del mar (ARNM), así como sobre la exposición, la vulnerabilidad y el riesgo de inundaciones costeras, que presentan evaluaciones de riesgos tanto a escala mundial como regional. Analizamos minuciosamente cada una de ellas para comprobar la corrección en el uso de los modelos digitales de elevación (MDE) y en la conversión de sistemas de referencia vertical, así como la integración adecuada de la altura del nivel del mar y la elevación costera, y documentamos la omnipresencia de errores y omisiones (véanse los detalles en la sección «Métodos»; véanse también la figura de [datos ampliados](#) 1, las figuras [complementarias](#) 1 a 3, las tablas [complementarias](#) 1 y 2 y los datos [complementarios](#) 1). La bibliografía evaluada sobre evaluación de riesgos costeros investiga entornos costeros de todo el mundo y en diversas escalas espaciales. Las evaluaciones de impacto se centraron en el aumento del nivel del mar y/o el aumento relativo del nivel del mar (14 %), las marejadas ciclónicas (8 %), los tsunamis (8 %), la exposición costera, la vulnerabilidad y/o el riesgo en términos más generales (41 %), o bien incluían combinaciones de diferentes tipos de riesgos costeros, evaluaciones de exposición, vulnerabilidad y/o riesgo, así como aspectos técnicos y avances metodológicos (29 %). La bibliografía evaluada incluye estudios de llanuras costeras con escasa disponibilidad de datos en África (14 %) y Asia (58 %), que se ven gravemente afectadas por el nivel relativo del mar y las inundaciones costeras¹⁶, la escasa disponibilidad y accesibilidad de los datos, así como la inexactitud de los mismos debido al rendimiento comparativamente deficiente de los modelos globales de gravedad terrestre (véase, por ejemplo, la ref. 17). Además, la bibliografía evaluada incluye evaluaciones de riesgos globales de gran impacto (10 %), que determinan la comprensión científica actual de los efectos de los riesgos costeros a escala mundial.

En la mayor parte de las publicaciones evaluadas (73 %), la documentación sobre la altura del nivel del mar, la elevación costera y los sistemas de referencia verticales utilizados es incompleta (13 %) o brilla por su ausencia (60 %)

Fig. 1: Evaluación de la documentación sobre los datos relativos al nivel del mar y la altitud costera, así como de su uso adecuado y su integración en las evaluaciones de riesgos costeros (n = 385).



La documentación completa del sistema de referencia vertical implica que toda la información necesaria sobre dicho sistema se facilite en el propio estudio o en las referencias citadas de los datos utilizados. La conversión del sistema de referencia vertical es correcta si se describen y aplican adecuadamente todos los pasos de conversión necesarios para alinear correctamente todos los datos con respecto a una referencia vertical común. La aplicación correcta de una referencia del nivel del mar implica el uso de información sobre el nivel del mar (por ejemplo, datos del TDM o de mareógrafos), correctamente alineada con el resto de datos utilizados en la evaluación en una referencia vertical común. Se considera que una referencia del nivel del mar está actualizada si se han utilizado los datos más recientes disponibles sobre el nivel del mar. En el 73 % de los estudios, la documentación sobre el sistema de referencia vertical era incompleta o faltaba por su ausencia. En casi todas las evaluaciones analizadas, los datos sobre el nivel del mar y su correcta alineación con los datos de elevación costera o bien no se documentaron y probablemente se omitió la conversión del sistema de referencia (90,6 %; véase la presunción subyacente en el texto principal), o bien (aparentemente) se realizaron de forma incorrecta (8,6 %). Solo el 0,3 % de los estudios evaluados documentó, convirtió y ajustó adecuadamente los datos de elevación costera con la información del nivel del mar (mostrado en color verde). El diagrama de Sankey con los resultados de este estudio se creó utilizando SankeyMATIC (<https://sankeymatic.com/>).

(fig. 1). Aunque el 27 % de la bibliografía documentaba correctamente el sistema o sistemas de referencia verticales utilizados, solo el 1 % describía y alineaba correctamente la información sobre la altura del nivel del mar en la costa con los datos de elevación del terreno. En la gran mayoría de las evaluaciones analizadas, no se incluía la descripción de la alineación del nivel del mar y la elevación costera ni de la conversión del sistema de referencia, y es probable que se omitiera la conversión (90,6 %). En los estudios restantes, la descripción solía ser incompleta (lo que hacía que el estudio fuera irreproducible) o describía una conversión realizada de forma incorrecta (8,6 %). La alineación correcta de los datos de elevación procedentes de modelos digitales de elevación (MDE) globales con el nivel del mar requiere una conversión del sistema de referencia vertical en combinación con datos adicionales del nivel del mar, ya sea un sistema de referencia local del nivel del mar (por ejemplo, un mareógrafo local y/o un sistema de referencia nacional alineado con el nivel del mar) o la topografía global de la superficie oceánica (por ejemplo, altimetría satelital y/o un producto combinado de boyas, como el TDM). Esperamos que los autores que sean conscientes de esta necesidad y cuenten con los conocimientos necesarios para llevar a cabo con éxito una conversión del datum vertical utilizando datos adicionales del nivel del mar documenten adecuadamente estos pasos metodológicos cruciales (y a menudo laboriosos)

y los conjuntos de datos adicionales. Por lo tanto, suponemos que la ausencia de cualquier documentación sobre la información del nivel del mar (25 %) y/o los pasos metodológicos de conversión (65 %) significa que no se incluyeron datos de altura del nivel del mar o que se omitió la conversión del sistema de referencia a una referencia del nivel del mar. La evaluación repetida en múltiples estudios confirmó la validez de esta suposición (véase, por ejemplo, la ref. 2) (tablas complementarias 3-5).

El problema más destacado en la bibliografía evaluada (presente de forma demostrable en el 25 % y, presumiblemente, en un 63 % más; figs. 1 y 2 y fig. complementaria 3) fue la omisión de la conversión del sistema de referencia, del geoide (en algunos casos incluso del elipsoide) a un nivel de referencia del nivel del mar, asumiendo así implícitamente una altura del geoide de 0 m para que coincidiera con la altura local del nivel del mar. De toda la bibliografía que presentaba este problema, solo encontramos dos artículos que reflexionaran sobre la posible discrepancia entre el geoide y el nivel del mar real^{8, 18}. El segundo problema más frecuente (9 %) fue la conversión de sistemas de referencia incompleta —y, por lo tanto, errónea— y la alineación inadecuada de los sistemas de referencia verticales de los conjuntos de datos implicados (por ejemplo, elevación del terreno, batimetría, nivel del mar y alturas de las infraestructuras costeras). Este conjunto de publicaciones también contiene algunos estudios pioneros en el uso de datos de TDM para crear una referencia del nivel del mar^{19, 20, 21, 22}, lo que indica los primeros indicios de que la comunidad científica es consciente de la necesidad de una alineación correcta entre el nivel del terreno y el del mar. Aunque podría decirse que estos estudios supusieron una mejora con respecto a la mayor parte de los estudios basados en el geoide que descuidaban la alineación con el nivel del mar, adolecen de deficiencias en la documentación de las conversiones y demostraron^{20, 21, 23} una conversión incorrecta de los sistemas de referencia ([Datos ampliados](#), fig. 3). Solo uno (ref. 13) de los 385 estudios evaluados (0,3 %) contaba con una documentación completa sobre los sistemas de referencia verticales y las conversiones, y no presentaba errores de conversión ni de alineación.

Además de evaluar estudios concretos, nuestra revisión bibliográfica también reveló una propagación generalizada y persistente de procedimientos erróneos; por ejemplo, la omisión de la conversión del sistema de referencia del nivel del mar^{24, 25} o la introducción de errores metodológicos en dicha conversión^{19, 22, 26, 27}, lo que, en consecuencia, afecta a los estudios posteriores que aplican los mismos datos y el mismo enfoque de procesamiento^{20, 21, 23, 28} ([Datos complementarios](#) 1). Del mismo modo, las evaluaciones que utilizan marcos de modelización que incluyen datos de elevación en la zona costera también adolecen de los problemas investigados, tales como una documentación incompleta o inexistente del sistema de referencia vertical (véase, por ejemplo, la ref. 29) y la conversión del sistema de referencia (por ejemplo, la ref. 30) y/o la falta de un sistema de referencia del nivel del mar (véase, por ejemplo, la ref. 31) ([Datos complementarios](#) 1).

El nivel del mar costero suele ser más alto que el geoide

Hemos llevado a cabo varios metaanálisis a escala global y regional para cuantificar la magnitud de la representación errónea de la altura del nivel del mar costero derivada de las omisiones o errores de procesamiento más frecuentes en los geoides más utilizados (Métodos y [Datos ampliados](#), fig. 2). Las evaluaciones de impacto que no tienen en cuenta la conversión de sistemas de referencia y, en consecuencia, asumen que la superficie del geoide representa el nivel medio del mar (NMM) dan lugar a una subestimación media global de la altura del nivel del mar costero, tal y como la representa el TDM, de 0,27 m (mediana 0,19 m, desviación estándar (d.e.) 0,76 m) para el EGM96 y de 0,24 m (mediana 0,16 m, d.e. 0,52 m) para el EGM2008 (fig. 2, figs. de [datos ampliados](#) 3 y 4 y figs. [complementarias](#) 4 y 5), lo que refleja los valores indicados en el resumen. En regiones en las que los respectivos geoides presentan un rendimiento inferior

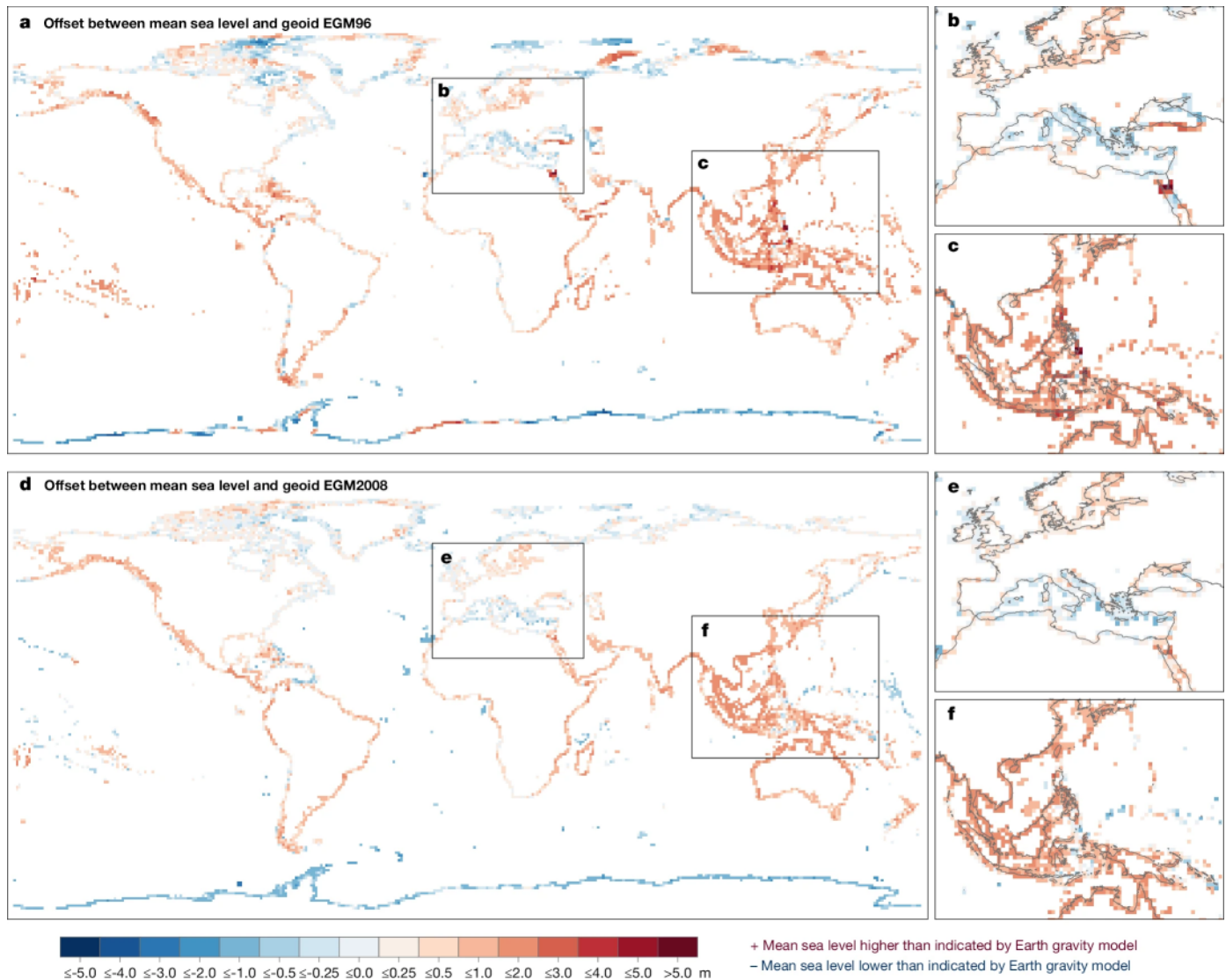
(por ejemplo, mayor imprecisión debida a la escasez de datos), las discrepancias pueden alcanzar varios metros (5,5–7,6 m para el EGM96 y 2,8–3,4 m para el EGM 2008) (fig. 2).

Aunque las estadísticas globales compensan las mayores discrepancias regionales y subregionales, estas parecen ser especialmente acusadas en varias regiones clave, la mayoría de ellas situadas en el Sur Global. Las mayores discrepancias se observan en el Sudeste Asiático (que alberga deltas fluviales extensos, densamente poblados y de baja altitud; figuras de [datos ampliados](#) 6 y 7 y figuras [complementarias](#) 6 y 7) y en la región del Pacífico (que a menudo cuenta con atolones de baja altitud), lo que supone, de media, una subestimación del nivel del mar costero de más de 1 m, tal y como ya se había destacado anteriormente en estudios locales sobre los deltas del Mekong y del Ayeyarwady²³. Otras zonas con grandes discrepancias se encuentran en América Latina, la costa occidental de América del Norte, el Caribe, África, Oriente Medio y la amplia región del Indo-Pacífico. Aunque, en promedio, los modelos de geoide subestiman la altura de la superficie del mar a escala global y regional, a nivel local las discrepancias también pueden ir en la dirección opuesta (por ejemplo, en la costa norte del Mediterráneo, la Antártida y algunas islas del Atlántico y del Pacífico [solo EGM2008]) (fig. 2), lo que da lugar a una sobreestimación de la altura de la superficie del mar. Las discrepancias más bajas entre el nivel medio del mar (MSL) y el geoide se dan principalmente en el este de América del Norte, así como en el norte y el oeste de Europa (Datos [complementarios](#) 2), lo que refleja el mejor rendimiento de los modelos de geoide a la hora de aproximarse a la altura de la superficie del mar en regiones del Norte Global con abundante información. Los continuos avances en la modelización del geoide global se reflejan en los nuevos geoides globales (por ejemplo, el GOCO2025s), pero estos también presentan discrepancias comparativamente grandes con respecto al NMM determinado por TDM (figura [complementaria](#) 9), en particular en las regiones del Sur Global. Por lo tanto, el hecho de omitir la información sobre el nivel del mar y de no realizar una conversión adecuada del geoide a un datum del nivel del mar, especialmente en regiones remotas y con escasa disponibilidad de datos en las que el geoide y el nivel del mar no se alinean bien, traslada inmediatamente estas discrepancias (fig. 3) en forma de errores a las evaluaciones de riesgos y del impacto del aumento del nivel del mar^{24, 32, 33, 34} o a la delimitación de la zona costera de baja altitud (ZCBA)²⁵.

Los estudios que sí incluyen información sobre el nivel del mar, pero que posteriormente omiten convertir los datos de elevación (MDE) y del nivel del mar (por ejemplo, el TDM basado en altimetría o la superficie media del mar (SMM) a un sistema de referencia común antes de combinarlos, introducen errores de desplazamiento entre sistemas de referencia (es decir, la diferencia de altura respectiva entre los distintos sistemas de referencia), presentes en el 9 % de los estudios; véanse, por ejemplo, las refs. 19, 20, 21, 26, 27, 35). Los pocos estudios que sí incorporaron datos de TDM, pero que adolecen^{20, 21} de un error específico de conversión del geoide (Fig. 3 de los [datos ampliados](#)), se acercan estadísticamente a nuestra representación de la altura media global del nivel del mar costero (subestimación de 0,02 m), pero adolecen a nivel regional de discrepancias de hasta varios metros, que oscilan entre –4,1 m y +4,3 m (desviación estándar = 0,76 m) (Datos [complementarios](#) 2).

Una tercera fuente de error se deriva del uso de un sistema de referencia del nivel del mar obsoleto. Los mareógrafos proporcionan información específica a nivel local, pero su capacidad para reflejar adecuadamente el nivel del mar actual puede verse gravemente limitada cuando la serie temporal es demasiado corta, incompleta u obsoleta. Dado que los sistemas de referencia de las mareas pueden haberse establecido hace décadas o incluso siglos, por ejemplo, el Sistema de Referencia Vertical de América del Norte de 1988 (NAVD 88) en 1985 (ref. 36), o el Amsterdams Peil (AP) en el siglo XVII (posteriormente el Normaal AP en 1875)³⁷, su uso es válido siempre que se tengan debidamente en cuenta los cambios en el nivel del mar ocurridos desde su establecimiento. El uso incorrecto de la información sobre la altura del nivel del mar, por ejemplo, procedente de mareógrafos o de altimetría satelital^{21, 23}, sin tener en cuenta los cambios

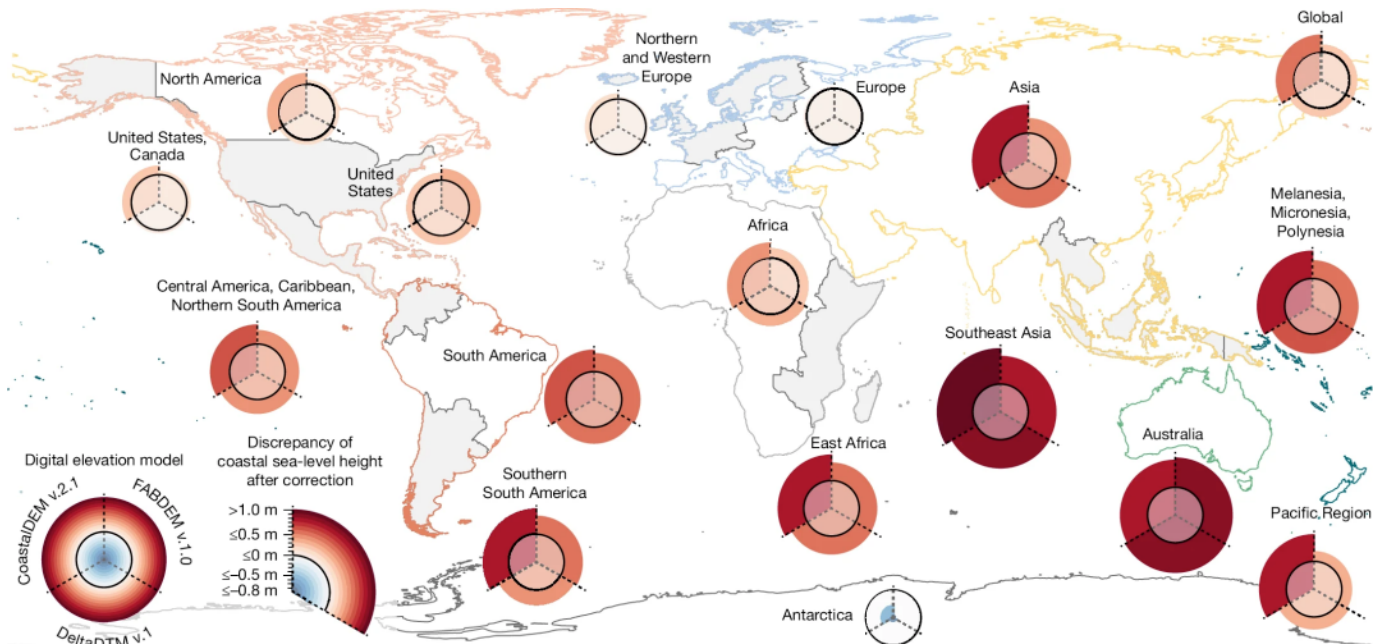
Fig. 2: Diferencia entre la altura del nivel del mar en las costas y los geoides más utilizados en todo el mundo.



a–c, El Modelo Gravitacional de la Tierra de 1996 (EGM96), que sigue utilizándose ampliamente, presenta grandes desviaciones respecto al nivel del mar costero medido —aquí indicado por el MDT44 más reciente disponible—, especialmente pronunciadas a escala regional. d–f, El modelo de geoides EGM2008, más reciente, muestra una mejora general con respecto al EGM96 y ofrece, a escala global, una aproximación ligeramente mejor al nivel del mar costero local. En los países del Norte Global, que cuentan con abundantes datos, los geoides globales representan relativamente bien el nivel del mar costero (por ejemplo, en el este de Estados Unidos, el norte de Europa y Europa occidental), mientras que en el Sur Global, donde los datos son más escasos —en regiones como América Latina, África Oriental y el Indo-Pacífico, con el sudeste asiático y Oceanía como puntos críticos a escala mundial—, los geoides subestiman considerablemente la altura real de la superficie del mar, con desviaciones que oscilan entre varios decímetros y varios metros a nivel local. La gran mayoría de la bibliografía evaluada partía del supuesto de que la superficie del geoides (0 m) representaba el nivel medio del mar (NMM) local actual, lo que introducía la discrepancia mencionada como error en sus respectivas evaluaciones de riesgos costeros y de impacto del aumento del nivel del mar. A efectos de visualización, la escala espacial de los datos mostrados se remuestreó a 1° mediante remuestreo bilineal, mientras que todas las estadísticas se presentan con una resolución espacial de 90 m. Los resultados se visualizaron utilizando QGIS v.3.28.6 y archivos shapefile de la ref. 51 (Licencia de Gobierno Abierto v.3.0).

relativos del nivel del mar ocurridos desde el establecimiento del datum y el inicio del período de proyección, contradice la actualidad implícita de la evaluación de riesgos realizada. Dadas las elevadas tasas de aumento relativo del nivel del mar (ARNM) debidas al hundimiento costero^{5,8}, que superan el aumento global del nivel del mar en muchas

Fig. 3: Discrepancia entre la altura del nivel del mar en la costa que se suele tomar como referencia en las evaluaciones de riesgos y la altura del nivel del mar medida in situ.



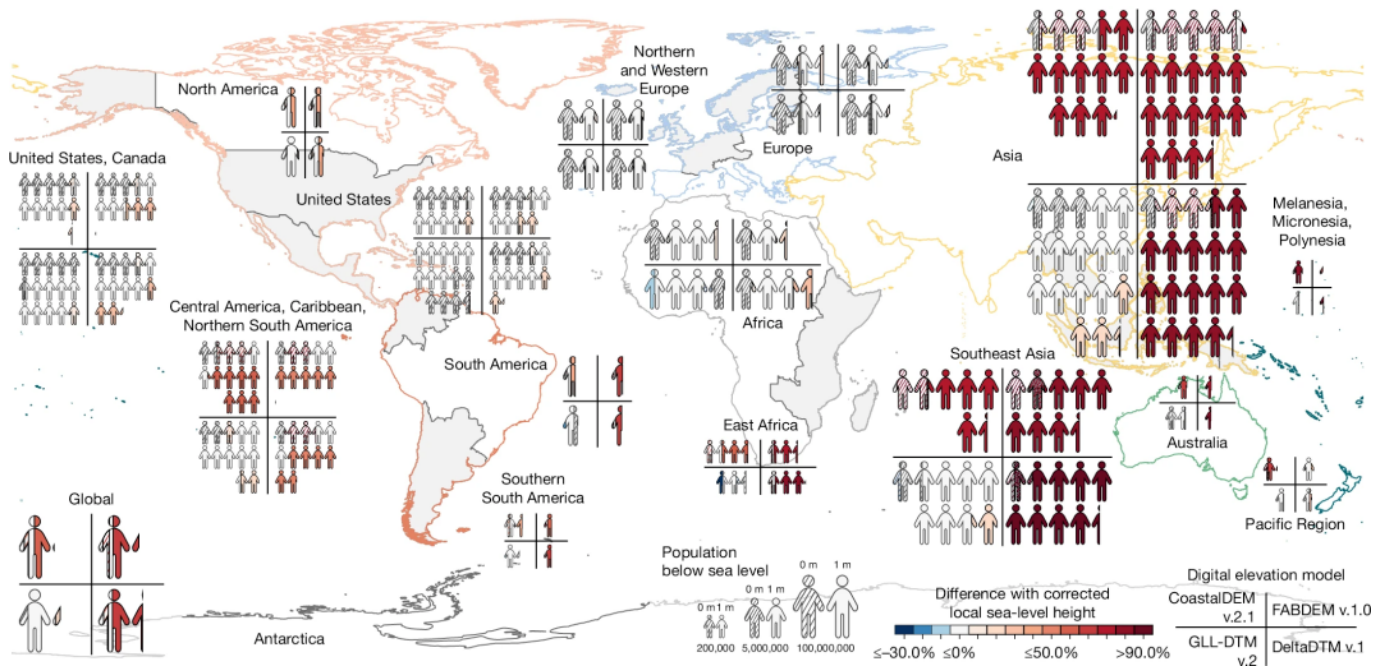
Metaanálisis de la deficiencia más habitual en las evaluaciones existentes de riesgos costeros (es decir, suponer que el geode representa la altura local del nivel del mar), utilizando modelos digitales de elevación (MDE) modernos y disponibles a escala mundial (CoastalDEM v.2.1 (ref. 40); FABDEM v.1.0 (ref. 41) y DeltaDTM v.1 (ref. 43)). La diferencia indicada corresponde a la discrepancia en la altura del nivel del mar costero para cada MDE entre el nivel del mar costero supuesto (es decir, al suponer que la cota de 0 m del respectivo MDE referenciado al geode equivale al nivel medio del mar actual) y nuestra evaluación, en la que alineamos correctamente la cota costera con el nivel medio del mar medido utilizando los datos más recientes de TDM⁴⁴. De media, el nivel del mar costero global es aproximadamente 0,3 m más alto de lo que se suele suponer en las evaluaciones de riesgos costeros, mientras que en el sudeste asiático las discrepancias son mayores, ya que el nivel del mar medido supera los niveles supuestamente anteriores en una media de 0,9–1,1 m. Todas las estadísticas se calculan con una resolución espacial de 90 m. Los contornos de color y las áreas sombreadas en gris indican las regiones y subregiones (figura [complementaria](#) 8). Los resultados se visualizaron utilizando QGIS v. 3.28.6 y archivos shapefile de la ref. 51 (Licencia de Gobierno Abierto v. 3.0).

partes del mundo, especialmente en los deltas asiáticos densamente poblados y las llanuras costeras^{6,8}, las evaluaciones de la exposición costera actual deben tener en cuenta los cambios relativos del nivel del mar desde el establecimiento del datum del mareógrafo o, en el caso de MDT/MSS, desde el período medio de observación³⁸. Del mismo modo, dado que la elevación costera en sí misma tampoco es estática, destacamos la urgencia de utilizar los datos de elevación más recientes y precisos, idealmente corregidos para tener en cuenta el movimiento vertical heterogéneo del terreno³⁹ y el consiguiente cambio de elevación desde la adquisición de los datos³⁸. Sin embargo, la evaluación exhaustiva y la inclusión de los cambios relativos del nivel del mar o de la elevación desde el establecimiento del datum o la práctica de adquisición de la elevación distan mucho de ser una práctica habitual, ya que solo el 22 % de los estudios evaluados utilizan MDE reales (es decir, los datos de elevación más recientes disponibles en el momento de la presentación inicial; Tabla [Complementaria](#) 2), mientras que solo el 9 % incluye evaluaciones de la precisión de los MDE (Fig. 1 de [Datos Adicionales](#)).

Los estudios costeros subestiman la exposición

Hemos realizado varios metaanálisis para evaluar los impactos de los problemas más frecuentes en las evaluaciones existentes de riesgos costeros y hemos cuantificado el posible error de estimación de la exposición presente en las

Fig. 4: Diferencia en la población que queda por debajo del nivel del mar tras un aumento de 1 m del nivel del mar, entre la altura del nivel del mar que se suele suponer y la medida.



Metaanálisis que muestra el impacto de los errores más frecuentes observados en las evaluaciones existentes de riesgos costeros, es decir, la omisión o la alineación incorrecta del nivel del mar costero medido con respecto a la elevación del terreno, utilizando modelos digitales de elevación (MDE) modernos y disponibles a escala mundial (CoastalDEM v.2.1 (ref. 40), FABDEM v.1.0 (ref. 41), GLL-DTM v.2 (ref. 42) y DeltaDTM v.1 (ref. 43)). La referencia adecuada de la elevación costera desde el geoide hasta el nivel medio del mar local (NMM) aumenta las estimaciones de la exposición de la población mundial de 44,0–108,4 millones a 102,8–132,2 millones de personas por debajo del nivel del mar tras un aumento del nivel del mar de 1 m (es decir, entre un 12 % y un 67 %). Las estimaciones de población se basan en WorldPop 2020 (ref. 52) y no tienen en cuenta los cambios demográficos futuros. El mayor aumento de la exposición de la población, es decir, de un 13 a un 96 %, se observa en el sudeste asiático, donde entre 32,1 y 46,9 millones de personas (de las cuales entre 5,0 y 9,3 millones ya residen actualmente por debajo del nivel del mar) quedarían por debajo del nivel del mar tras un aumento de 1 m del nivel del mar. Todas las estadísticas se calculan para la resolución espacial respectiva de los modelos digitales de elevación (DEM). Los contornos de color y las áreas sombreadas en gris indican las regiones y subregiones utilizadas (figura [complementaria 8](#)). Todos los datos relacionados con esta figura se incluyen en los Datos [complementarios 3](#). Los resultados se han visualizado utilizando QGIS v. 3.28.6 y archivos shapefile de la ref. 51 (Open Government Licence v. 3.0), así como iconos modificados a partir de Font Awesome Free v. 7.1.0 (CC-BY 4.0; <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

evaluaciones globales del impacto relativo del aumento del nivel del mar. Utilizamos cuatro de los modelos digitales de elevación (MDE) globales de mayor precisión hasta la fecha, tal y como se proporcionan en sus repositorios de datos^{40, 41, 42, 43}, y aplicamos un escenario de subida del nivel del mar relativo (RSLR) de 1 m, omitiendo la inclusión adecuada de un nivel de referencia del nivel del mar para imitar la metodología más comúnmente aplicada (>90 % de todas las evaluaciones), es decir, suponiendo que la superficie del geoide global representa la altura actual del nivel del mar (fig. 1 y datos [complementarios 3](#)). Comparamos los resultados con los mismos MDE alineados correctamente con el nivel medio del mar local (NMM) medido, mediante la aplicación adecuada de los datos TDM más recientes⁴⁴, lo que puso de manifiesto la discrepancia entre la altura del nivel del mar que se suele asumir (es decir, el geoide) y la altura media del nivel del mar local medida.

Nuestros metaanálisis muestran que las estimaciones mundiales de la superficie terrestre y la población situadas por debajo del nivel medio del mar tras un aumento relativo del nivel del mar de 1 m se subestiman considerablemente cuando no se incluyen los datos del TDM. Una referencia adecuada del nivel del mar mediante el TDM aumenta la superficie expuesta de 294 500–431 100 km² a 460 100–670 000 km² (es decir, entre un 31 % y un 37 %), y la

población de 34,0 a 49,2 millones a entre 77,0 y 132,2 millones de personas (es decir, entre un 48 % y un 68 %) en diferentes modelos digitales de elevación (DEM) basados en el geoide y diversos conjuntos de datos de población (fig. 4 y fig. 5 de [datos ampliados](#)). Esto supone un aumento, respectivamente, de 287 400–470 700 km² y de 55,1–101,6 millones de personas respecto a los 172 700–234 000 km² de superficie y los 21,9–34,5 millones de personas que ya se encontraban por debajo del nivel medio del mar (MSL) hasta la fecha (en comparación con los 114 200–158 600 km² y los 10,5–15,4 millones de personas estimados hasta ahora por debajo del nivel medio del mar sin la referencia TDM). En la región más afectada, el Sudeste Asiático, la superficie y la población estimadas por debajo del nivel medio del mar (NMM) tras un aumento del nivel del mar de 1 m aumentaron hasta un 94 % y un 96 %, respectivamente, tras aplicar una referencia adecuada al TDM, lo que elevó las cifras de exposición a entre 78 000 y 99 700 km² y entre 24,2 y 46,9 millones de personas solo para esta región. Las evaluaciones globales de la ZCBA (los primeros 10 m de elevación costera) basadas en la elevación del geoide subestiman la superficie hasta en un 4 % y la población hasta en un 8 % a escala mundial, mientras que una referencia adecuada al nivel medio del mar (NMM) aumenta la ZCBA global a entre 3,0 y 4,1 millones de km², habitada por entre 0,82 y 1,07 mil millones de personas (Datos [complementarios](#) 3).

Al corregir el error de conversión del geoide detectado en los estudios existentes que aplicaban datos del TDM (es decir, al no corregir el desfase entre los geoides EGM96 y DIR-R4) (Figura de [datos ampliados](#) 9), nuestro metaanálisis reveló que la superficie costera global situada por debajo del nivel medio del mar (NMM) tras un aumento del nivel del mar de 1 m se redujo en un 2 % (11 400 km²), pasando de 527 000 km² a 515 700 km² (de los cuales, respectivamente, 133 100 km² y 117 100 km² ya se encuentran actualmente por debajo del nivel medio del mar). Sin embargo, la población mundial estimada por debajo del nivel medio del mar tras un aumento de 1 m del nivel del mar relativo (NMR) aumentó considerablemente entre un 10 % y un 12 % (entre 8,0 y 14,1 millones), pasando de 68,6 a 108,4 millones a 76,6 a 122,4 millones de personas (de las cuales, respectivamente, entre 18,2 y 27,9 millones y entre 16,5 y 25,2 millones, respectivamente, ya se encuentran actualmente por debajo del nivel medio del mar). Esto demuestra que este error específico de conversión del geoide (figura de [datos ampliados](#) n.º 9) da lugar a una subestimación desproporcionada del nivel medio del mar en las zonas costeras pobladas. En consecuencia, las evaluaciones que utilizan el TDM como referencia del nivel del mar pero que adolecen de este error (demostrado para la ref. 23 y, presumiblemente, en otras más, por ejemplo, las refs. 19 y 45) subestiman la exposición de la población en las regiones afectadas (fig. 4, figs. de [datos ampliados](#) 5–7, figs. [complementarios](#) 6 y 7 y datos [complementarios](#) 3).

A escala local, los problemas de referencia vertical detectados afectan especialmente a las evaluaciones de riesgo en zonas costeras y deltaicas extensas, a menudo densamente pobladas y de baja altitud (figuras de [datos ampliados](#) 6 y 7; figuras [complementarias](#) 6 y 7), y se suman a otras incertidumbres verticales relacionadas con el MDE^{16, 38}. Para evaluar el impacto relativo de los problemas de referencia vertical con respecto a otras incertidumbres (dependientes del MDE) realizamos un metaanálisis detallado del delta del Mekong vietnamita (VMD). El VMD es un ejemplo representativo de muchos paisajes costeros densamente poblados expuestos al aumento del nivel del mar en todo el mundo, ya que es uno de los deltas más grandes, llanos y de menor altitud del planeta². Los resultados indican que la suposición habitual de que los geoides de los MDE representan el nivel del mar local fue la causa de los mayores errores en la evaluación del impacto. No incluir una referencia adecuada del nivel del mar (en nuestro caso, utilizando datos de TDM) añadió un error adicional (específico del MDE) del 10 al 60 % a la evaluación de la elevación relativa, además de la imprecisión inherente a los datos existentes y de los efectos de los cambios en el nivel del mar y la elevación³⁸ (tabla [complementaria](#) 3). La inclusión adecuada de los datos del TDM aumentó la superficie y la población del VMD expuestas a un aumento del nivel del mar de 1 m entre 1 400 y 6 000 km² a entre 18 400 y 24 800 km² (es decir, entre un 72 % y un 95 %), y de 312 900 a 2,4 millones a entre 5,4 y 10,0 millones de personas (es decir, entre un 74 % y un 96 %), lo que confirma los resultados de investigaciones anteriores sobre la elevación del delta del Mekong² (Tabla

[complementaria](#) 4). El error específico de conversión del geoide que se produce debido a una aplicación incorrecta del TDM (figura de [datos ampliados](#) 9) es especialmente notable en las llanuras costeras del sudeste asiático y, una vez corregido según el VMD, la superficie expuesta y la población tras un aumento de 1 m del nivel del mar aumentan, respectivamente, un 18 % (de 20 900 km² a 25 500 km²) y entre un 19 % y un 23 % (de entre 5,5 y 7,9 millones de personas a entre 6,8 y 10,2 millones de personas). Estas cifras ponen de relieve la gran variabilidad espacial y los impactos específicos de cada localidad que tienen los errores de conversión del geoide, los cuales no resultan evidentes en las estadísticas regionales y globales.

Para investigar la magnitud y las consecuencias potenciales de los problemas detectados, más allá de las evaluaciones de riesgo individuales, hemos analizado la inclusión de los estudios evaluados en el último ciclo del AR6 del IPCC. Se han incluido en los informes del AR6 del IPCC analizados un total de 46 estudios evaluados (clasificados de la siguiente manera: aplicación correcta de la referencia del nivel del mar (n=1); aplicación incorrecta de la referencia del nivel del mar (n=9); ausencia de referencia del nivel del mar (n=36)) se incluyen en los informes del AR6 del IPCC analizados, con mayor frecuencia en los capítulos del Grupo de Trabajo II y, en particular (n=25), en el Documento Transversal (CCP2) (figuras [complementarias](#) 10 y 11, tabla [complementaria](#) 5 y datos [complementarios](#) 4). Nuestra comparación cuantitativa de las evaluaciones seleccionadas indica que los errores de conversión de sistemas de referencia²³ (posiblemente en la ref. 45; figura de [datos ampliados](#) 9) y las omisiones de la referencia del nivel del mar (véase, por ejemplo, la ref. 46) pueden haber dado lugar a una subestimación de la exposición costera en los informes del IPCC. Por ejemplo, las estimaciones recogidas en el CCP2 sobre el número de personas que residen en la ZCBA (896 millones; alrededor del 11 % de la población mundial en 2020)⁴⁵ son inferiores a nuestras estimaciones tras aplicar una referencia TDM adecuada (entre 966 millones y 1 070 millones; entre el 12,3 % y el 13,7 % de la población mundial en 2020) (tabla [complementaria](#) 5).

Discusión y recomendaciones

Nuestro estudio pone de manifiesto problemas fundamentales de desajuste entre el nivel del mar y la cota costera en gran parte de la literatura científica, lo que introduce errores y genera grandes incertidumbres en la gran mayoría de las evaluaciones de riesgos costeros y de los impactos del aumento del nivel del mar (ANM) y/o del nivel relativo del mar (ARNM). De todos los estudios evaluados, más del 99 % no utilizó información sobre el nivel del mar, omitió o cometió errores durante la conversión del sistema de referencia del nivel del mar y carecía de documentación crucial sobre el sistema de referencia y el procesamiento, lo que hace que los estudios sean irreproducibles. En la mayoría de los casos, los problemas metodológicos detectados dan lugar a una subestimación de la altura del nivel del mar en la costa, lo que hace que las evaluaciones existentes subestimen la extensión espacial y el momento en que se producirán los futuros impactos del ARNM y de los riesgos costeros. Esto suscita inquietudes sobre la exactitud y la fiabilidad de las evaluaciones existentes y exige una reevaluación de los flujos de trabajo y los resultados. En la actualidad, corremos el riesgo de que los esfuerzos globales por mejorar las mediciones y proyecciones del nivel del mar con una precisión de milímetros (véanse, por ejemplo, las refs. 4 y 47) se vean anulados por la aplicación errónea de datos sobre el nivel del mar y la elevación en las evaluaciones de riesgos costeros y de los efectos del aumento del nivel del mar. Nuestros hallazgos revelan un punto ciego generalizado, que exige un cambio sistémico en la forma en que gestionamos los datos sobre el nivel del mar y la elevación del terreno (costero) en la comunidad científica mundial y más allá.

Una posible explicación de los problemas relacionados con el sistema de referencia vertical detectados podría ser la constelación actual, que deja las complejas transformaciones geodésicas —necesarias para utilizar correctamente los datos de altitud en las evaluaciones de riesgos costeros— en manos de usuarios finales no especializados que

desconocen los pasos de procesamiento requeridos. Una solución para evitar futuros errores derivados de la omisión o la realización incorrecta de la conversión de sistemas de referencia y la referenciación al nivel del mar podría estar en manos de los proveedores de datos, quienes podrían ofrecer productos ya combinados de terreno digital con el nivel del mar para facilitar un uso final adecuado, tal y como hacemos en este artículo (véase la sección «Disponibilidad de datos»). Esto tendría especial sentido en el caso de los modelos digitales de elevación (DEM) desarrollados específicamente para la zona costera y destinados a facilitar las evaluaciones de riesgos costeros, como CoastalDEM^{40, 48} y DeltaDTM⁴³. Aunque hemos abordado cuestiones relacionadas con la elevación costera y el nivel del mar, hemos encontrado indicios de problemas similares en estudios que utilizan datos batimétricos, lo que sugiere la necesidad de futuras investigaciones y una reflexión crítica también en esos ámbitos.

El hecho de que los modelos de geoide se hayan desarrollado y funcionen relativamente bien a la hora de reflejar la altura local del nivel del mar en el Norte Global (por ejemplo, en Estados Unidos y Europa Occidental) podría explicar quizás la excesiva confianza que depositan los científicos del Norte Global en el rendimiento de dichos modelos cuando realizan evaluaciones a escala global o en otras regiones del mundo en las que los modelos de geoide funcionan con menos eficacia. Aunque no investigamos ni comprobamos esta hipótesis más a fondo, la planteamos para instar a que, en futuras investigaciones, se analice con mayor detenimiento la transferibilidad Norte-Sur de los enfoques científicos y los conjuntos de datos. Un ejemplo notable de falta de transferibilidad Norte-Sur se produjo con CoastalDEM v.1.1 (ref. 48), cuyo enfoque de red neuronal utilizado para crear el CoastalDEM se entrenó en el Norte Global (Estados Unidos) y se validó en el Norte Global (Australia), pero funcionó considerablemente peor en otros lugares. Este enfoque, por ejemplo, situó la mitad del delta del Mekong ya muy por debajo del nivel del mar actual, sobreestimando así en gran medida la consiguiente exposición de la población a niveles elevados de agua en la región (figura de [datos ampliados](#) 10).

Nuestros resultados indican que, hasta la fecha, la revisión científica por pares no ha logrado impedir que los errores investigados se publiquen y se difundan en la literatura científica. Las revistas podrían introducir medidas específicas en sus procedimientos de envío y revisión por pares, por ejemplo, proporcionando directrices sobre la documentación de la altitud y el sistema de referencia, solicitando declaraciones a los autores y adoptando listas de verificación para ayudar a los revisores. Además de contribuir a evitar errores al garantizar un uso adecuado de los datos y la conversión del sistema de referencia, y de hacer que los estudios sean transparentes y replicables, estas medidas también sensibilizarán a la comunidad investigadora en general sobre la importancia de una referencia vertical adecuada. Este factor clave cobrará aún más relevancia con la aparición de nuevos conjuntos de datos de altitud (por ejemplo, mediciones de alta precisión del nivel relativo del mar y la altitud costera utilizando datos de ICESat y SWOT), que también requerirán una referencia vertical y una documentación adecuadas cuando se apliquen para evaluaciones posteriores. Además, el uso correcto de los datos sobre el nivel del mar y la altitud terrestre también es fundamental para la integración emergente del movimiento vertical del terreno (VLM) en las proyecciones del RSLR^{5,39,49}. Sugerimos adoptar un enfoque adecuado de «altitud dinámica», que combine múltiples conjuntos de datos de altitud⁵⁰, realice evaluaciones de la incertidumbre y la precisión a partir de múltiples fuentes³⁸ e interprete e integre correctamente las observaciones del VLM⁴⁹, con el fin de crear proyecciones fiables y de vanguardia sobre el futuro RSLR.

This study probably reveals only the tip of the iceberg, as the evaluated publications form only a representative selection of the full body of coastal hazard assessments. It is concerning that many of the evaluated studies (see, for example, refs. 22,24) are used to underpin SLR impact and coastal hazard exposure statements in IPCC reports^{4,47}, which, in turn, inform global disaster risk reduction (United Nations Office for Disaster Risk Reduction) efforts, governments and policymakers worldwide on coastal vulnerability, adaptation needs and timelines, as well as provide quantitative input

for climate risk rankings and loss and damage discussions. We recommend that future IPCC reports include a specific review step to verify the methodological validity of referenced coastal hazard assessments. Apart from scientific publications, our investigations suggest that much grey literature, such as policy-forming documents, governmental reports and other consultancy-based assessments, especially in the more data-sparse Global South, focusing on coastal exposure and risk, contain similar issues. We did not investigate whether the issues identified in the above-mentioned reports and assessments have led to misinformed decision-making, but this cannot be ruled out. Our findings may have far-reaching implications for existing coastal adaptation, protection and mitigation strategies, especially those using satellite-derived elevation data as information base. This necessitates re-evaluating existing coastal hazard assessments to rule out vertical reference and sea-level datum issues and, if those assessments informed decision-making, potentially updating and expediting implementation timelines of coastal adaptation strategies, as exposure thresholds may be reached much sooner than previously projected.

Métodos

Búsqueda y evaluación bibliográfica

Llevamos a cabo una búsqueda y evaluación bibliográfica sistemática y reproducible, siguiendo las normas del proceso «Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses» (PRISMA). Todos los detalles de la búsqueda, selección y evaluación bibliográfica se recogen en las tablas [complementarias](#) 1 y 2. Utilizamos el motor de búsqueda Scopus y aplicamos un término de búsqueda para títulos, resúmenes y palabras clave que abarcaba términos relacionados con entornos costeros de baja altitud, procesos y riesgos, así como información sobre la elevación y la dinámica de la elevación, evaluaciones de impacto y/o de riesgos, proyecciones o valoraciones (tabla [complementaria](#) 1). Se utilizó el motor de búsqueda Scopus, ya que constituye uno de los motores de búsqueda más transparentes. Somos conscientes de la limitación de que Scopus no incluye toda la bibliografía (científica) disponible y, por lo tanto, podría introducir un sesgo en nuestra investigación. Por ello, llevamos a cabo una segunda evaluación bibliográfica independiente de 96 estudios adicionales (90 tras excluir las publicaciones de los propios autores; recopilados de forma no sistemática a través de otros motores de búsqueda) (Figura de [datos ampliados](#) 8) para garantizar que los resultados de la búsqueda estuvieran libres de sesgos. Todos los resultados presentados en el artículo principal se basan únicamente en la bibliografía investigada de forma sistemática a través de Scopus. De los 35 001 documentos iniciales identificados a través de Scopus, solo incluimos artículos científicos revisados por pares, revisiones que incluyeran análisis originales o artículos de datos. Además, limitamos nuestra búsqueda a los últimos 15 años (2009-2025) para incluir únicamente las investigaciones más recientes del periodo en el que tanto los MED globales como los datos TDM globales estaban disponibles y bien establecidos, garantizando así la igualdad de condiciones en cuanto a la disponibilidad de datos globales en todo el mundo para evaluar las metodologías de conversión de sistemas de referencia y de referencia del nivel del mar para las evaluaciones. Se aplicaron otros filtros para excluir determinadas áreas temáticas no relacionadas y palabras clave, así como para limitar la búsqueda al idioma inglés. Esta búsqueda refinada redujo el volumen de bibliografía a 7 241 documentos, que posteriormente se sometieron a dos rondas consecutivas de selección siguiendo criterios de inclusión y exclusión establecidos (figura [complementaria](#) 1 y tabla [complementaria](#) 1). La primera selección se llevó a cabo basándose en el título, el resumen y las palabras clave, y la segunda selección se realizó a partir de un análisis en profundidad del artículo completo y, cuando fue necesario, de sus referencias y material [complementario](#). La selección fue realizada de forma sistemática por K.S., mientras que un subconjunto de 1 000 artículos (primera selección) fue verificado y validado por P.S.J.M., sin que se produjeran decisiones contradictorias. Las publicaciones clasificadas como «sí» y «quizás» en la primera selección se incluyeron en la segunda selección, basada en el artículo completo. Los criterios de inclusión fueron: centrarse en el territorio costero y el nivel del mar en la costa; centrarse en la evaluación de riesgos e impactos costeros; centrarse en las tierras bajas

costeras; y el uso de información de elevación obtenida por satélite. Los principales criterios de exclusión fueron la ausencia de uso de datos de elevación; el uso de lidar aéreo sin combinación con datos de elevación obtenidos por satélite; artículos metodológicos y técnicos sin aplicación práctica; artículos que hacían referencia a datos de elevación citados en fuentes terciarias o posteriores (solo se incluyeron estudios con fuentes primarias o secundarias); y el enfoque en riesgos secundarios (efectos en cadena). La bibliografía finalmente incluida, compuesta por 385 publicaciones, fue sometida a una evaluación en profundidad de sus respectivos datos de investigación y metodología, analizándolos minuciosamente y, cuando fue necesario, también sus referencias secundarias, para evaluar todos los detalles relevantes relacionados con el área de estudio, la distancia a la costa, el enfoque del estudio y/o el tipo de inundación, el número de MDE, los MDE utilizados, la actualidad del MDE, tipo de MDE, cobertura de los MDE, adquisición y técnica, realización de la evaluación de la precisión de los MDE, precisión de los MDE, resolución espacial, disponibilidad de los MDE, datum horizontal utilizado, documentación del datum vertical, conversión del datum vertical, tipo de datum vertical, datum vertical utilizado, aplicación de la referencia del nivel del mar y, cuando fue necesario, comentarios adicionales (Tabla [complementaria 2](#)).

Se accedió a los artículos individuales a través del motor de búsqueda Scopus, ISI Web of Science, Science Direct, Google Scholar o ResearchGate. La evaluación completa de las 385 publicaciones seleccionadas y el posterior análisis de los resultados, siguiendo los criterios de evaluación y la codificación desarrollados, se recogen en la Tabla [complementaria 2](#). Solo se consideraron adecuadas aquellas publicaciones que manejaban todos los conjuntos de datos en un sistema de referencia vertical coherente (es decir, que realizaban una conversión correcta del datum vertical) y que hacían referencia a la información más reciente disponible sobre el nivel del mar en el momento de su publicación (es decir, que utilizaban una referencia del nivel del mar actualizada y una conversión correcta del datum vertical). Dado que la conversión del datum vertical siempre requiere datos adicionales, además de un conjunto de datos de elevación costera basado en un modelo digital de elevación (MDE) (por ejemplo, información sobre el datum vertical, el desfase entre el geoide o los geoides y el nivel de marea, datos sobre la altura del nivel del mar), así como un procedimiento de conversión (que incluya un SIG específico, un entorno de programación o un servicio de conversión), esperamos que los investigadores que realicen una conversión del datum documenten los conjuntos de datos y procedimientos adicionales en sus artículos y/o en la información [complementaria](#) o los datos [complementarios](#). En caso de que un artículo no proporcione ninguna documentación sobre los conjuntos de datos adicionales o los pasos de conversión necesarios, suponemos que no se ha realizado ninguna conversión de sistema de referencia. Se ha confirmado que esta suposición es correcta en numerosos artículos en los que la ausencia de conversión de sistema de referencia resulta evidente en los resultados del estudio.

Por último, evaluamos más de 90 publicaciones adicionales que cumplían los criterios de selección, pero que no se habían incluido en la bibliografía consultada en Scopus. Este subconjunto fue recopilado por separado por los autores mediante búsquedas bibliográficas adicionales y no sistemáticas —por ejemplo, para incluir evaluaciones relevantes a las que hace referencia el IPCC— y sirvió como conjunto de datos independiente para evaluar el posible sesgo presente en nuestro conjunto de datos bibliográficos sistemático obtenido a través de Scopus (Datos [complementarios 1](#)). El conjunto de datos bibliográficos adicional se sometió a la misma evaluación minuciosa (Tabla [complementaria 1](#)). Encontramos resultados casi equivalentes en cuanto a la incidencia y la distribución porcentual de los diversos problemas relacionados con los sistemas de referencia verticales y el nivel del mar (Figura de [datos ampliados 8](#)) que en la revisión sistemática (Fig. 1), lo que sugiere que nuestra revisión sistemática basada en Scopus es imparcial y ofrece resultados representativos del conjunto de la bibliografía existente.

Conversión del sistema de referencia vertical y procesamiento de los MDE

Para obtener la altitud del terreno sobre el nivel del mar local continuo a escala mundial y cuantificar las discrepancias en la altitud del terreno con respecto a los geoides globales o los errores de conversión del sistema de referencia, procesamos cuatro de los MDE más recientes a escala mundial, convirtiéndolos desde su sistema de referencia vertical original al nivel medio del mar (NMM) tal y como indica el producto TDM. Los MDE incluidos fueron CoastalDEM v.2.1 (sistema de referencia vertical original: EGM96, resolución espacial: 90 m × 90 m)⁴⁰, FABDEM v.1.0 (sistema de referencia vertical original: EGM2008, resolución espacial: 30 m × 30 m)⁴¹, GLL-DTM v.2 (sistema de referencia vertical original: MDT53, resolución espacial: 1° × 1°, es decir, unos 1 000 m × 1 000 m)⁴² y DeltaDTM v.1 (sistema de referencia vertical original: EGM2008, resolución espacial: 30 m × 30 m)⁴³. El GLL-DTM v.2, disponible públicamente (referenciado a CNES-CLS13 MDT53), contiene un error de conversión del geoide (es decir, se asumió que el geoide EGM-DIR R4 era igual al EGM96) y no aplica el conjunto de datos TDM más reciente disponible en ese momento. Por lo tanto, obtuvimos de los autores el GLL-DTM v.2 preconvertido (referenciado al EGM96) y llevamos a cabo la conversión del datum vertical a MSL⁴⁴.

Hemos utilizado el último conjunto de datos global disponible MDT HYBRID-CNES-CLS2022⁴⁴, que proporciona la altura de la superficie del mar sobre el geoide (GOCO06s) en todo el mundo, medida mediante altimetría satelital y combinada con información del campo gravitatorio, datos oceanográficos de boyas a la deriva, velocidades de radar de alta frecuencia y perfiles hidrológicos. El conjunto de datos TDM⁴⁴ proporciona información espacialmente continua sobre la altura de la superficie del mar por encima del geoide GOCO06s con una resolución de 0,125°, promediada a lo largo del periodo comprendido entre 1993 y 2021. Por lo tanto, ofrece la información más reciente disponible sobre el nivel medio del mar (NMM) a escala mundial y constituye un sustituto preciso de la información de los mareógrafos locales en dichas regiones. Varios estudios confirman la precisión de los datos del TDM en el rango de los centímetros (véanse, por ejemplo, las refs. 54, 55), aunque la precisión vertical disminuye hasta unos 4 cm a menos de 10 km de la costa⁵⁶. Se trata de un producto de acceso abierto que, si se alinea adecuadamente con la información de elevación, puede utilizarse para ajustar la elevación con respecto al nivel del mar local de forma continua a lo largo de las costas de todo el mundo.

La siguiente sección documenta una conversión del sistema de referencia vertical adecuada, coherente y reproducible de los cuatro MDE, proporcionando todos los conjuntos de datos necesarios, la información sobre el sistema de referencia, los pasos de procesamiento y los entornos de software utilizados, y puede servir de ejemplo para estudios futuros o estudios existentes cuyo objetivo sea reevaluar valoraciones anteriores. Para todos nuestros cálculos, utilizamos el entorno ArcGIS Pro. Para referenciar la elevación costera de los MDE al nivel medio del mar (NMM) según lo indicado por el TDM, se determinaron las compensaciones de los respectivos sistemas de referencia vertical subyacentes (es decir, EGM96, EGM2008 y GOCO06s) (Figura de [datos ampliados 2](#)).

La información sobre el geoide se obtuvo del servicio de cálculo de acceso libre del Centro Internacional de Modelos Globales de la Tierra, perteneciente al Centro Helmholtz de Geociencias (GFZ)⁵⁷. Se obtuvieron datos puntuales sobre la anomalía de altura del geoide con respecto al elipsoide WGS84 para todo el planeta, con una resolución de 0,085° para los geoides EGM96, EGM2008 y GOCO06s, respectivamente. Para cada geoide, los puntos de anomalía de altura se interpolaron en una malla global utilizando funciones de base radial multiquádric, que proporcionaron los resultados de interpolación más precisos y que también se emplean en estudios de modelización del campo gravitatorio^{58, 59}. Posteriormente, los archivos de malla global del geoide se remuestrearon a una resolución espacial común de 90 m × 90 m (para CoastalDEM v.2.1, FABDEM v.1.0 y DeltaDTM v.1) y de 1 000 m × 1 000 m (para GLL-DTM v2) mediante remuestreo bilineal, con el fin de que fueran comparables con la resolución espacial de los MDE a lo largo de todo el

proceso de conversión de sistemas de referencia. Las desviaciones del geoide se determinaron restando el peinado de anomalías de altura del geoide GOCO06s de los peinados de anomalías de altura del geoide EGM96 y EGM2008.

El uso del NMM, tal y como indica el TDM, como referencia vertical para los datos de elevación del terreno requiere la extrapolación de los datos del TDM sobre el terreno. Extraemos los valores puntuales del peinado del MDT HYBRID-CNES-CLS2022 mediante interpolación bilineal en las ubicaciones de los puntos y, posteriormente, los extrapolamos sobre el terreno utilizando un algoritmo de ponderación por distancia inversa y un tipo de vecindad suave con un factor de suavizado de 0,5. El conjunto de datos de peinado resultante se remuestreó a dos resoluciones espaciales de 90 m × 90 m (para CoastalDEM v.2.1, FABDEM v.1.0 y DeltaDTM v.1) y de 1.000 m × 1.000 m (para GLL-DTM v.2), mediante remuestreo bilineal, con el fin de permitir la comparabilidad con la resolución espacial de los MDE y evitar la aparición de posibles artefactos derivados de grandes diferencias en la resolución espacial durante el proceso de conversión de sistemas de referencia.

El procesamiento de los MDE implicó dos procesos principales (figura 2d de los datos ampliados). En primer lugar, los MDE se convirtieron del geoide EGM96 y EGM2008 al geoide GOCO06s añadiendo las correcciones de geoide calculadas para cada uno. De este modo, las referencias verticales de la elevación terrestre derivada de los MDE y la altura de la superficie del mar derivada del TDM se alinean con un datum común (es decir, el GOCO06s), lo cual es un requisito previo para obtener la elevación terrestre sobre el nivel medio del mar (NMM) restando los datos del TDM del MDE correspondiente (Fig. 2d de los [datos ampliados](#)). Para automatizar el procesamiento de la conversión del sistema de referencia vertical de los MDE, aplicamos dos flujos de trabajo de modelos de ArcGIS Pro para convertir los mosaicos de los MDE de los geoides EGM a GOCO06s y, posteriormente, a TDM, conservando al mismo tiempo su resolución espacial y sus propiedades originales (los códigos de Python se facilitan en línea).

Dado que el rendimiento y la fiabilidad de la extrapolación del TDM sobre tierra disminuyen a medida que aumenta la distancia al mar, aplicamos un umbral de distancia de 500 km desde la línea de costa (tal y como la define OpenStreetMap⁶⁰), para el cual consideramos válido este enfoque de conversión del datum vertical del MDE. Convertimos toda la información sobre la elevación del terreno dentro del umbral de distancia al nivel medio del mar (NMM), garantizando así un rendimiento adecuado de la extrapolación y una cobertura completa de las vastas llanuras costeras de baja altitud y los deltas fluviales, como el delta del Ganges-Brahmaputra-Meghna.

Evaluación de la elevación del terreno costero y la altura del nivel del mar, el impacto del ANM y la ZCBA a partir de los MDE globales

Analizamos la elevación del terreno costero y la altura del nivel del mar a escala global mediante la extracción de datos de elevación puntuales a partir de los MDE originales y los convertidos verticalmente, así como de sus respectivas diferencias, a intervalos de 90 m a lo largo de la línea de costa, utilizando la interpolación bilineal de los valores en las ubicaciones puntuales y excluyendo los valores sin datos y las masas de agua antes del peinado. Dado que algunos de los MDE evaluados contienen valores de elevación negativos elevados y poco realistas —que probablemente sean artefactos derivados de la adquisición del MDE de origen y de las etapas de posprocesamiento—, los excluimos aplicando un umbral mínimo de elevación de 7 m por debajo del nivel medio del mar (NMM), lo que representa algunas de las elevaciones más bajas de las llanuras costeras de todo el mundo, como las de los Países Bajos (véase, por ejemplo, la ref. 21). Se calcularon las estadísticas de altitud (incluidos el mínimo, el máximo, la media, la mediana y la desviación estándar) a escala global (tanto incluyendo como excluyendo la Antártida), continental y regional (utilizando

los límites administrativos proporcionados en la ref. 51). Las estadísticas globales que figuran en el texto principal y en las figuras excluyen los resultados correspondientes a la Antártida, ya que allí no vive nadie.

Para mostrar las consecuencias de no tener en cuenta la conversión a un sistema de referencia del nivel del mar, analizamos el impacto de un aumento relativo de 1 m en el nivel del mar (ARNM) sobre la superficie y la población, tanto en modelos digitales de elevación (MDE) con su sistema de referencia vertical original como tras la conversión al nivel medio del mar (NMM), además de calcular la superficie y la población que actualmente ya se encuentran por debajo del nivel del mar. Del mismo modo, analizamos las discrepancias en la superficie y la población dentro de la zona costera de 10 m (ZCBA) cuando se utilizan diferentes MDE con y sin una alineación adecuada con el sistema de referencia vertical. Tras excluir los valores nulos y los valores negativos elevados (es decir, ≤ 7 m por debajo del nivel medio del mar) y enmascarar las masas de agua, reclasificamos los MDE aplicando umbrales de ≤ 1 m y ≤ 10 m, respectivamente. Se calculó la superficie en km² a escala global, continental y regional (figura [complementaria 8](#)) utilizando estadísticas zonales. Limitamos nuestra evaluación únicamente a la elevación relativa y no aplicamos un enfoque de inundación hidrodinámica (por ejemplo, el modelo de «bañera»), ni informamos en nuestros resultados sobre la extensión o los impactos de las inundaciones.

Para estimar la población que actualmente se encuentra por debajo del nivel medio del mar (NMM) con un aumento del nivel del mar relativo (ARNM) de 1 m y dentro de la zona costera de cambio (ZCBA), utilizamos tres conjuntos de datos de población a escala mundial, evitando así posibles sesgos en los recuentos absolutos de población derivados del uso de un único conjunto de datos^{25, 61, 62}. Las incertidumbres en los datos de población y entre ellos se deben a la resolución (tamaño de la celda del peinado) y a la calidad de los datos de entrada (por ejemplo, datos censales) y de los productos auxiliares, así como a los modelos utilizados para calcular las estadísticas (ref. 63 y referencias allí citadas), a la dinámica poblacional diaria y a las inconsistencias en los datos sobre límites administrativos^{61, 62}. Por lo tanto, aplicamos un enfoque basado en múltiples conjuntos de datos y utilizamos datos sin restricciones de WorldPop de 2020 con una resolución espacial de 100m⁵², así como el conjunto de datos LandScan Global (resolución espacial de 800 m) para los años 2020 (a fin de que sean comparables con los datos de WorldPop de 2020)⁶⁴ y los últimos datos disponibles de 2023⁶⁵. En el caso del conjunto de datos WorldPop, utilizamos datos de cada país por separado, ya que el conjunto de datos global solo proporciona datos agregados que darían lugar a una sobreestimación sustancial de la población. Las estimaciones de población se obtuvieron a escala global, continental y regional utilizando estadísticas zonales. La población mundial se calculó mediante el cálculo de peinados binarios para cada MDE (1 si la altitud está entre 7 m por debajo del nivel del mar y ≤ 0 m, ≤ 1 m y ≤ 10 m por encima del nivel del mar, respectivamente) y la agregación de estos a la resolución respectiva (más gruesa) de los conjuntos de datos de población, utilizando la media aritmética. De este modo se obtuvo la fracción en la que cada celda del peinado cumple el requisito de altitud. Posteriormente, el peinado se multiplicó por los datos de población correspondientes y se sumaron espacialmente para estimar la población en cada área de interés, asumiendo implícitamente una distribución equitativa de la población dentro de una misma celda de datos de población. Cabe señalar que esto constituye un factor de incertidumbre, ya que las personas pueden distribuirse de forma desproporcionada dentro de una misma celda del peinado, pero la resolución de los datos impide un mayor nivel de detalle. Otra limitación es que no tenemos en cuenta el cambio demográfico en nuestras proyecciones de exposición y utilizamos cifras de población estáticas. No es posible añadir una proyección del cambio demográfico en nuestros escenarios de ARNM de 1 m, ya que dicha proyección varía en el espacio y en el tiempo. Por lo tanto, el número real de población expuesta en el futuro es probablemente mayor, dado el crecimiento previsto predominante de la población humana, especialmente en las zonas costeras del Sur Global (véanse, por ejemplo, las refs. 11, 66). Todos los valores de elevación costera comunicados, el impacto del ARNM y las estadísticas de la ZCBA,

así como las respectivas desviaciones entre las estimaciones de los MDE con y sin la conversión adecuada del sistema de referencia, se cuantificaron en valor absoluto y como discrepancias en porcentaje (Datos [complementarios 2 y 3](#)).

Evaluación del uso de los estudios analizados en los informes del AR6 del IPCC

Para investigar los vínculos entre la bibliografía evaluada y el último ciclo de informes del IPCC (AR6), hemos comparado los informes de los grupos de trabajo (GT) I-III del AR6 y el Informe Especial sobre el océano y la criósfera en un clima cambiante (SROCC) con nuestra lista de referencias bibliográficas evaluadas. Mediante un protocolo de análisis reproducible y respaldado por un modelo de lenguaje de gran escala (los detalles del protocolo están disponibles en la información complementaria), utilizamos ChatGPT-5 para analizar todas las listas de bibliografía específicas de cada capítulo de los informes del WGI, WGII y WGIII del AR6, así como los artículos transversales al WGII (utilizando archivos .bib disponibles en <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/>, <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/>, <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/>) y de los capítulos del informe del SROCC (utilizando los archivos PDF de los capítulos individuales, disponibles en <https://www.ipcc.ch/srocc/download/>) con el fin de utilizar las referencias de nuestra revisión sistemática (385) y de la bibliografía adicional (96). Constatamos que 46 estudios de nuestra revisión sistemática y 29 de nuestra bibliografía adicional se incluyeron como referencias en los informes del IPCC (Tabla complementaria 5, Figuras complementarias 10 y 11 y Datos complementarios 1 y 4). A continuación, agrupamos estos estudios según las categorías evaluadas: integración adecuada de la referencia del nivel del mar ($n = 1$ y 2 , para la revisión sistemática y la bibliografía adicional, respectivamente); integración incorrecta de la referencia del nivel del mar ($n = 9$ y 7 , para la revisión sistemática y la bibliografía adicional, respectivamente); y ausencia de referencia del nivel del mar ($n = 36$ y 20 , para la revisión sistemática y la bibliografía adicional, respectivamente) (Tabla complementaria 5) y realizamos una comparación cuantitativa (área y/o exposición de la población) entre varios estudios representativos y metodológicamente comparables de cada categoría y los resultados de nuestros metaanálisis, con el fin de cuantificar la magnitud del error en las evaluaciones de impacto existentes, a las que hace referencia el IPCC, como consecuencia de diversos problemas de referencia vertical.

Disponibilidad de datos

Los DEM originales, los datos del MDT y los datos demográficos utilizados en este estudio están disponibles en sus respectivos repositorios en línea^{40, 41, 42, 43, 44, 52}. Los DEM globales procesados, convertidos al nivel del mar local (MSL) utilizando datos de MDT y utilizados para los metaanálisis de este estudio, están disponibles para su reutilización y se pueden consultar en Zenodo (<https://doi.org/10.5281/zenodo.17722669>). Todos los cálculos se realizaron con ArcGIS Pro (<https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-pro/overview>) y el diseño se llevó a cabo con QGIS (.). Los resultados de la evaluación exhaustiva de la bibliografía, el protocolo del flujo de trabajo y todas las estadísticas de los metaanálisis sobre el impacto costero están disponibles en los Datos complementarios y en la [Información complementaria](#).

Disponibilidad del código

Los códigos utilizados para este artículo están disponibles aquí, en Zenodo (<https://doi.org/10.5281/zenodo.17953234>).

Referencias:

1. Gesch, D. B. Best practices for elevation-based assessments of sea-level rise and coastal flooding exposure. *Front. Earth Sci.* 6, 230 (2018).
2. Minderhoud, P. S. J., Coumou, L., Erkens, G., Middelkoop, H. & Stouthamer, E. Mekong delta much lower than previously assumed in sea-level rise impact assessments. *Nat. Commun.* 10, 3847 (2019).
3. Seeger, K. et al. Assessing land elevation in the Ayeyarwady Delta (Myanmar) and its relevance for studying sea level rise and delta flooding. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 27, 2257–2281 (2023).
4. IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2023).
5. Shirzaei, M. et al. Measuring, modelling and projecting coastal land subsidence. *Nat. Rev. Earth Environ.* 2, 40–58 (2021).
6. Ohenhen, L. O. et al. Global subsidence of river deltas. *Nature* 649, 894–901 (2026).
7. Ericson, J. P., Vörösmarty, C. J., Dingman, S. L., Ward, L. G. & Meybeck, M. Effective sea-level rise and deltas: causes of change and human dimension implications. *Global Planet. Change* 50, 63–82 (2006).
8. Nicholls, R. J. et al. A global analysis of subsidence, relative sea-level change and coastal flood exposure. *Nat. Clim. Change* 11, 338–342 (2021).
9. Hinkel, J. et al. Uncertainty and bias in global to regional scale assessments of current and future coastal flood risk. *Earths Future* 9, e2020EF001882 (2021).
10. Schumann, G. J.-P. & Bates, P. D. The need for a high-accuracy, open-access global DEM. *Front. Earth Sci.* 6, 225 (2018).
11. Neumann, B., Vafeidis, A. T., Zimmermann, J. & Nicholls, R. J. Future coastal population growth and exposure to sea-level rise and coastal flooding – a global assessment. *PLoS One* 10, e0131375 (2015).
12. Fisher, P. F. & Tate, N. J. Causes and consequences of error in digital elevation models. *Prog. Phys. Geogr.* 30, 467–489 (2006).
13. Kulp, S. & Strauss, B. H. Global DEM errors underpredict coastal vulnerability to sea level rise and flooding. *Front. Earth Sci.* 4, 36 (2016).
14. Üstün, A., Abbak, R. A. & Zeray Öztürk, E. Height biases of SRTM DEM related to EGM96: from a global perspective to regional practice. *Surv. Rev.* 50, 26–35 (2016).
15. Fusami, A. A., Edan, J. D. & Takana, A. Local orthometric height based on a combination of GPS-derived ellipsoidal height and geoid model: a review paper. *J. Geod. Sci.* 13, 20220158 (2023).
16. Becker, M. et al. Coastal flooding in Asian megadeltas: recent advances, persistent challenges, and call for actions amidst local and global challenges. *Rev. Geophys.* 62, e2024RG000846 (2024).
17. Nyoka, C. J., Din, A. H. M., Pa'suya, M. F. & Omar, A. H. Rigorous evaluation of global geopotential models for geoid modelling: a case study in Kenya. *J. Afr. Earth. Sci.* 194, 104612 (2022).
18. Edmonds, D. A., Caldwell, R. L., Brondizio, E. S. & Siani, S. M. O. Coastal flooding will disproportionately impact people on river deltas. *Nat. Commun.* 11, 4741 (2020).
19. Muis, S. et al. A comparison of two global datasets of extreme sea levels and resulting flood exposure. *Earths Future* 5, 379–392 (2017).
20. Vernimmen, R., Hooijer, A. & Pronk, M. New ICESat-2 satellite LiDAR data allow first global lowland DTM suitable for accurate coastal flood risk assessment. *Remote Sens* 12, 2827 (2020).
21. Vernimmen, R. & Hooijer, A. New LiDAR-based elevation model shows greatest increase in global coastal exposure to flooding to be caused by early-stage sea-level rise. *Earths Future* 11, e2022EF002880 (2023).
22. Kirezci, E. et al. Projections of global-scale extreme sea levels and resulting episodic coastal flooding over the 21st century. *Sci. Rep.* 10, 11629 (2020).
23. Hooijer, A. & Vernimmen, R. Global LiDAR land elevation data reveal greatest sea-level rise vulnerability in the tropics. *Nat. Commun.* 12, 3592 (2021).
24. Muis, S., Verlaan, M., Winsemius, H. C., Aerts, J. C. J. H. & Ward, P. J. A global reanalysis of storm surges and extreme sea levels. *Nat. Commun.* 7, 11969 (2016).
25. MacManus, K., Balk, D., Engin, H., McGranahan, G. & Inman, R. Estimating population and urban areas at risk of coastal hazards, 1990–2015: how data choices matter. *Earth Syst. Sci. Data* 13, 5747–5801 (2021).
26. Zhang, S. et al. Quantitative risk assessment of typhoon storm surge for multi-risk sources. *J. Environ. Manage.* 327, 116860 (2023).
27. Wu, S. et al. Climate change and urban sprawl: unveiling the escalating flood risks in river deltas with a deep dive into the GBM river delta. *Sci. Total Environ.* 947, 174703 (2024).
28. Kirezci, E. et al. Global dataset of extreme sea levels and coastal flood impacts over the 21st century. *Data* 10, 15 (2025).
29. Bolleter, J., Grace, B., Hooper, P. & Foster, S. Wet-bulb temperature and sea-level rise in the United Arab Emirates – planning responses. *Plan. Pract. Res.* 36, 408–429 (2021).
30. Lincke, D. & Hinkel, J. Coastal migration due to 21st century sea-level rise. *Earths Future* 9, e2020EF001965 (2021).
31. Ghoms, F. E. K. et al. Sea level rise and coastal flooding risks in the Gulf of Guinea. *Sci. Rep.* 14, 29551 (2024).
32. Brown, S. et al. What are the implications of sea-level rise for a 1.5, 2 and 3 °C rise in global mean temperatures in the Ganges-Brahmaputra-Meghna and other vulnerable deltas? *Reg. Environ. Change* 18, 1829–1842 (2018).
33. Gebremichael, E. et al. Assessing land deformation and sea encroachment in the Nile Delta: a radar interferometric and inundation modeling approach. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 123, 3208–3224 (2018).
34. Merkens, J.-L., Lincke, D., Hinkel, J., Brown, S. & Vafeidis, A. T. Regionalisation of population growth projections in coastal exposure analysis. *Clim. Change* 151, 413–426 (2018).
35. Voudoukas, M. I. et al. African heritage sites threatened as sea-level rise accelerates. *Nat. Clim. Change* 12, 256–263 (2022).
36. NOAA. North American Vertical Datum of 1988 (NAVD 88) (NOAA, 2018).
37. NAP. Arise of the NAP (NAP, n.d.).
38. Seeger, K. & Minderhoud, P. S. J. Attributing uncertainties in elevation assessments for data-sparse coastal lowlands using global elevation models: a globally applicable approach showcasing the Vietnamese Mekong Delta. Preprint available at Research Square <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-7706762/v1> (2025).
39. Minderhoud, P. S. J., Middelkoop, H., Erkens, G. & Stouthamer, E. Groundwater extraction may drown mega-delta: projections of extraction-induced subsidence and elevation of the Mekong delta for the 21st century. *Environ. Res. Commun.* 2, 011005 (2020).
40. Kulp, S. A. & Strauss, B. H. CoastalDEM, v.2.1. Climate Central <https://go.climatecentral.org/coastaldem> (2021).
41. Hawker, L. & Neal, J. FABDEM, v.1.0. University of Bristol. <https://doi.org/10.5523/bris.25wfy0f9ukoge2gs7a5mqpq2j7> (2021).
42. Vernimmen, R. GLL_DTM, v.2. Zenodo <https://doi.org/10.5281/zenodo.7228643> (2022).
43. Pronk, M. DeltaDTM: a global coastal digital terrain model, v.1, 4TU. ResearchData <https://doi.org/10.4121/21997565.v4> (2024).

44. CLS. Hybrid Mean Dynamic Topography CNES-CLS22-CMEMS2020. CNES <https://doi.org/10.24400/527896/a01-2024.010> (2022).
45. Haasnoot, M. et al. Long-term sea-level rise necessitates a commitment to adaptation: a first order assessment. *Clim. Risk Manage.* 34, 100355 (2021).
46. Jones, B. & O'Neill, B. C. Spatially explicit global population scenarios consistent with the shared socioeconomic pathways. *Environ. Res. Lett.* 11, 084003 (2016).
47. IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2021).
48. Kulp, S. A. & Strauss, B. H. CoastalDEM: a global coastal digital elevation model improved from SRTM using a neural network. *Remote Sens. Environ.* 206, 231–239 (2018).
49. Minderhoud, P. S. J., Shirzaei, M. & Teatini, P. From InSAR-Derived Subsidence to Relative Sea-Level Rise – A Call for Rigor. *Earth's Future* 13, e2024EF005539 (2025).
50. Seeger, K., Minderhoud, P. S. J., Hauser, L. T., Teatini, P. & Woillez, M.-N. How to Assess Coastal Flood Risk in Data-Sparse Coastal Lowlands? Accurate Information on Land Elevation Is Key. A Question of Development No. 17 (Agence Française Développement, 2024).
51. United Nations World Food Programme. World Administrative Boundaries - Countries and Territories. Huwase Data Hub <https://public.opendatasoft.com/explore/dataset/world-administrative-boundaries/export/?flg=en-us> (2019).
52. WorldPop & CIESIN. Population Counts: unconstrained Individual Countries 2020 (100 m Resolution). Global High Resolution Population Denominators Project – Funded by The Bill and Melinda Gates Foundation (OPP1134076) (2018).

Vínculos relacionados:

- La Alianza Global Jus Semper
 - Caroline Zickgraf: [Cambio Climático y Migración: Mitos y Realidades](#)
 - Johan Rockström et al: [Identificando un Pasaje Seguro y Justo para las Personas y el Planeta](#)
 - Johan Rockström et al: [Los Límites Seguros y Justos del Sistema Tierra](#)
 - Will Steffen, Johan Rockström et al: [Trayectorias del Sistema Tierra en el Antropoceno](#)
 - Linn Persson et al: [Fuera del Espacio Operativo Seguro del Límite Planetario para Entidades Noveles](#)
 - Los Editores de Monthly Review: [Los Informes Filtrados del IPCC](#)
-

- ❖ **Acerca de Jus Semper:** La Alianza Global Jus Semper aspira a contribuir a alcanzar un etos sostenible de justicia social en el mundo, donde todas las comunidades vivan en ámbitos verdaderamente democráticos que brinden el pleno disfrute de los derechos humanos y de normas de vida sostenibles conforme a la dignidad humana. Para ello, coadyuva a la liberalización de las instituciones democráticas de la sociedad que han sido secuestradas por los dueños del mercado. Con ese propósito, se dedica a la investigación y análisis para provocar la toma de conciencia y el pensamiento crítico que generen las ideas para la visión transformadora que dé forma al paradigma verdaderamente democrático y sostenible de la Gente y el Planeta y NO del mercado.
- ❖ **Autores y afiliaciones:** Grupo de Geografía del Suelo y Paisaje, Universidad e Investigación de Wageningen, Wageningen, Países Bajos; Departamento de Ingeniería Civil, Medioambiental y Arquitectónica, Universidad de Padua, Padua, Italia: **Katharina Seeger - Philip S. J. Minderhoud**. Instituto de Geografía, Universidad de Colonia, Colonia, Alemania: **Katharina Seeger**. Departamento de Aguas Subterráneas y Seguridad Hídrica, Instituto de Investigación Deltares, Utrecht, Países Bajos: **Philip S. J. Minderhoud**.
- ❖ **Acerca de este artículo:** Este trabajo se publicó originalmente en inglés en la revista "Nature", n.º 652, páginas 657-388 (2026) <https://www.nature.com/articles/s41586-026-10196-1>. **Derechos y autorizaciones:** Este artículo está bajo una Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional, que permite su uso, compartir, adaptar, distribuir y reproducir en cualquier medio o formato, siempre que se cite debidamente al autor o autores originales y la fuente, se proporcione un enlace a la licencia Creative Commons y se indique si se han realizado cambios. Las imágenes u otro material de terceros en este artículo están incluidos en la licencia Creative Commons del artículo, a menos que se indique lo contrario en una línea de crédito al material. Si el material no está incluido en la licencia Creative Commons del artículo y su uso previsto no está permitido por la normativa legal o excede el uso permitido, deberá obtener permiso directamente del titular de los derechos de autor. Para ver una copia de esta licencia, visite: <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.
- ❖ **Agradecimientos:** Agradecemos a A. Collins, R. Kopp y Z. Siyum por sus exhaustivos comentarios y sugerencias, que nos han ayudado a perfilar aún más nuestras evaluaciones y han reforzado considerablemente el manuscrito. Agradecemos a A. Bolten, M. van der Meij y L. Steinbuch por facilitarnos el uso de las estaciones de trabajo y la capacidad de los servidores necesarios para llevar a cabo el procesamiento global, así como por su apoyo durante la publicación de los datos; y a R. Vernimmen por proporcionarnos el GLL DTM v.2 referenciado a EGM96. Para este artículo, hemos profundizado más que nunca. Agradecemos a J. Pernack y D. Brill por despertar y fomentar una curiosidad científica inquebrantable por la Tierra. Agradecemos la inspiración y recordamos a H.-J. Schuurman y F. Verspaget. Brindemos por los locos y por una pareja maravillosa. Damos las gracias a los hermanos Arthur y Luuk Minderhoud por proporcionar a P.S.J.M. amplias oportunidades para la contemplación nocturna, lo que desempeñó un papel clave en la elaboración de este manuscrito. También agradecemos a nuestras familias, que nos han apoyado, y a una abuela maravillosa. Por último, rendimos homenaje al curioso «tigre de papel» que se convirtió en un elegante león. Que disfrute del sol de la mañana y duerma plácidamente esta noche. P.S.J.M. agradece la financiación de la Fundación Neerlandesa para la Ciencia (NWO) en el marco de la convocatoria NWO Veni TTW 2022 (Ciencias Aplicadas y Técnicas) con el proyecto: «Deltas que se hunden: por qué se hunden los deltas y qué hacer al respecto» (n.º 20231). Este trabajo recibió financiación para apoyar la publicación de acceso abierto por parte del Ministerio neerlandés de Agricultura, Pesca, Seguridad Alimentaria y Naturaleza en el marco del Programa de Base de Conocimiento (KB) de la Universidad y Centro de Investigación de Wageningen.
Contribuciones: P.S.J.M. y K.S. conceptualizaron el estudio. K.S. y P.S.J.M. diseñaron la metodología. K.S. se encargó de la revisión bibliográfica y el procesamiento de datos. K.S. y P.S.J.M. se encargaron del análisis y la interpretación de los resultados. P.S.J.M. y K.S. se encargaron de la selección de referencias del IPCC. K.S. y P.S.J.M. colaboraron en la visualización. P.S.J.M. colaboró en la obtención de la financiación. K.S. y P.S.J.M. se encargaron de la administración del proyecto. P.S.J.M. supervisó el estudio. K.S. y P.S.J.M. redactaron el borrador original y revisaron y editaron el artículo final. **Autor correspondiente:** Dirigir la correspondencia a [Katharina Seeger](#) o [Philip S. J. Minderhoud](#).
- ❖ **Declaraciones éticas: Conflictos de intereses.** Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses. Información sobre la revisión por pares: Nature agradece a Alexandra Collins, Robert Kopp, Zenebe Siyum y al resto de revisores anónimos su contribución a la revisión por pares de este trabajo. Los [informes de los revisores están disponibles](#). Información adicional: Nota de la editorial: Springer Nature se mantiene neutral con respecto a las reivindicaciones jurisdiccionales que aparecen en los mapas publicados y a las afiliaciones institucionales. [Figuras y tablas con datos ampliados](#). [Información complementaria](#).
- ❖ **Cite este trabajo como:** Katharina Seeger - Philip S. J. Minderhoud: El nivel del mar es mucho más alto que lo supuesto en la mayoría de las evaluaciones de riesgos costeros — La Alianza Global Jus Semper Global Alliance, agosto 2026.
- ❖ **Etiquetas:** capitalismo, democracia, nivel del mar, cambio climático, riesgos costeros, sostenibilidad.
- ❖ La responsabilidad de las opiniones expresadas en este trabajo corresponde exclusivamente a su(s) autor(es), y su publicación no constituye necesariamente un respaldo de La Alianza Global Jus Semper.



Bajo licencia de Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional.
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es>

© 2026. La Alianza Global Jus Semper -- Boletín Jus Semper, (ISSN: 3071-6012)
Portal en red: https://www.jussemper.org/Inicio/Index_castellano.html