

ARTICULO DE INVESTIGACION

Sobre el posible uso de la fuerza hidráulica para ayudar a construir la pirámide escalonada de Saqqara

Xavier Landreau¹*, Guillaume Piton², Guillermo Morin³, Pascal Bartout⁴, Laurent Touchart⁴, Christophe Giraud⁵, Jean-Claude Barré⁶, Cyrielle Guerin¹, Alexis Alibert¹, Charly Lallemand¹

1 Paleotécnico., París, Francia, 2 Univ. Grenoble Alpes, INRAE, CNRS, IRD, Grenoble INP, IGE, Grenoble, Francia, 3 Sicame Group, Arnac-Pompadour, Francia, 4 CEDETE—Centre d'études sur le Développement des Territoires et l'Environnement, Université d'Orléans, Orléans, Francia, 5 AtoutsCarto, Bourges, Francia, 6 Verilux International, Briennon-sur-Armançon, Francia

* xavier.landreau@cea.fr, paleotechnic@pm.me



Abstracto

La pirámide escalonada de Zoser en Saqqara, Egipto, se considera la más antigua de las siete pirámides monumentales construidas hace unos 4.500 años. A partir de un análisis transdisciplinario, se descubrió que es posible que se haya utilizado un elevador hidráulico para construir la pirámide. Basándonos en nuestro mapeo de las cuencas hidrográficas cercanas, demostramos que una de las inexplicables estructuras masivas de Saqqara, el recinto de Gisir el-Mudir, tiene las características de una presa de contención con la intención de atrapar sedimentos y agua. La topografía más allá de la presa sugiere un posible lago efímero al oeste del complejo de Zoser y un flujo de agua dentro del "Foso Seco" que lo rodea. En la sección sur del foso, demostramos que la monumental estructura lineal excavada en la roca que consta de compartimentos profundos sucesivos combina los requisitos técnicos de una instalación de tratamiento de agua: un estanque de sedimentación, un estanque de retención y un sistema de purificación. Juntos, el Gisir el-Mudir y la sección sur interior del Foso Seco funcionan como un sistema hidráulico unificado que mejora la calidad del agua y regula el flujo para fines prácticos y necesidades humanas. Finalmente, identificamos que la arquitectura interna de la pirámide escalonada es consistente con un mecanismo de elevación hidráulica nunca antes reportado. Los arquitectos antiguos pueden haber levantado las piedras del centro de la pirámide a la manera de un volcán utilizando el agua libre de sedimentos de la presa. Los antiguos egipcios son famosos por su dominio de la hidráulica mediante canales para riego y barcazas para transportar piedras de gran tamaño. Este trabajo abre una nueva línea de investigación: el uso de la fuerza hidráulica para erigir las enormes estructuras construidas por los faraones.

ACCESO ABIERTO

Cita: Landreau X, Piton G, Morin G, Bartout P, Touchart L, Giraud C, et al. (2024) Sobre el posible uso de la fuerza hidráulica para ayudar a construir la pirámide escalonada de Saqqara. PLoS ONE 19(8): e0306690. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0306690>

Editor: Joe Uziel, Autoridad de Antigüedades de Israel, ISRAEL

Recibido: 7 de diciembre de 2023

Aceptado: 22 de junio de 2024

Publicado: 5 de agosto de 2024

Derechos de autor: © 2024 Landreau et al. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la [Licencia de Atribución Creative Commons](#), que permite el uso, distribución y reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que se dé crédito al autor original y la fuente.

Declaración de disponibilidad de datos: Todos los datos relevantes se encuentran en el manuscrito y en los [archivos de información complementaria](#). Los códigos informáticos están disponibles a pedido.

Financiación: The Sicame Group, The AtoutsCarto Company y The Verilux Company aportaron su apoyo en forma de salarios para GM, CG y J-CM, respectivamente. Las funciones específicas de estos autores se detallan en la sección "Contribuciones de los autores".

1 Introducción

El complejo funerario del rey Zoser, construido en Saqqara, Egipto, alrededor del año 2680 a. C., se considera un hito importante en la arquitectura monumental. Es el primero en revelar dos innovaciones cruciales: una forma piramidal para la tumba del faraón y el uso exclusivo de piedras labradas para la mampostería. En la práctica, también es revolucionario por la capacidad de extraer y levantar piedras.

Conflictos de intereses: Los autores han leído la política de la revista y tienen los siguientes conflictos de intereses: GM, CG y J-CM son empleados remunerados de The Sicame Group, The Atoutscarto Company y The Verilux Company, respectivamente. No existen patentes, productos en desarrollo o productos comercializados asociados con esta investigación que declarar. Esto no altera nuestra adhesión a PLOS ONE. Políticas sobre el intercambio de datos y materiales.

por millones antes de apilarlos con precisión [1]. Los complejos logros visibles de Djoser son tales que su arquitecto, Visir y Gran Sacerdote de Ra, Imhotep, fue deificado por el Imperio Nuevo.

Los conocimientos y las innovaciones implementados en el complejo mortuario de Djoser influyeron profundamente. Estos desarrollos dieron como resultado un aumento sustancial en el tamaño de los megalitos [2], lo que llevó a pirámides de dimensiones espectaculares, como las de las mesetas de Meidum, Dahshur y Giza. En menos de 150 años, el peso promedio de las piedras grandes típicas se multiplicó por 8 libras y pasó de 300 libras para la pirámide de Zoser a más de 2,5 toneladas para los bloques estructurales de la pirámide de Kefrén [3]. Para los dinteles más grandes, el peso aumenta en dos órdenes de magnitud, con varios bloques de 50 a 100 toneladas para la pirámide de Keops. En este corto período de tiempo en la escala de la historia humana, los egipcios transportaron y levantaron unos 25 millones de toneladas de piedras [4] para construir siete pirámides monumentales. Suponiendo un trabajo anual de 300 días a un ritmo de 10 horas diarias, es decir, 450.000 horas repartidas en menos de 150 años, se requiere una organización técnica y logística capaz, de media, de cortar, mover y ajustar unas 50 toneladas de bloques de piedra por hora. Incluso si se admite que no todos los bloques de las pirámides están ajustados con precisión milimétrica, la cantidad de trabajo realizado es verdaderamente notable. Curiosamente, las pirámides construidas posteriormente en Egipto tendieron a ser más pequeñas con el tiempo y nunca volvieron a alcanzar el volumen de las estructuras monumentales del Imperio Antiguo.

Como actualmente faltan fuentes auténticas del ámbito laboral de los arquitectos de pirámides, Todavía no existe un modelo holístico generalmente aceptado para la construcción de pirámides. Aunque muchas publicaciones detalladas dedicadas a los procedimientos de construcción de pirámides han proporcionado elementos tangibles [5, 6], por lo general explican pirámides más recientes y mejor documentadas, pero también más pequeñas [7]. Estas técnicas podrían incluir rampas, grúas, cabrestantes, elevadores de palanca, montacargas, pivotes o una combinación de ellos [8-10]. Los estudios de los sitios de construcción de la pirámide también revelaron un alto nivel de experiencia en la gestión del entorno hidráulico e hidrológico, como la utilización de vías fluviales para entregar materiales, la construcción de puertos y esclusas o la instalación de sistemas de irrigación [11, 12]. Estos logros han llevado a algunos académicos a referirse al antiguo Egipto como una "civilización hidráulica temprana [11]". Sin embargo, en realidad hay muy pocos análisis multidisciplinarios que combinen los ricos hallazgos arqueológicos en las pirámides con otras disciplinas como la hidrología, la hidráulica, la geotecnia, la paleoclimatología o la ingeniería civil [9]. Por lo tanto, el tema de la fuerza del agua en el contexto de la construcción de pirámides sigue siendo insuficientemente abordado en la literatura académica.

Además, una segunda cuestión acentúa el enigma: los faraones que construyeron estas pirámides están desaparecidos. Hasta ahora, ni los registros escritos ni las evidencias físicas informan del descubrimiento de uno de los faraones de las dinastías III y IV. Las habitaciones de las "grandes" pirámides del Imperio Antiguo fueron supuestamente saqueadas [13-15] durante los milenios que siguieron a la construcción de las pirámides, dejando pocas evidencias [12]. Las habitaciones de las dinastías III y IV presentan pocos o ningún atributo funerario, como los observados en las tumbas de otras figuras de alto rango contemporáneas al período [16, 17], sin que se hayan encontrado restos de ningún rey en su interior. Además, las paredes de las cámaras de las pirámides no exhiben ningún jeroglífico, pintura, grabado o dibujo, que nos permita calificarlas como funerarias con certeza. A pesar de esta falta de evidencia, muchos autores [18] todavía sostienen que estas habitaciones pueden atribuirse a entierros de faraones basándose principalmente en cartuchos reales o nombres de reyes encontrados en otras partes de la pirámide o en templos cercanos.

En los últimos años, Dormion y Verd'Hurt [19, 20], Hamilton [21-24] y otros [1, 25] estuvieron entre los primeros en considerar posibles funciones no funerarias de los diseños internos de las pirámides al señalar algunas inconsistencias arquitectónicas y resaltar el alto grado de

La complejidad de varias estructuras, irrelevante para una cámara funeraria, se ha demostrado en el análisis de las cámaras y los sistemas de galerías, que aportan una dimensión técnica, destacando un nivel de ingeniería por parte de los antiguos constructores que es bastante notable y que a veces desafía cualquier explicación aparente. Este nivel técnico se refleja de inmediato en la geometría de las habitaciones y los conductos, así como en la mampostería, que incluye la selección de materiales, la extracción, el corte y el posterior ensamblaje con una precisión excepcional [20]. Esta precisión implica varias subtécnicas avanzadas, como la realización de juntas de mortero entre bloques [26–29] o el pulido de la piedra con valores de planitud y rugosidad que alcanzan niveles de conocimientos técnicos contemporáneos. Además de las superficies y las interfaces, la capacidad técnica de los constructores también es evidente en los sofisticados sistemas mecánicos instalados en las pirámides [30], como los diseños de las aletas de piedra giratorias en las pirámides de Meidum y Bent [21, 24] o los rastrillos inclinados encontrados en la pirámide Bent, así como en Giza [20]. Estos elementos sugieren que, más que una representación estética o un uso funerario para estos diseños, los antiguos egipcios pretendían funciones técnicas para algunos muros, túneles, corredores, pozos y cámaras donde las técnicas existentes más sencillas eran insuficientes.

En resumen, el análisis de la construcción de las pirámides y la investigación de sus disposiciones internas parecen requerir más investigación para proporcionar una explicación holística de su propósito. Este estudio pretende ofrecer una nueva perspectiva sobre estos temas mediante la aplicación de un enfoque alternativo, multidisciplinario y holístico. Revisa la metodología de construcción de las pirámides del Imperio Antiguo y busca explicar la importancia de los diseños internos durante la construcción. Basándonos en el conocimiento arqueológico actual, demostramos que la topografía de Saqqara y la disposición de varias estructuras son consistentes con la hipótesis de que se utilizó un sistema hidráulico para construir la pirámide. El artículo está dividido en tres secciones principales que analizan la literatura científica actual para abordar las siguientes preguntas: (i) ¿Se abastecía de agua la meseta de Saqqara? (ii) Si es así, ¿cómo se almacenaba y trataba? y (iii) ¿Cómo se utilizó para construir la pirámide? A continuación, se incluye una discusión y algunas observaciones y perspectivas finales.

2 La red hidrológica de Saqqara

Nuestro estudio comenzó con el postulado de que las pirámides de Keops y Kefrén, de mayor tamaño, en la meseta de Giza, eran el resultado del progreso técnico de las pirámides anteriores, siendo la pirámide escalonada un precursor tecnológico. Si bien muchos estudios de la literatura se centran en la construcción de la pirámide de Keops, nos pareció más relevante examinar primero las técnicas de construcción utilizadas para la pirámide escalonada. Esto proporcionaría información sobre los procesos utilizados por los constructores antiguos que luego se perfeccionaron en las pirámides posteriores. Como primer enfoque, analizamos las posibles razones para la construcción específica del complejo del rey Zoser en la meseta de Saqqara.

2.1 Recurso hídrico de los wadis del desierto Aunque se han

registrado mediciones detalladas de los niveles de inundación del Nilo desde la V Dinastía (2480 a. C.) [31–33], hay muy poca información disponible sobre la hidrología de sus afluentes del desierto, conocidos como 'wadis', en el antiguo Egipto. Existe evidencia sedimentológica de fuertes lluvias e inundaciones repentinas [31, 34], pero poco se sabe más allá de eso.

Determinar el régimen de precipitaciones que experimentó la región de Saqqara hace unos 4.700 años es un desafío y una incertidumbre. Estudios anteriores demostraron que, desde aproximadamente 11.000 a 5.000 años antes del presente, durante el llamado período del "Sáhara Verde", todo el Sáhara era mucho más húmedo que hoy, y el paisaje era de sabana en lugar de desierto [35, 36]. También alrededor de 4.500–4.800 años antes del presente, la región del Mediterráneo Oriental era más húmeda que ahora, a pesar de secarse más tarde [37–39]. En el siguiente cálculo se supone un rango de valor de precipitación anual de 50–150 mm/año para realizar cálculos crudos de los recursos hídricos. Cubre el rango entre los >150 mm/año sugeridos por Kuper y Kropelin [40] para el final del período del Sáhara Verde, antes de la

período posterior más seco, durante el cual las precipitaciones disminuyeron a <50 mm/año. El rango de variabilidad, es decir, 50 a 150 mm/año, también es consistente con la variabilidad interanual típica de las precipitaciones observada en la región [38].

Luego, el monitoreo hidrológico actual en wadis egipcios ubicados más al norte y que experimentan precipitaciones anuales comparables (es decir, 100-200 mm/año) mostró que solo el 1-3% de esta precipitación anual media se midió como escorrentía, es decir, flujos superficiales [41]. Este rango promedio se utiliza de aquí en adelante para estimaciones conservadoras de primer orden del volumen de agua disponible, en adelante denominado el "recurso hídrico". Tenga en cuenta que los eventos infrecuentes, más intensos, pueden alcanzar 50 mm de lluvia y desencadenar inundaciones repentinas devastadoras donde los coeficientes de escorrentía se han medido hasta en 30%, es decir, un orden de magnitud más alto que la media anual [41-43]. Tenga en cuenta que estas estimaciones de recursos hídricos e hidrología de inundaciones repentinas pasan por alto que los suelos probablemente eran más ricos en arcilla y limo justo después del período del Sahara Verde, con varios milenios de un clima más húmedo y paisaje de sabana [35, 36], lo que aumentaría el coeficiente de escorrentía y el recurso de agua superficial disponible en los wadis.

2.2 El yacimiento de Saqqara: una meseta con suministro de agua La necrópolis

de Saqqara está situada en una meseta de piedra caliza en la orilla oeste del río Nilo, a unos 180 km del mar Mediterráneo (Fig. 1). Todo el yacimiento se encuentra en el desierto, a menos de dos kilómetros del borde de la meseta (elevación 40-55 m snm), que domina la llanura de inundación del Nilo (altura 20 m snm). Más al oeste, el desierto se eleva suavemente durante unos 20 km (elevación de la cima de las colinas 200-300 m snm).

Las razones que se esconden detrás de la construcción del complejo de Zoser en Saqqara siguen sin estar claras. La contribución de los factores económicos, sociopolíticos y religiosos se destacó anteriormente.

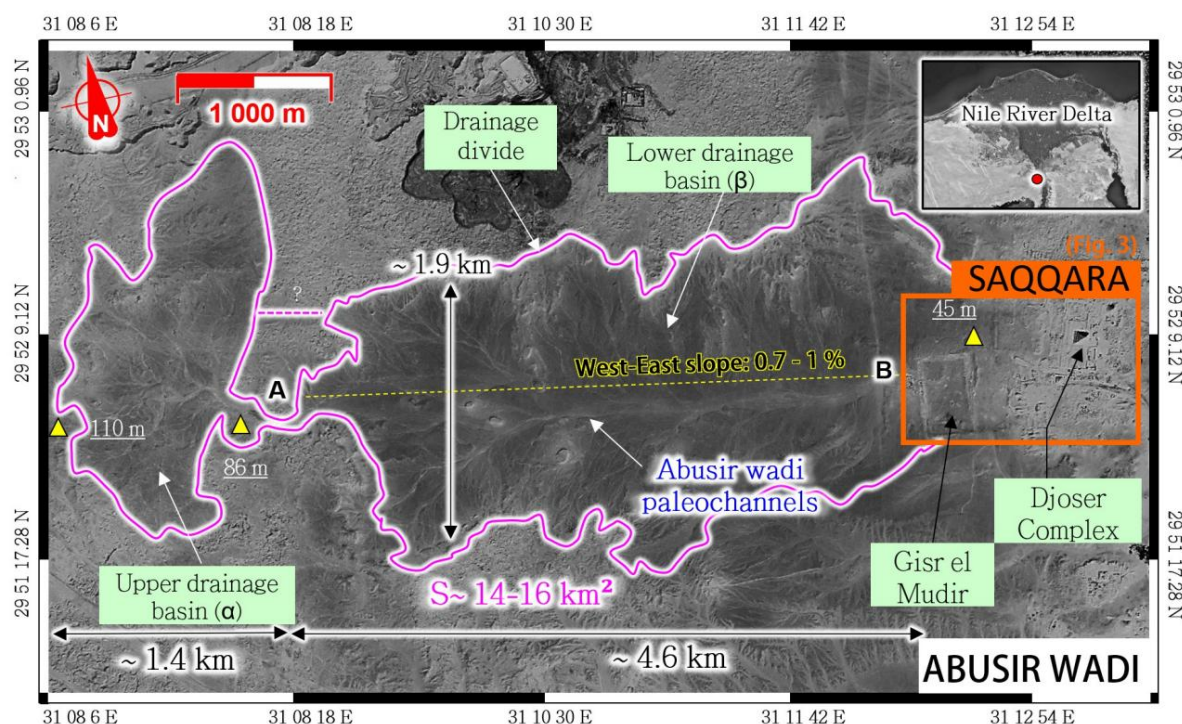


Fig. 1. Ubicación general del complejo de Djoser en Saqqara (recuadro) y área de drenaje del wadi Abusir, al oeste del recinto de Gisir el-Mudir. (Imagen satelital: Airbus Pleiades, 2021-07-02, reimpresión de la biblioteca Airbus D&S SAS bajo una licencia CC BY, con permiso de Michael Chemouny, copyright original 2021).

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0306690.g001>

[44, 45], pero los factores ambientales también pudieron haber influido. En 2020, Wong proporcionó evidencia de que el clima, la geología y la hidrología habrían influido en las decisiones de construcción y podrían haber contribuido, o quizás acelerado, el surgimiento de la arquitectura de piedra en la meseta de Saqqara [37].

Desde un punto de vista geológico, la estructura estratificada de la piedra caliza de Saqqara era de hecho se destacó como un factor favorable para la excavación de grandes cantidades de piedras de construcción [46, 47]. Estas capas, que consisten en lechos calcáreos ricos en arena de 30 a 60 cm de espesor alternados con capas de arcilla calcárea y marga, facilitaron la extracción de los bloques de piedra caliza de sus lechos originales mediante cortes verticales; el espesor original se refleja en el espesor de las piedras de construcción del complejo de Djoser.

Desde un punto de vista hidrológico, el uadi Abusir se considera un segundo factor ambiental que influyó fuertemente en el desarrollo dinástico temprano de la necrópolis de Saqqara al menos [45, 48-50]. El uadi Abusir es el arroyo efímero que drena las colinas al oeste de Saqqara (Fig. 1). Antes de este estudio, la investigación académica se centraba principalmente en la parte aguas abajo del uadi [45, 48-50], es decir, el lago Abusir [51] ubicado al norte de la meseta de Saqqara. Sin embargo, la parte aguas arriba ha permanecido sin documentar.

Para analizar las relaciones entre el uadi Abusir y la construcción de la pirámide escalonada, En el marco del proyecto de construcción, se cartografiaron por primera vez, hasta donde sabemos, las redes de drenaje al oeste del área de Saqqara, utilizando diversas imágenes satelitales (Fig. 1) y modelos digitales de elevación (ver Fig. S1 en el archivo S2).

Se puede identificar un sistema de paleodrenaje aguas arriba de la estructura de Gisir el-Mudir como el origen del uadi Abusir (Fig. 1, línea rosa). Los límites de este sistema de escorrentía forman una zona de captación nunca reportada hasta ahora, aunque fácilmente reconocible a partir de las huellas geomorfológicas de los paleodrenajes superficiales en el desierto y en los mapas históricos [52]. Aunque actualmente tiene una superficie de 15 km², no podemos descartar la posibilidad de que las divisorias de drenaje se hayan desplazado y cambiado debido a alteraciones del terreno y depósitos de arena eólica durante los últimos 4.500 años.

La cumbre actual de la cuenca se encuentra a unos 110 m sobre el nivel del mar, lo que le da al wadi Abusir un promedio del 1 %. En sus más de 6 km de longitud, la pendiente del Nilo es de un 1%. En el campo de la hidrología, una pendiente del 1% se describe como "bastante pronunciada". Con pendientes tan pronunciadas, se espera que durante las inundaciones repentinas se arrastre arena y grava, lo que puede causar graves daños aguas abajo (socavación o enterramiento de estructuras, relleno de excavaciones y zonas de encharcamiento). En comparación, los canales de riego son al menos diez veces menos pronunciados (alrededor del 0,1%) y la pendiente del Nilo es inferior al 0,01% (menos de 200 m de desnivel entre Asuán y El Cairo).

2.3 El Wadi Taflah: un posible suministro complementario de agua Reportado desde principios del

siglo XIX, un antiguo afluente del Nilo llamado Bahr Bela Ma [53, 54] o 'Wadi Taflah' fluía paralelo a la cuenca del wadi Abusir, a menos de dos kilómetros al sur de la meseta de Saqqara. A partir de imágenes satelitales, identificamos que el Wadi Taflah surge de un área de drenaje de casi 400 km² y consta de tres ramas principales (Fig. 2, puntos negros numerados) aún visibles desde las marcas geomorfológicas del desierto. Esta red también es visible en las imágenes de radar proporcionadas por Paillou [55] que pueden penetrar varios metros de arena (Fig. S2 en el archivo S2). La similitud de los patrones de drenaje ópticos y de radar confirma la existencia y la antigüedad de esta red hidrológica.

Aunque no se detectó ningún canal a partir de los datos satelitales, la proximidad del wadi Abusir con el Wadi Taflah (Fig. 2) es intrigante y plantea la cuestión de una posible conexión artificial antigua entre ellos. Según los mapas del siglo XVIII publicados por Savary [54], el Wadi Taflah fue "cerrado por un antiguo rey de Egipto". Tal testimonio, aunque

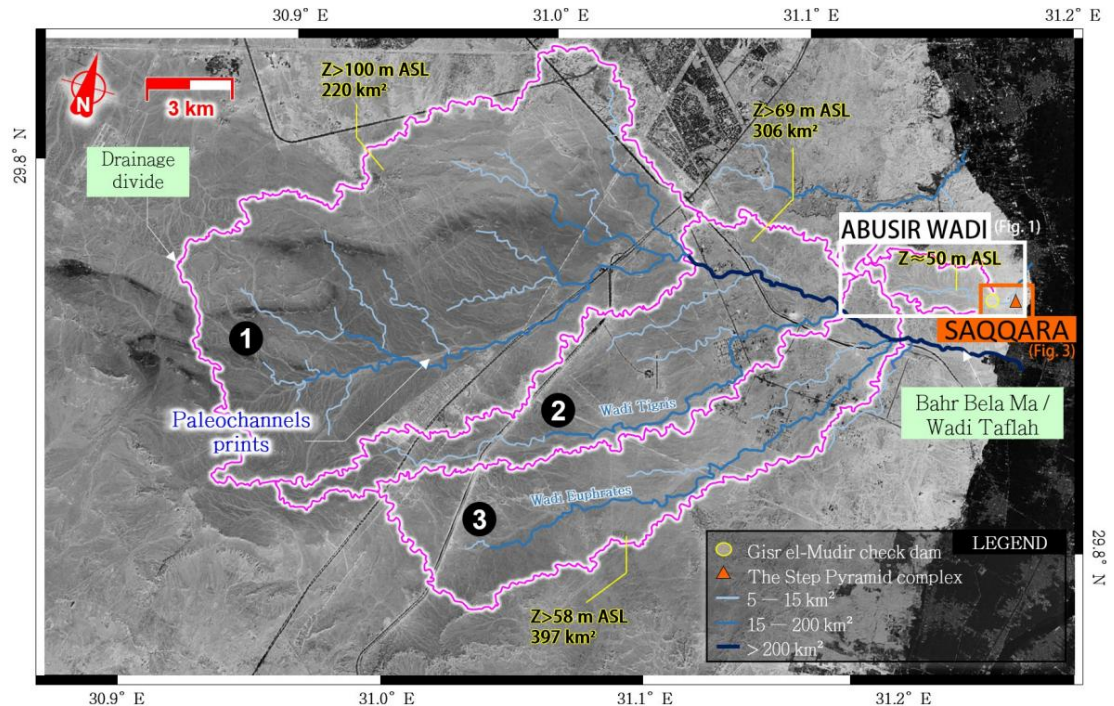


Fig. 2. Área de drenaje del Wadi Taflah, a unos 2 km al sur del complejo de Djoser. (Imagen satelital: Airbus Pleiades, 2 de julio de 2021, reimpressa de la biblioteca Airbus D&S SAS bajo una licencia CC BY, con permiso de Michael Chemouny, copyright original 2021).

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0306690.g002>

Aunque no es preciso, podría sugerir la construcción de una desviación de agua por parte de un antiguo gobernante. Una investigación geofísica podría ayudar a encontrar dicha estructura, si es que existe. El área de drenaje de Wadi Taflah cubre casi 400 km² a una altura de >58 m sobre el nivel del mar. Esta altura es lo suficientemente alta como para permitir la desviación del área de drenaje hacia el wadi Abusir. Esto resultaría en un aumento del área drenada y de la disponibilidad asociada de recursos hídricos por un factor de >25 veces. Con base en las condiciones hidrológicas descritas en la sección 2.1, el recurso hídrico estimado de Abusir Wadi y Wadi Taflah es, aproximadamente, de entre 7.500 y 68.000 m³ /año y de 200.000 a 1.800.000 m³ /año, respectivamente.

2.4 El uadi Abusir: un elemento estructural en el desarrollo de la Saqqara dinástica temprana Según la topografía de

Saqqara (Fig. 3), el uadi Abusir fluía a través del recinto de Giza el-Mudir antes de dirigirse al norte hacia la llanura de inundación del Nilo, donde solía alimentar un lago en forma de meandro, el lago Abusir [51]. Con tal localización, los muros de Giza el-Mudir literalmente represan todo el ancho del valle del uadi Abusir. La escasa vegetación que solo crece en el fondo del valle aguas arriba de Giza el-Mudir y no en otras partes del área evidencia esta represa e intercepción de flujos superficiales y subterráneos (Fig. 4A, línea verde). Esta área ligeramente húmeda está dominada por plantas que se encuentran comúnmente en los márgenes del desierto y los uadis, como *Panicum thurgidum* y *Alhagi graecorum* [56], y es típica de los flujos hipodérmicos.

Aguas abajo del Giza el-Mudir, el uadi Abusir se une a la meseta de Saqqara. Sus límites están definidos al sur por una cresta de piedra caliza que aflora y al este por los recintos de Sekhemkhet y Djoser (Fig. 3).

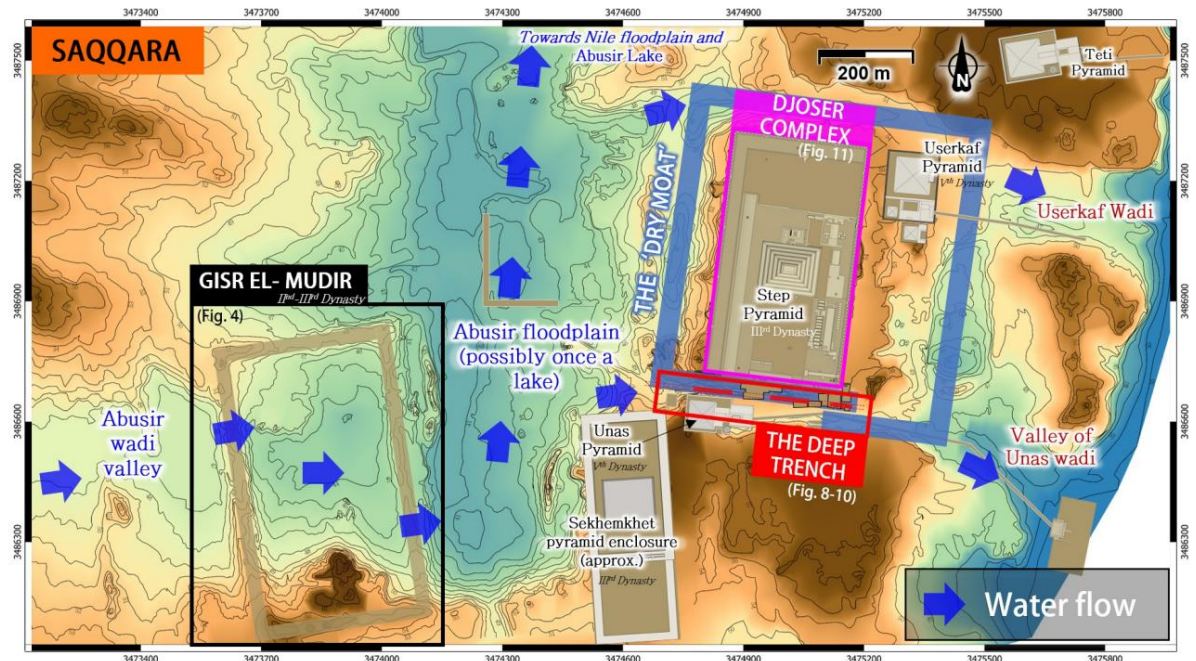


Fig. 3. Topografía del norte de Saqqara. Curvas de nivel extraídas del mapa topográfico a escala 1:5.000 [52] "Le Caire, hoja H22".

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0306690.g003>

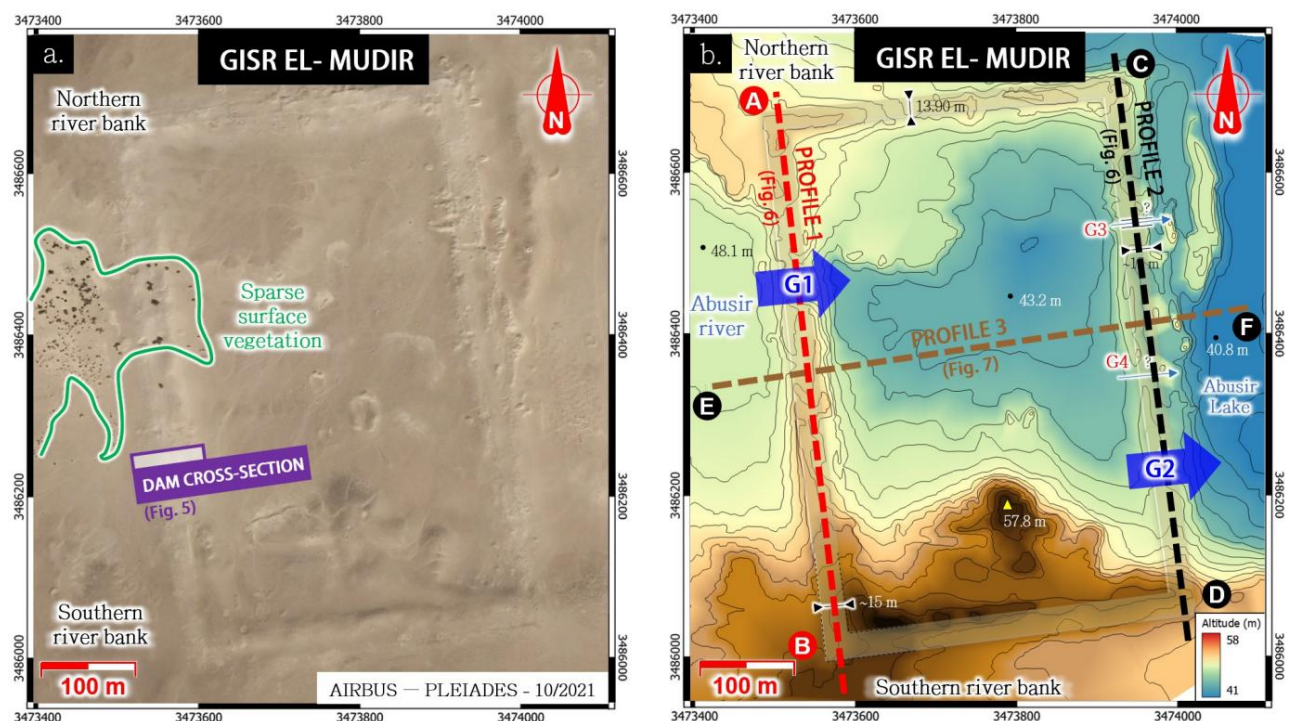


Fig. 4. a. Presa de contención de Gisir el-Mudir (imagen satelital: Airbus Pleiades, 2021-07-02, reimpresa de la biblioteca Airbus D&S SAS bajo una licencia CC BY, con permiso de Michael Chemouny, copyright original 2021); b.: Modelo de elevación digital generado a partir del mapa topográfico 1:5.000 "Le Caire, hoja H22".

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0306690.g004>

La forma del relieve de esta zona parece incompatible con una formación fluvial pura. Topografía muy plana en unos 2–2,5 km², según el Proyecto de Estudio Geofísico de Saqqara (SGSP) [57–60] y posiblemente permitió que se formara un encharcamiento efímero de agua que pudo haber resultado en un lago Abusir superior episódico después de las lluvias más intensas. Sin embargo, debido a la capa de arena aluvial y arrastrada por el viento de varios metros de profundidad acumulada durante los últimos milenios [57], Es difícil establecer las altitudes de los lechos de los ríos durante el reinado de Djoser sin más investigaciones, y solo se pueden determinar patrones generales a partir de la topografía local [52].

Al igual que ocurre con muchos otros pequeños wadis, la hidrología dinástica temprana del wadi Abusir permanece en gran medida desconocido. Según el análisis de sedimentos fluviales en el área del lago Abusir, el Abusir El wadi probablemente era un curso de agua perenne durante el período del Imperio Antiguo [51]. Aunque el clima es cálido y árido en la actualidad, varios estudios respaldan un ambiente más húmedo durante el Imperio Antiguo. Imperio Antiguo [34]. De hecho, múltiples evidencias sugieren que Egipto experimentó lluvias considerables alrededor del reinado de Djoser, lo que resultó en inundaciones frecuentes y fuertes escorrentías en La meseta de Saqqara. Esta característica climática se sustenta en depósitos sedimentarios resultantes de agua corriente de 'fuerza cinética considerable' contemporánea al reinado de Djoser [61, 62]. Según Trzciński et al. [34], la estructura fuertemente cementada L3 encontrada en la Gran Fosa que rodea el Complejo de Djoser se debió al riego cíclico, mientras que el alto contenido de Fe₃ + indica que la región experimentó una intensa erosión en un ambiente cálido y húmedo. En 2020, Wong concluyó que existe la "intrigante posibilidad de que la Gran Fosa que rodea el complejo de Djoser pueda haberse llenado de agua" durante el reinado de Djoser [37]. De ser así, Esto podría explicar por qué se construyeron tumbas en la parte norte de la meseta de Saqqara, que tiene una mayor altitud [45] y no se construyó nada dentro de la Fosa hasta el reinado de Userkaf y Unas (V Dinastía).

3. El sistema de gestión del agua de Saqqara

3.1 La presa de control de Gisir el-Mudir

Reportado al menos desde el siglo XVIII [63] y descrito extensamente dentro de una década de un estudio geofísico por Mathieson et al., ver también [45] para un resumen, el Gisir el-Mudir es un recinto rectangular ubicado a unos cientos de metros al oeste del complejo de Djoser (Fig. 3, Fig. 4A y 4B). Esta monumental estructura tiene una superficie de unos 360 mx 620 m, es decir, mayor que la Complejo de Zoser (545 mx 277 m). Los muros tienen un volumen estimado de >100.000 m³ (SGSP, Informe de 1992-1993), es decir, aproximadamente un tercio del volumen de la pirámide escalonada. Inspección de campo y los resultados geofísicos del SGSP [57] no encontraron ninguna construcción en el interior excepto un par de tumbas más recientes y pequeñas, lo que confirma que el recinto está prácticamente vacío. Además, Varios elementos del edificio sugieren que esta estructura es anterior al complejo de la pirámide escalonada y se la ha datado tentativamente a fines de la II Dinastía o principios de la III Dinastía [57, 64], lo que podría resultar Se trata de la estructura de piedra sustancial más antigua descubierta en Egipto hasta el momento.

Antes de este estudio, se habían planteado varias teorías contradictorias sobre el propósito del Gisir el-Mudir. adelante [59]: p. ej., un complejo piramidal inacabado (pero la falta de una estructura central lo hizo improbable que sea un monumento funerario), una fortaleza vigilada [65] que protege a Saqqara necrópolis de las incursiones nómadas beduinas, un terraplén para levantar un monumento a un nivel superior [66], una arena de celebración [64, 67], o incluso un recinto para el ganado. Sin embargo, dada la Se ha dedicado poco trabajo exploratorio a la estructura y no existe una explicación generalmente aceptada. Todavía existe, y su propósito ha permanecido más como una conjetura que como algo comprobado.

Teniendo en cuenta la cuenca alta y su posición transversal a través del río Abusir, El muro occidental de Gisir el-Mudir cumple los criterios esenciales de una presa de contención, es decir, una presa destinada a para gestionar los flujos de sedimentos y agua [68, 69]. Esta comparación es particularmente llamativa en lo que respecta a su sección transversal (Fig. 5). Según Mathieson et al. [59], la estructura básica de este muro

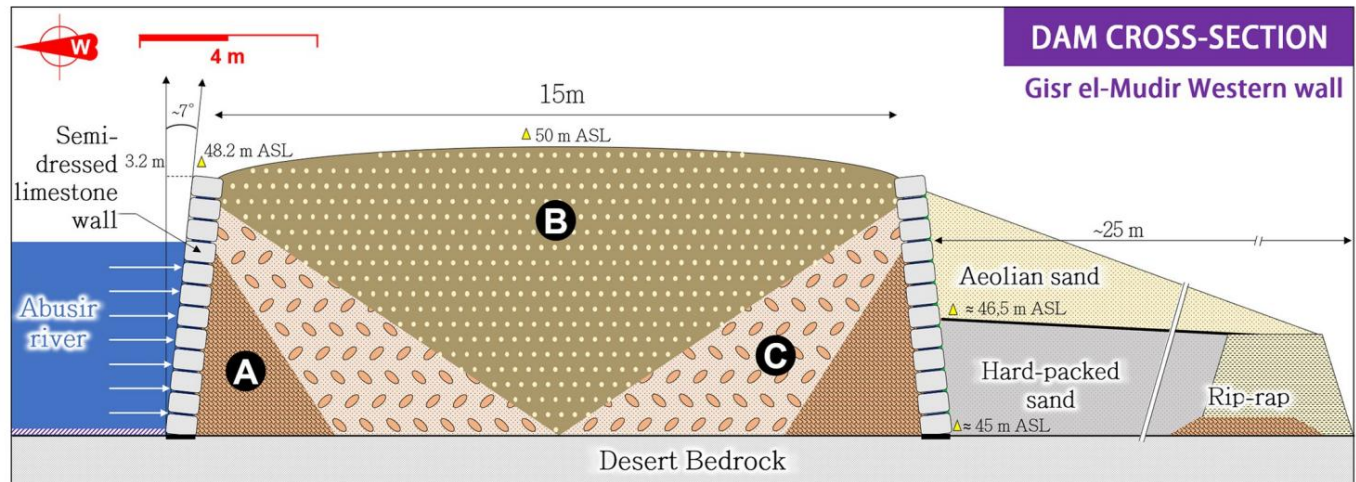


Fig. 5. Sección transversal del muro oeste de Gisir el-Mudir (ubicación en la Fig. 4A, rectángulo violeta). Figura adaptada de [58].

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0306690.g005>

Consiste en una construcción hueca de dos paredes de mampostería de piedra caliza toscamente labrada, de 3,2 m de altura, separadas por un espacio intermedio de 15 m lleno de tres capas de materiales extraídos del lecho de roca del desierto circundante [70] y hábilmente dispuestos. La primera capa (Fig. 5, punto "A") está hecha de bloques de piedra caliza local colocados toscamente que forman un contrafuerte contra el interior de los bloques de revestimiento. El relleno secundario (B) está compuesto por arena gruesa y fragmentos de piedra caliza de tamaño mediano a grande. Luego, el tercer relleno (C) está compuesto por arena gruesa a fina y limo, pequeños fragmentos de piedra caliza y lascas con nódulos de cantos rodados y pedernal. Finalmente, estas capas de relleno A, B y C están ubicadas simétricamente respecto del eje medio del muro.

Durante el Imperio Antiguo se utilizó la ingeniería civil para proteger los asentamientos de las inundaciones repentinas, como el Heit el-Ghurab ('Muro del Cuervo') que salvaguardaba el pueblo de los constructores de las pirámides de Giza [71]. En cuanto a la estructura de Gisir el-Mudir, los elementos mencionados anteriormente evocan de forma sorprendente el perfil transversal y la protección de la pendiente de otra famosa estructura del Imperio Antiguo: la presa de Sadd el-Kafara, construida sobre el Wadi al-Garawi, un edificio colosal que se encontró que era contemporáneo al de Gisir el-Mudir [72–74]. Ambas estructuras presentan la firma técnica de las presas de tierra zonificadas: un amplio terraplén hecho de un núcleo central impermeable rodeado de filtros de transición, es decir, material de relleno con un tamaño de grano más grueso, que evita la erosión, la migración y la posible canalización del material fino del núcleo debido a la filtración. Los muros de piedra caliza semidesgastada estabilizaron el material interior y lo protegieron contra la erosión cuando el agua fluyó contra y por encima de la presa. Ambas presas tienen perfiles mucho más amplios que las presas modernas. Este sobredimensionamiento podría deberse a la falta de disponibilidad de sistemas de compactación contemporáneos o a un diseño estructural empírico y conservador. Ambos tienen núcleos más estrechos de material fino en el fondo de la presa que en su cresta, lo que contradice el diseño moderno [75]. Esto se puede atribuir a la fase de construcción que habría comenzado con la elevación de los muros laterales reforzados contra el relleno grueso e intermedio (rellenos B y C en la Fig. 5), seguido de una fase de llenado del núcleo ancho con material más fino y compactado [72].

Finalmente, el perfil norte-sur del muro oriental (Fig. 6, línea AB) presenta un perfil parabólico relevante para orientar los flujos hacia el centro de la cuenca formada por Gisir el-Mudir. Esta orientación habría evitado la falla de la presa al flanquearla durante eventos de inundación cuando la salida de la presa estaba saturada. Estimamos que el agua acumulada cruzó la presa a través de una salida ubicada probablemente en la elevación más baja del valle, es decir, cerca de los 48,7 m sobre el nivel del mar (G1 en las Figs. 4B y 6).

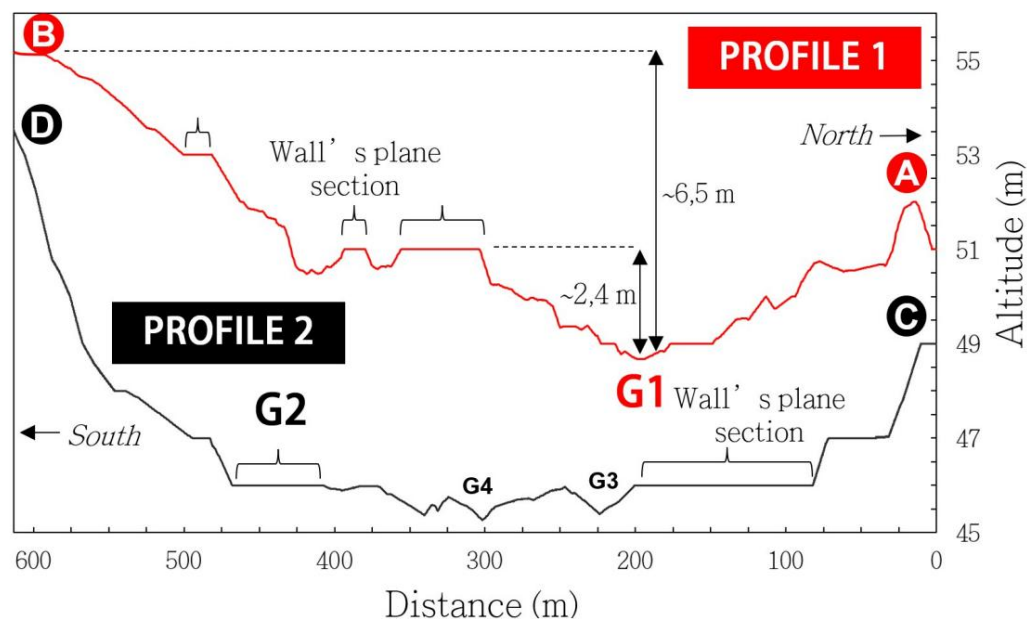


Fig. 6. Perfiles de elevación a lo largo de los muros este (línea roja) y oeste (línea negra).

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0306690.g006>

En resumen, el muro occidental de Gisir el-Mudir probablemente actuó como una primera presa de contención para los flujos del wadi Abusir.

Las excavaciones realizadas en el muro oriental del Gisir el-Mudir pusieron de relieve una calidad estructural inferior [45]. Su forma es similar a la del muro occidental, con un perfil parabólico distintivo (Fig. 6, línea CD). Además, revela dos singularidades topográficas: en primer lugar, su altitud total es unos metros inferior a la del muro occidental (Fig. 7A). Además, en la parte sur del muro oriental, se encontró una anomalía geofísica (G2 en las Figs. 4B y 6) que consistía en una serie de megalitos masivos, toscamente tallados y con forma de "L" [45, 66]. Antes de nuestro estudio, se pensaba que estos megalitos posiblemente fueran los restos de una puerta monumental, debido a sus similitudes con la entrada del complejo recinto de Djoser, pero su propósito no estaba especificado [66].

Según nuestro análisis, estos megalitos podrían ser los elementos laterales de las salidas de agua, posiblemente aberturas en forma de hendidura [76] que probablemente estaban cerradas por vigas de madera pero que podían abrirse para drenar la cuenca. Se encuentran constantemente cerca de una zanja de 2,2 m de profundidad [45], que creemos que es posiblemente el canal que guiaba el agua que salía. En pocas palabras, el muro oriental probablemente actuó como una segunda presa de control para los flujos de Abusir.

Además de las dos presas formadas por los muros occidental y oriental, el recinto de Gisir el-Mudir forma una cuenca (Fig. 4). Está cerrado al norte por otro muro hecho de bloques de piedra caliza, aunque no muy alto (probablemente <2 m) porque está construido sobre una cresta natural [45]. El límite sur de la cuenca también está formado en su mayor parte por una cresta natural. La posible ausencia de un muro de mampostería en ciertas partes de este lado no fue explicada por análisis anteriores [45]. Sin embargo, tiene todo el sentido cuando se considera una función de embalse. El anclaje de las presas contra las pendientes laterales es de hecho el enfoque estándar para guiar los flujos y evitar el flanco [68].

En esencia, el recinto de Gisir el-Mudir presenta las características definitorias de una presa de contención (Fig. 7B). La cuenca que intercepta es lo suficientemente grande (15 km²), además de la eventual derivación de agua del Wadi Taflah para producir inundaciones repentinas que transportan cantidades significativas de grava, arena, lodo y escombros debido a su pendiente durante las lluvias intensas. El valle aguas arriba del muro occidental probablemente sirvió como un primer reservorio donde tendían a depositarse las gravas más gruesas. El agua desbordada luego llenó la cuenca interior de Gisir el-Mudir, donde la arena gruesa volvería a acumularse.

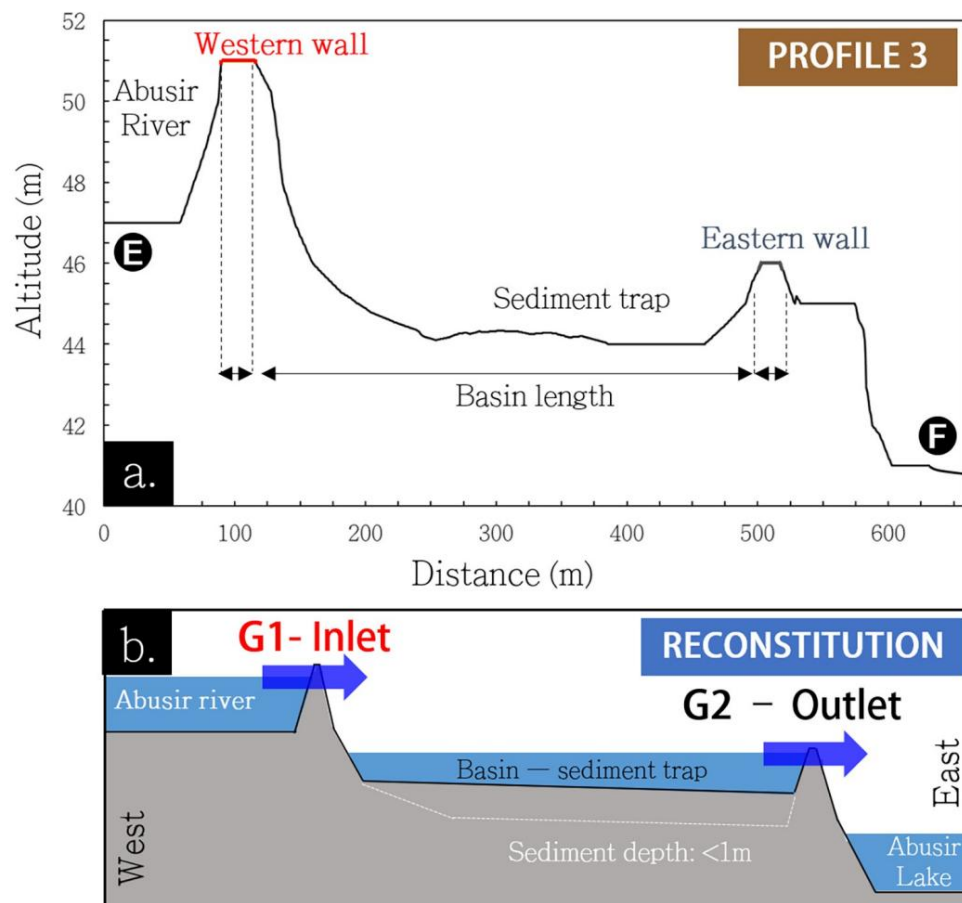


Fig. 7. a. Perfil de elevación oeste-este de la estructura de Giza el-Mudir. b: Reconstrucción esquemática del perfil con flujo de agua.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0306690.g007>

depósito. Suponiendo una profundidad de almacenamiento de entre 1 y 2 metros, la capacidad de retención de la cuenca sería de aproximadamente 220.000– Este volumen está en línea con el volumen total de agua. 440.000 m³ de una inundación repentina que podría producirse por el wadi Abusir, que se estima en unos 75.000–225.000 m³ , suponiendo 50 mm de lluvia y un coeficiente de escorrentía de 0,30. Esta primera estructura clave del sistema hidráulico de Saqqara habría entregado entonces agua clara río abajo en tiempo normal, así como agua fangosa con una carga eventualmente suspendida de arena fina y arcilla durante los eventos de lluvia.

3.2 El sistema de tratamiento de agua de la Fosa Profunda

3.2.1 Configuración general. El Complejo de Djoser está rodeado por una vasta área de excavación, comúnmente conocida como el "Foso Seco" desde que Swelim descubrió sus contornos [77, 78] (Fig. 3, franja azul). Se alega que el Foso Seco es una zanja continua cortada en el lecho de roca, de hasta 50 m de ancho y 3 km de largo, que encierra un área de 600 m por 750 m alrededor del complejo de Djoser [77, 79, 80]. Al considerar una profundidad promedio de 20 m para los cuatro lados de la zanja [61], el volumen excavado total se estima en 3,5 Mm³ , aproximadamente diez veces el volumen de la Pirámide Escalonada. Debido a la gruesa capa de arena y escombros [61] acumulados durante los últimos milenios, su geometría precisa está caracterizada de forma incompleta. Los canales este y sur del foso son particularmente debatidos [61].

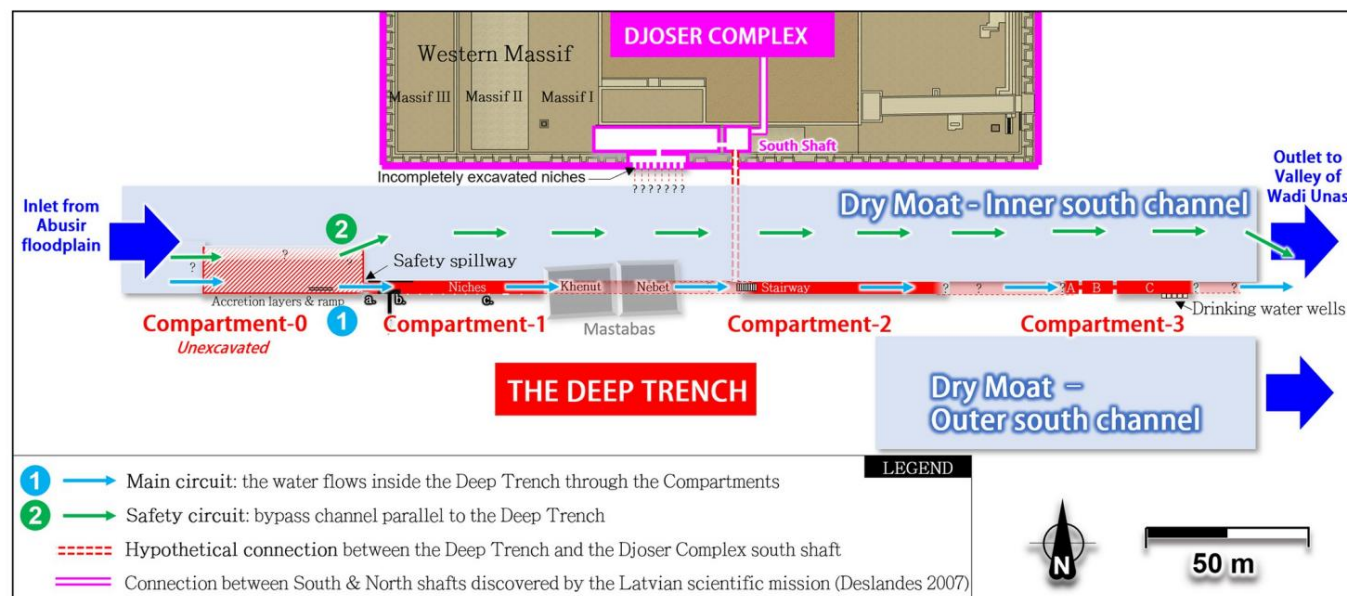


Fig. 8. Vista de la zona de la Fosa Profunda (partes en rojo) al sur del complejo de Djoser. El agua del lago Abusir puede seguir dos circuitos paralelos.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0306690.g008>

Según Swelim, el canal sur del foso probablemente se dividió en dos partes, conocidas como canales sur interior y sur exterior [78] (Fig. 8, franjas azules). El canal sur interior es relativamente poco profundo (5-7 m de profundidad), de 25-30 m de ancho y se extiende aproximadamente 350 m paralelo al muro sur del complejo de Djoser.

La 'Fosa Profunda' [81] (Fig. 8, rectángulos rojos y líneas de puntos) está construida dentro del canal sur interior, a lo largo de su pared sur. Es un canal excavado en la roca de 27 m de profundidad, 3 m de ancho y cientos de metros de largo con varios 'compartimentos'. Hasta ahora, solo unos 240 m [78] de su probable longitud de 410 m han sido objeto de excavaciones arqueológicas en 1937-1938 [78], 1937-1945 [81] y 1975 [82]. En consecuencia, aproximadamente 170 m permanecen sin explorar, principalmente debido a la presencia de los dos grupos de mastabas del Imperio Antiguo posteriores construidos sobre la zanja y con riesgo de derrumbamiento si se someten a excavación subterránea (partes grises transparentes en la Fig. 8).

En general, en la literatura se destacan dos teorías principales para explicar el propósito de la trinchera: (i) una cantera para el complejo de Djoser [47, 83], o (ii) una función espiritual [78, 84, 85].

Sin embargo, en los últimos años, los autores han señalado varias especificidades en el diseño arquitectónico de la trinchera, que parecen irrelevantes en un contexto religioso o minero [1, 86, 87]. En particular, en el aspecto minero, varios autores estiman [45, 86] que la forma de la pista sugiere que la extracción de piedras no era su única o incluso principal función, ya que no coincide con los métodos de cantera del antiguo Egipto. El lector también considera que algunas partes de la trinchera que tienen ~27 m de profundidad y están cubiertas con un techo rocoso, son totalmente irreales para las operaciones de cantera y es poco probable que hayan requerido el pavimento encontrado cerca del fondo de la trinchera [45]. Este punto se enfatiza aún más por el ancho estrecho de la Trinchera Profunda excavada (3 m), que es poco práctico en un escenario minero.

En el aspecto espiritual, Kuraszkiewicz sugiere que la trinchera puede haber desarrollado un ritual significado como lugar de reunión de las almas de los nobles para servir al rey muerto [86]. Mon-nier [1] considera que el descubrimiento de varios nichos en el canal no demuestra plenamente el propósito religioso del foso y lo considera secundario. Reader [45] también considera secundario el significado ritual de la trinchera, quien sugiere que los aspectos rituales se desarrollaron solo después de la construcción del complejo y no reflejan la función original de la estructura.

En 2020, basándose en la evidencia arqueológica, geológica y climática, Wong fue el primero en introducir la idea de que la zanja podría haber tenido una función completamente diferente, al llenarse de agua de escorrentía después de los aguaceros [37]. De ser así, esto explicaría por qué no fue hasta los reinados de Unas y Userkaf (V dinastía) que nuevas tumbas ocuparon el foso. La aparición de condiciones climáticas más secas [31, 88] alrededor del final de la IV dinastía habría creado condiciones más favorables para nuevas construcciones dentro del foso. A pesar del impacto potencial de la suposición de Wong, no recibió mucha atención en la literatura. No obstante, los autores actuales creen que las conclusiones de Wong tienen sentido al considerar la localización aguas abajo de Saqqara de una cuenca hidrográfica.

3.2.2 La fosa profunda: una serie de compartimentos excavados en la roca construidos en un corredor hidrológico. El canal interior sur y la fosa profunda están contruidos dentro del valle de Unas, un corredor hidrológico que conecta la llanura del uadi Abusir con la llanura de inundación del Nilo (Fig. 3). Por lo tanto, es posible que ambos estuvieran sometidos a inundaciones (no)controladas [34, 61] procedentes de la llanura del uadi Abusir.

La Fosa Profunda conecta al menos tres compartimentos subterráneos masivos [45, 47] (Fig. 8, partes rojas) meticulosamente excavadas con superficies cortadas con precisión [78] (Fig. 9) y unidas por un túnel [77]. Es probable que exista un cuarto compartimento, denominado retroactivamente compartimento-0 (Fig. 10), [45, 78]. A gran escala, la perfecta alineación geométrica de estos compartimentos es notable, así como su paralelismo con el complejo de Djoser y su nivel inferior similar a los de los pozos sur y norte (27 m SNM). Estas relaciones espaciales han llevado a algunos autores a considerar que la trinchera se creó como parte del Complejo de Djoser [86, 89, 90]. Esta suposición se ha visto reforzada por los descubrimientos de Deslandes de al menos dos tuberías este-oeste, de unos 80 m de largo, que conectan los diseños subterráneos del Complejo de Djoser con el lado este del Foso Seco [91].

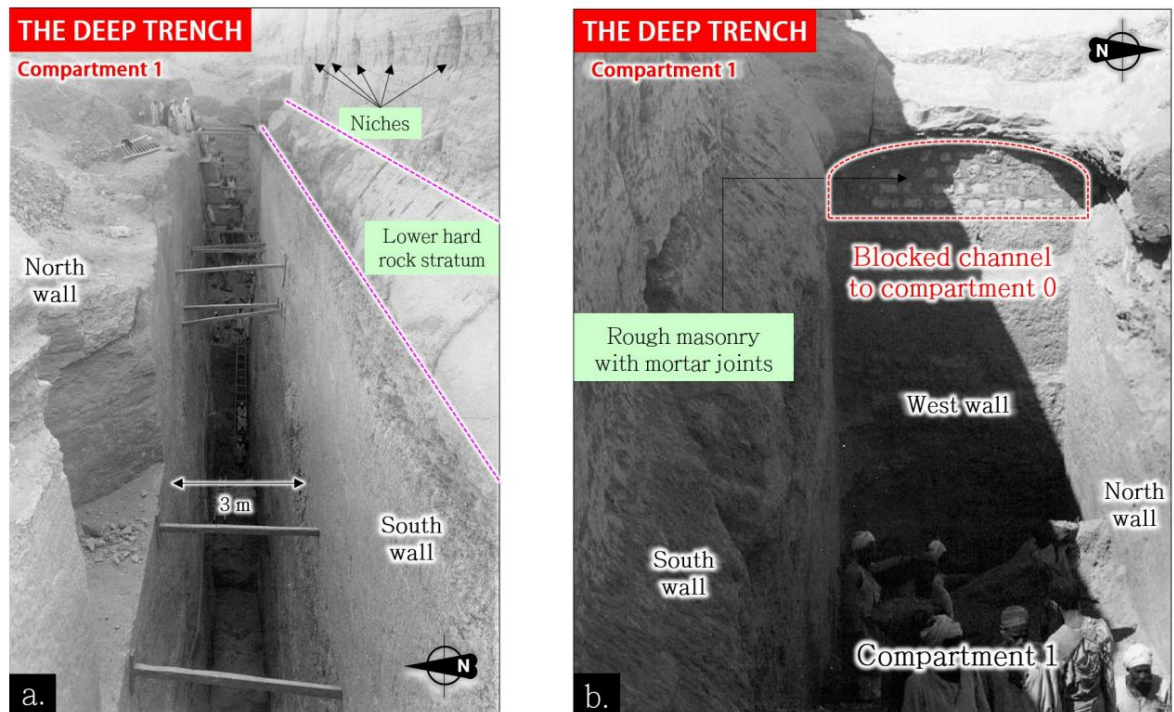


Fig. 9. Vista del compartimento 1 de la zanja profunda excavada en la roca [78] (1943), de 27 m de profundidad y 3 m de ancho. a: Vista desde el oeste; b: Vista desde el este. Los trabajadores del fondo dan una idea de la inmensa escala y técnica de la estructura.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0306690.g009>

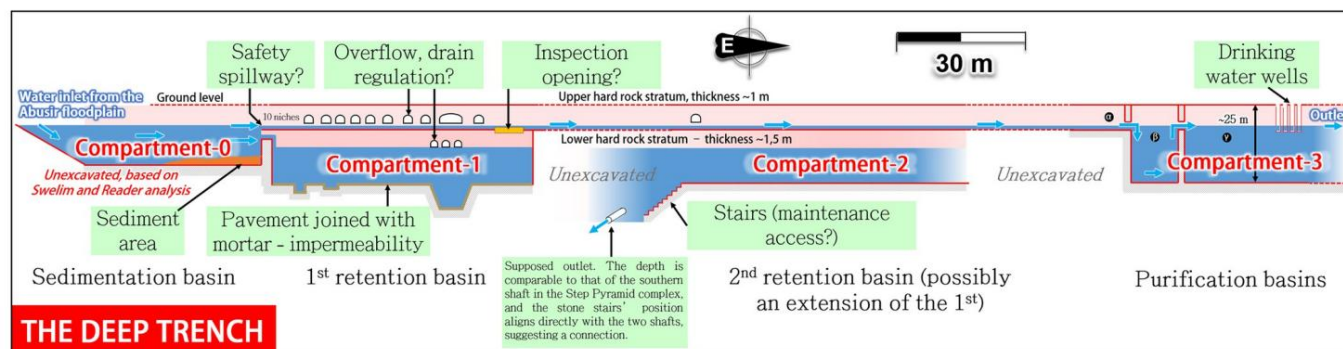


Fig. 10. Vista de la estructura operativa de la zanja profunda, que resultó ser un sistema de tratamiento de agua. Vista de la cara sur.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0306690.g010>

En conjunto, la arquitectura de Deep Trench resalta la competencia técnica y sugiere que los antiguos egipcios le dieron una función técnica más que espiritual. Sorprendentemente, a pesar de las pistas disponibles, la Fosa Profunda nunca ha sido objeto de estudios de ingeniería detallados para analizar sus características e identificar su propósito. Las siguientes secciones sugieren una lógica hidráulica detrás de la disposición interna de la fosa (más detalles en el Suplemento).

3.2.3 Coherencia de la arquitectura de la Zanja Profunda con un sistema de tratamiento de agua.

Los compartimentos, que se describen ampliamente en la literatura [77, 86, 92], se presentan en detalle en el Suplemento. Teniendo en cuenta su arquitectura y ubicación geográfica, la sección sur del Foso Seco combina los requisitos técnicos de un sistema de tratamiento de agua, incluida la sedimentación, la retención y la purificación. La figura 10 ilustra un esquema completo del proceso de funcionamiento de la instalación. De manera similar al Gisir el-Mudir, descubrimos que los compartimentos de la Fosa Profunda probablemente sirvieron para transferir agua con baja concentración de sedimentos en suspensión a los compartimentos de aguas abajo mediante desbordamiento. El proceso de utilizar una serie de tanques conectados para filtrar el agua y eliminar los sedimentos es una técnica antigua que ha sido ampliamente documentada en la literatura arqueológica y científica [93–96]. Este método se ha empleado durante siglos para limpiar el agua y ha desempeñado un papel importante en el desarrollo de las prácticas de tratamiento del agua.

El compartimento 0 presenta los requisitos mínimos de una cuenca de sedimentación (longitud y anchura considerables, pendiente de entrada baja, posición a la entrada del corredor hidrológico de Unas) cuyo propósito es facilitar la sedimentación de las partículas gruesas que se desbordarían de Gisir el-Mudir durante las fuertes lluvias. La rampa descendente a lo largo del muro sur identificada por Swelim [97] puede haber permitido a los trabajadores dragar la cuenca y eliminar los sedimentos acumulados a lo largo del muro este (Fig. 10). La muy probable conexión [45, 97] entre el compartimento 0 y el compartimento 1, bloqueada con mampostería tosca (Fig. 9B y Fig. S3 en el Archivo S2), es consistente con una estructura de desbordamiento de salida. Además, cuando el caudal en el compartimento 0 era demasiado alto, el túnel o incluso la parte norte de la zanja pueden haber sido utilizados como un desvío de aliviadero para evacuar el exceso de agua hacia la parte oriental del valle del uadi de Unas (Fig. 8, circuito de seguridad).

El compartimento 1 es entonces compatible con un estanque de retención con una capacidad > 3000 m³ (Fig. 10, parte izquierda). El pavimento de piedra del fondo con juntas de mortero probablemente limitó la filtración de agua a través de la roca madre. Su extremo oriental podría llegar hasta el compartimento 2 [45] para formar un único compartimento, pero este punto sigue siendo objeto de debate [78, 97].

El compartimento 2, lamentablemente, está en gran parte inexplorado (Fig. 10). Su posición aguas abajo podría indicar una segunda cuenca de retención o posiblemente una extensión [45] de la primera. La parte occidental de este compartimento (zona de escaleras) se alinea perfectamente con los niveles de base del Djoser.

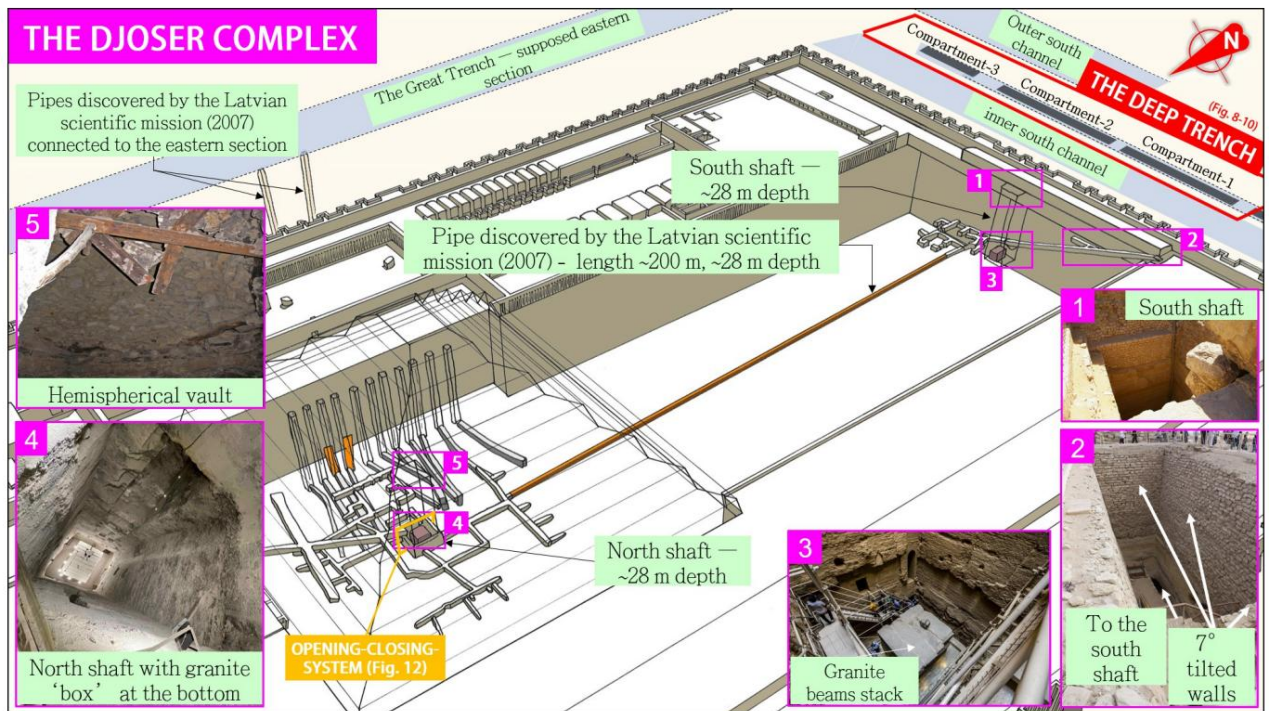


Fig. 11. Vista general del complejo diseño subterráneo de Djoser, centrándose en los descubrimientos de la misión letona (partes naranjas), cortesía de Monnier [1].

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0306690.g011>

complejos pozos sur y norte, lo que apunta hacia una conexión entre los tres [86]. Si es así, estaría alineado con la tubería recientemente descubierta de un túnel de 200 m de longitud que une el fondo de los pozos sur y norte del Complejo de Djoser [91] (ver la siguiente sección, Fig. 11).

El Compartimento 2 sería entonces otro depósito de retención, o una ampliación, dotado de una salida de agua hacia el norte.

El compartimento 3 (Fig. 10, parte derecha) es probablemente un recipiente lateral de purificación de agua potable. Su posición como apéndice del circuito hidráulico primario que conecta Gisir el-Mudir con el complejo de Djoser parece óptima para minimizar la circulación del agua y maximizar el tiempo de sedimentación del agua, aumentando así su purificación. La segunda y tercera secciones probablemente permitieron una mayor sedimentación de partículas y habrían servido como reservorios durante los periodos secos. Las paredes relativamente lisas de toda la estructura habrían impedido el crecimiento de microbios, plantas y otros contaminantes, ayudando así a mantener la limpieza del agua [98]. Cuatro pozos superficiales permitieron el acceso al final del último compartimento donde el agua, mantenida clara y fresca a la sombra de esta monumental cisterna subterránea, podía ser utilizada por los trabajadores de la obra [99].

El volumen excavado de la Fosa Profunda es superior a 14.000 m³ [77, 86, 92]. Si asumimos que la mayor parte del agua disponible en el Wadi Taflah fue desviada hacia Saqqara, este volumen podría llenarse entre una docena y más de cien veces al año en promedio. Nuestra hipótesis es que el nivel de llenado típico de la Fosa Profunda es de 45 m sobre el nivel del mar, pero no se dispone de un estudio topográfico preciso y el nivel máximo del agua podría variar entre 40 y 52 m sobre el nivel del mar, según la elevación del terreno circundante.

En esencia, descubrimos y destacamos por primera vez que la posición y el diseño de la Fosa Profunda son consistentes con un posible uso como sistema de tratamiento y almacenamiento de agua capaz de limpiar y almacenar miles de metros cúbicos de agua.

4. El sistema hidráulico central de elevación 4.1 Panorama

de la subestructura del complejo de Djoser La arquitectura interna y externa del

complejo de Djoser está documentada exhaustivamente [1, 3, 100, 101]. El Suplemento proporciona un panorama de esta estructura. Básicamente, la pirámide escalonada de seis escalones se encuentra ligeramente descentrada en un recinto rectangular hacia el sur y alcanza una altura de aproximadamente 60 m (Fig. 11). La pirámide consta de más de 2,3 millones de bloques de piedra caliza, cada uno de los cuales pesa, en promedio [2], 300 kg, lo que da como resultado un peso total estimado de 0,69 millones de toneladas y un volumen de 330.400 m³.

La subestructura presenta al menos 13 pozos, incluyendo dos pozos gemelos de tamaño considerable ubicados al norte y al sur del complejo (Fig. 11, recuadros 3 y 4), y una red extensa y bien organizada de galerías que descienden hasta 45 m por debajo del nivel del suelo [102]. El pozo norte está rodeado por cuatro estructuras en forma de peine distribuidas a cada lado y en un ángulo de 90° entre sí. El radar de penetración terrestre (GPR) reveló que los diseños de los pozos gemelos están conectados [91, 102] por un túnel de 200 m de largo. Además, al menos dos de los doce pozos en el lado este de la pirámide están conectados a la supuesta sección oriental del Foso Seco por dos tuberías de 80 m de largo (Fig. 11 y Suplemento).

A partir de nuestros modelos 3D, calculamos que los arquitectos antiguos extrajeron más de 30.000 toneladas de piedra caliza del lecho rocoso para excavar toda la estructura subterránea. La longitud total de los túneles y las salas subterráneas en conjunto es de unos 6,8 km. Sin embargo, su disposición y propósito siguen siendo poco conocidos y debatidos [6].

4.2 Los ejes gemelos conectados

El 'pozo norte' está situado debajo de la pirámide de Djoser y está casi alineado con su cima.

Este pozo tiene una profundidad de 28 m y forma cuadrada de 7 m de lado. Su parte inferior se ensancha hasta 10 m en los últimos 6 m, los más profundos, formando una cámara (Fig. 12 y Fig. S6 en Archivo S2). En su parte superior

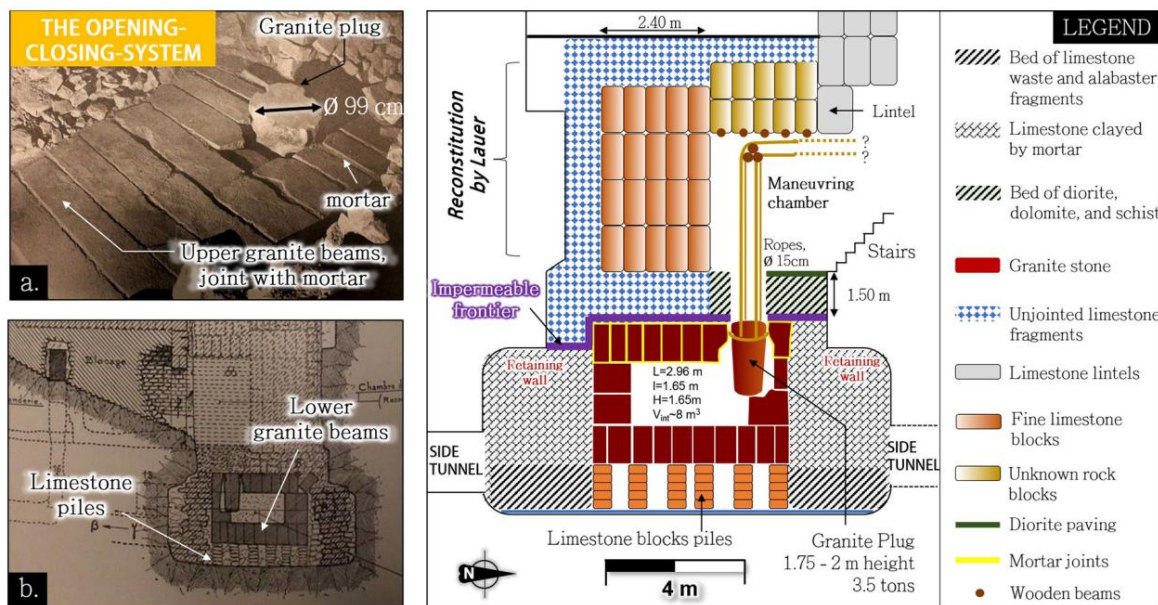


Fig. 12. a.: Caja de granito del complejo pozo norte de Djoser que sirve como sistema de apertura y cierre del flujo de agua procedente de los túneles laterales -fuente: [113].

b.: Pilotes de piedra caliza que sostienen la caja -fuente: [3]. c.: Diagrama del sistema de tapón del pozo norte. Rediseñado a partir de los bocetos de Lauer [108].

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0306690.g012>

En el interior de la pirámide escalonada, el eje se extiende por encima del nivel del suelo al menos cuatro metros en forma de una bóveda hemisférica que fue reforzada recientemente (Fig. 11, recuadro 5). Esta parte superior dentro del cuerpo de la pirámide permanece inexplorada. Sin embargo, como observó Lauer, los lados del eje por encima del nivel del suelo muestran una mampostería comparable a la del eje sur, lo que indica una posible extensión hacia arriba [3]. En el lado norte de la pirámide, una zanja empinada con escaleras proporciona acceso al eje.

El 'pozo sur' está ubicado a unos 200 m al sur del pozo norte, cerca de la fosa profunda (Fig. 11, recuadro 1). Sus dimensiones y disposición interna son muy similares a las del pozo norte. A la subestructura del pozo sur se accede a través de un corredor en forma de túnel orientado al oeste con una escalera que desciende unos 30 m antes de abrirse al interior del pozo. Luego, la escalera continúa hacia el este y conduce a una red de galerías cuyo diseño imita las cámaras azules debajo de la pirámide escalonada. Como se mencionó anteriormente, un túnel de 200 m de largo conecta la parte inferior de los pozos norte y sur (Fig. 11, tubería naranja). Una serie de nichos profundos ubicados en la cara sur del pozo sur [97], cuya forma se asemeja a la de los compartimentos 1 y 2 de la Fosa Profunda, podrían indicar una conexión anterior entre ambos. Este punto aún debe confirmarse mediante investigaciones adicionales.

El pozo sur está conectado a un pozo rectangular situado al oeste a través de un corredor en forma de túnel con una escalera que desciende aproximadamente 30 metros antes de desembocar en el pozo sur (Fig. 11, recuadro 2). A nivel del corredor, se ha excavado una cámara en la roca madre paralela al pasaje descendente [3], hacia el sur. Esta cámara presenta varios nichos excavados de forma incompleta en su pared sur, que podrían extenderse bajo la pared sur del complejo de Djoser (Fig. 8). A la espera de más excavaciones, podrían indicar una conexión con la Fosa Profunda.

4.3 Disposición interna de los pozos gemelos: dos sistemas de tapones rematados con cámaras de maniobra El propósito inicial de las

cajas de granito de los pozos gemelos ha sido ampliamente debatido [15, 100]. La presencia de dos pozos con dos cajas de granito similares y subestructuras casi idénticas se explicó anteriormente como una separación del cuerpo y el espíritu de Djoser [100]. Sin embargo, el cuerpo del faraón en realidad falta y no fue encontrado durante las excavaciones modernas. Varios autores y exploradores excluyeron la posibilidad del entierro del rey Djoser en el pozo norte [15, 103]. Vyse afirmó [15] que el volumen interno de la caja era demasiado estrecho para mover un ataúd sin romper el cuerpo. Firth y Quibell consideraron [103] que los fragmentos encontrados por Gunn y Lauer [104] eran de momias de "fecha tardía", posiblemente pertenecientes al Imperio Medio o Nuevo.

Finalmente, una datación por radiocarbono exhaustiva [105] de casi todos los restos recuperados [104, 106, 107] ubicados cerca de la caja de granito excluyó la posibilidad de que "incluso uno solo de ellos" [105] pudiera haber pertenecido al rey Djoser. Por lo tanto, aunque el pozo norte tuvo un claro significado funerario mucho más tarde, su propósito original durante la época de Djoser puede haber sido diferente.

Lamentablemente, la mayor parte de los materiales que rellenaban los dos pozos fue removida durante excavaciones arqueológicas anteriores, principalmente en la década de 1930 [108], dejando solo las dos cajas de granito en su fondo (Fig. 11, recuadros 3 y 4). Por lo tanto, la descripción de la disposición interna de los pozos se basa principalmente en los informes y testimonios arqueológicos de los exploradores [109–111].

Las dos cajas de granito son muy similares en forma y dimensiones. Ambas están hechas de cuatro capas de bloques de granito presentan orificios superiores cerrados por tapones que pesan varias toneladas (Fig. 12A). La caja sur es ligeramente más pequeña, con un tapón hecho de varias piezas, lo que la hace menos versátil. La caja norte no se encuentra directamente sobre el lecho de roca subyacente, sino que se encuentra encaramada sobre varias pilas de bloques de piedra caliza que sostienen las vigas de granito inferiores (Fig. 12B), atribuidas tentativamente a ladrones por Lauer [3]. El espacio alrededor de la caja está conectado con cuatro túneles dispuestos perpendicularmente a cada lado del pozo (ver Suplemento). Este espacio fue rellenado

con varias capas sucesivas [108] (Fig. 12C, partes en gris). La capa más baja estaba formada por fragmentos gruesos de desechos de piedra caliza y alabastro, lo que la hacía permeable. Mientras tanto, la capa superior, que llegaba hasta el nivel del techo de la caja, estaba hecha de piedra caliza unida con mortero de arcilla [108], es decir, menos permeable [112]. Este techo estaba a su vez cubierto por una capa de 1,50 m de espesor de fragmentos de alabastro y piedra caliza más relleno suprayacente (Fig. 12C, parte en azul), excepto alrededor del orificio del tapón, que estaba rodeado por un revestimiento de diorita, una roca particularmente sólida (Fig. 12C, parte en verde).

Directamente encima de las cajas de granito había 'cámaras de maniobra' [108] que permitían el tapón. El tapón que cierra la caja del pozo norte tiene cuatro ranuras laterales verticales de 15 cm de diámetro destinadas a cuerdas de elevación (Fig. 12C) y una horizontal, posiblemente para sellar. Debajo del techo de la cámara y justo encima del orificio, una viga de madera sin vaina estaba anclada en las paredes este y oeste (Fig. 12C). Esta viga probablemente soportaba cuerdas para levantar el tapón, similares a las encontradas en el pozo sur con rastros de fricción [108].

Curiosamente, las piedras de granito que forman el techo de la caja de granito estaban unidas con mortero (Fig. 12A), creando una barrera impermeable con la parte inferior del fuste y dejando el orificio del tapón como la única conexión posible entre el fuste y el interior de la caja. Por el contrario, la mayoría de las juntas entre las piedras laterales y las inferiores de la caja, conectadas con la capa inferior permeable, estaban libres de mortero.

Estos detalles, documentados detalladamente durante la excavación de Lauer [3, 108] y visibles en las fotografías, Las formas (Fig. 12A y 12B) apuntan claramente a una aplicación técnica más que simbólica. En conjunto, la arquitectura de la caja de granito y su tapón extraíble rodeado de bloques de arcilla caliza unidos presentan la firma técnica de un mecanismo de salida de agua.

Al abrirse, este sistema de tapones habría permitido llenar el pozo norte con agua de la Fosa Profunda o, en otro caso, de la sección oriental del Foso Seco. El relleno permeable circundante habría permitido controlar la descarga de agua de los cuatro túneles laterales. Luego, el agua solo podría filtrarse a través de las juntas inferiores de la caja de granito. Este diseño habría evitado que el agua atravesara el sistema a gran velocidad y con golpes de presión.

Considerando el agua proveniente de la Fosa Profunda (delta de elevación: 10–20 m), la retención. Los muros y el peso acumulado de las muchas capas apiladas sobre la caja de granito actuaron como un bloqueo lateral y habrían impedido que el techo de la caja se levantara debido a la presión del agua subyacente.

4.4 Consistencia de la arquitectura interna del complejo de Djoser con un mecanismo de elevación hidráulica

Después de reunir todos los elementos

de este estudio, deducimos que la disposición del pozo norte es consistente con un mecanismo de elevación hidráulica para transportar materiales y construir la pirámide. Los elementos a nuestra disposición indican que los pozos sur y norte podrían llenarse con agua del Foso Seco. Un flotador masivo dentro del pozo norte podría entonces levantar piedras, permitiendo la construcción de la pirámide desde su centro a modo de 'volcán' (Fig. 13).

Aunque todavía no se ha identificado una conexión entre el Compartimento 2 y los pozos de Djoser, es muy probable que en este sistema se haya utilizado agua sin sedimentos de la Fosa Profunda (Fig. 13, disco '1'). Esta calidad del agua habría reducido el riesgo de ensuciamiento y mal funcionamiento porque minimiza la presencia de arena y arcilla que alimentan el pozo norte.

Esto evitaría la deposición y el relleno progresivo de los túneles y conexiones, así como la obstrucción de las juntas entre los bloques de granito del fondo y los laterales de la caja. La tubería subterránea de 200 m de longitud [91] que conecta los pozos norte y sur es entonces compatible con la transferencia de agua desde el sistema de tratamiento de agua de la Fosa Profunda hasta el pozo norte, posiblemente a través del pozo sur.

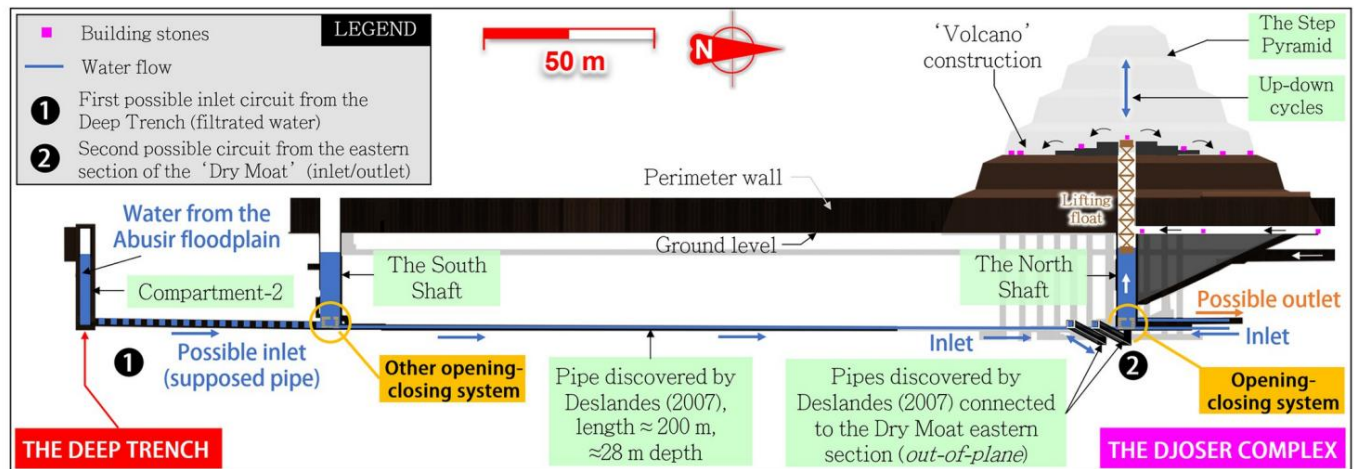


Fig 13. Proceso constructivo identificado de la pirámide escalonada: Un mecanismo de elevación hidráulico.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0306690.g013>

Además, existe una conexión comprobada entre los túneles que rodean el pozo norte y el Foso Seco a través de las tuberías de los Deslandes [91] en el lado oriental del complejo (Figs. 11 y 13). A la espera de una mayor investigación, planteamos la hipótesis de que la entrada de agua estaba ubicada al sur (Fig. 13, disco '1'), y que la(s) salida(s) enviaban agua hacia el este a través de dos tuberías yuxtapuestas (disco '2'). Varias galerías horizontales conectadas a estas dos tuberías estaban revestidas de acacia [3], una técnica comúnmente utilizada para proteger los muros en las obras hidráulicas del antiguo Egipto. Un gran rastrollo de piedra [108] encontrado en una de estas galerías puede haber servido como una puerta versátil cerrada durante el llenado de agua del pozo norte.

En otro escenario, las tuberías yuxtapuestas de Deslandes (Fig. 13, disco '2') podrían considerarse como una entrada de agua sin filtrar.

Finalmente, planteamos la hipótesis de que un elevador hidráulico, un flotador masivo que posiblemente estaba hecho de madera y pesaba varias toneladas (ver Suplemento), debería correr lentamente dentro del pozo para evitar inestabilidades y rozamientos con los lados. Las piedras podrían haber sido elevadas mediante ciclos de llenado y vaciado, permitiendo que el elevador subiera y bajara con piedras (Fig. 13). Estas piedras podrían haber pasado por la entrada norte hasta el pozo central. Descubrimientos recientes han demostrado que esta galería se mantuvo abierta hasta el final de la construcción de la pirámide, después de lo cual fue cerrada [1, 91]. En nuestro escenario, las piedras podrían haber sido transportadas directamente al nivel del suelo, correspondiente al primer curso de la pirámide, o ligeramente más arriba a través de una rampa que penetrara en un corredor (actualmente sellado) algunos metros por encima del nivel del suelo. Esta configuración habría tenido la ventaja particular de minimizar la ganancia de elevación para la que se requeriría el elevador hidráulico. Las piedras podrían haber sido transportadas a través de la llamada 'galería Saite [114]' en un escenario final. Aunque Firth [114] considera que esta galería es posterior a la III Dinastía, sigue siendo posible que haya sido tallada nuevamente sobre la base de una galería anterior.

4.5 Modelado del mecanismo de elevación hidráulica Desarrollamos un

modelo numérico simple del elevador hidráulico para estudiar su consumo de agua y capacidad de carga (ver Suplemento). El modelo se mantuvo lo más simple posible para que fuera fácil de verificar y solo se pretendía proporcionar órdenes de magnitudes relevantes.

El ascensor hidráulico se modela como un flotador cargado con piedras para construir la pirámide y con una extensión vertical para elevar este material al nivel necesario. En base a la altura inicial del ascensor, Z_m , que no puede ser inferior a 17m desde el nivel del suelo (el fondo del pozo se rellenó con

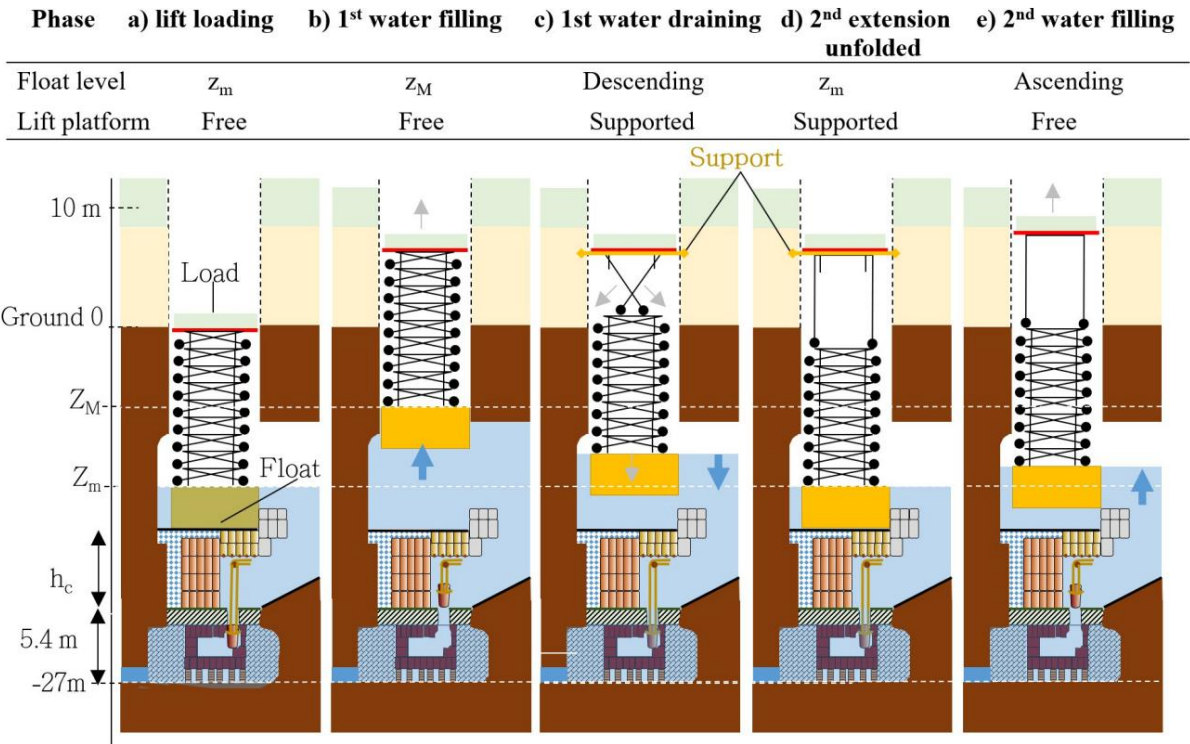


Fig. 14. Esquema del principio de funcionamiento del elevador hidráulico. Se representan la plataforma elevadora (línea roja) y el soporte de extensión (línea naranja) durante el despliegue del elemento inferior. Los agujeros asociados se localizarán en la excavación posterior de la parte superior del pozo.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0306690.g014>

la caja y las rocas superpuestas, ver Fig. 12C), y suponiendo una carga del material en el elevador a nivel del suelo, la altura máxima que se puede alcanzar en un ciclo es <17m. Para lograr mayores alturas, planteamos la hipótesis de que la plataforma del elevador se bloqueó durante el descenso del flotador, por ejemplo, utilizando vigas (ver Fig. 14). Esta modificación habría permitido que la plataforma alcanzara altitudes mayores agregando o desplegando una extensión. Para la parte superior de la pirámide, el flotador podría usarse a la inversa como un contrapeso durante el descenso, tirando de cuerdas que arrastrarían la plataforma después de pasar sobre poleas por encima de la cabeza del pozo. Un método de doble uso que involucrara el arrastre durante el drenaje del pozo y la elevación durante el llenado de agua habría sido el enfoque de gestión óptimo.

El comienzo de la construcción de la pirámide probablemente se realizó utilizando rampas que prolongaban el camino desde la cantera local, posiblemente el Foso Seco [44]. Para proporcionar un límite superior del consumo de agua, modelamos la construcción de la pirámide utilizando el elevador hidráulico desde la primera capa a nivel del suelo. Nuestro modelo sugiere que este valor límite superior es de 18 Mm3 de agua necesarios para construir toda la pirámide utilizando el flotador para levantar piedras solo cuando el pozo está lleno (ver Suplemento). Se necesitaron unos pocos millones para construir los primeros 20 m y se podrían ahorrar si se hubieran utilizado rampas en su lugar. La cantidad total de agua necesaria se habría reducido en aproximadamente un tercio si el flotador se hubiera utilizado como contrapeso, tirando de cuerdas para transportar piedras en una plataforma suspendida en la parte superior del pozo en lugar de estar ubicado en una extensión de marco de madera unida al flotador. Finalmente, si se utilizaran tanto la elevación (al llenar el pozo) como el transporte (al vaciar el pozo), el consumo de agua disminuiría en dos tercios. Si la carga no se realizase a nivel del suelo, sino a través de una rampa y una galería por encima del nivel del suelo, se ahorraría aproximadamente una cuarta parte del agua si, por ejemplo, se utilizara una rampa de 5 m de altura y un 43 % si se utilizara una rampa de 10 m de altura. Investigaciones adicionales sobre la bóveda

Los lados podrían ayudar a identificar una posible galería de este tipo. Si, por el contrario, la carga se realizó a unos 13 m por debajo del nivel del suelo en la parte superior de la galería norte (Fig. S6 en [el archivo S2](#)), el consumo de agua aumentaría típicamente en dos tercios.

Por otra parte, a través de nuestra investigación y cálculos, hemos determinado que la cuenca del Wadi Taflah tenía la capacidad de suministrar 4-54 Mm³ durante 20-30 años de construcción, por lo tanto no suficiente si solo se asumen valores pesimistas (límite inferior para la lluvia y el coeficiente de escorrentía, construcción rápida y uso subóptimo del elevador solo usándolo cuando el agua subió), pero suficiente si se asumen valores intermedios, y ocho veces suficiente agua para satisfacer esta demanda si se asumen valores optimistas (límites superiores de parámetros y funcionamiento dual de elevación-transporte). Si una investigación adicional demuestra que el mayor contenido de arcilla y limo posiblemente presente en ese momento poco después del período del Sahara Verde probablemente condujo a un aumento de los coeficientes de escorrentía en un factor de 2-3 o incluso más, el recurso aumentaría en el mismo factor.

Las condiciones climatológicas de la meseta de Saqqara durante la III Dinastía aún no se conocen bien [37]. Como primera hipótesis, estimamos que el suministro de agua pudo haber sido continuo incluso sin la existencia permanente de un lago Abusir superior, gracias al flujo del uadi Abusir y, más significativamente, a través de un probable sistema de derivación del cercano uadi Taflah, suponiendo que esta gran cuenca tuviera un régimen de escorrentía más perenne. Serían útiles las investigaciones pedológicas en el área de la meseta y en el talweg de ambos uadis para buscar evidencia de un flujo de agua más frecuente.

Como resultado, el mecanismo hidráulico pudo haber sido utilizado únicamente cuando había suficiente suministro de agua, por lo que pudo haber sido utilizado solo periódicamente. Es probable que se utilizaran otras técnicas, como rampas y diques, para sacar las piedras de las canteras y ajustar su posición alrededor del mecanismo de elevación o cuando este no estaba en funcionamiento.

5. Discusión

Un sistema hidráulico unificado Basado

en un análisis transdisciplinario, este estudio proporciona por primera vez una explicación de la función y el proceso de construcción de varias estructuras colosales encontradas en el sitio de Saqqara. Es único en el sentido de que se alinea con los resultados de investigación previamente publicados en la literatura científica en varias áreas de investigación: hidrología, geología, geotecnia, geofísica y arqueología. En resumen, los resultados muestran que el recinto de Gisir el-Mudir tiene la característica de una presa de contención destinada a atrapar sedimentos y agua, mientras que la Fosa Profunda combina los requisitos técnicos de una instalación de tratamiento de agua para eliminar sedimentos y turbidez. Juntas, estas dos estructuras forman un sistema hidráulico unificado que mejora la pureza del agua y regula el flujo para usos prácticos y necesidades vitales. Entre los posibles usos, nuestro análisis muestra que esta agua libre de sedimentos podría usarse para construir la pirámide mediante un sistema de ascensor hidráulico.

Por su escala y nivel de ingeniería, esta obra es tan significativa que parece ir más allá de la simple construcción de la pirámide escalonada. Las decisiones geográficas de los arquitectos reflejan su previsión a la hora de satisfacer diversas necesidades civiles, haciendo que el sitio de Saqqara fuera adecuado para establecerse y participar en actividades sedentarias, como la agricultura, con acceso a recursos hídricos y refugio frente a condiciones climáticas extremas. Esto incluía garantizar una calidad y cantidad de agua adecuadas tanto para el consumo como para el riego y para el transporte, la navegación o la construcción. Además, después de su construcción, el foso puede haber representado un importante activo defensivo, sobre todo si se llenaba de agua, lo que garantizaba la seguridad del complejo de Saqqara [115].

El mecanismo de elevación hidráulico parece ser revolucionario para la construcción de estructuras de piedra y no tiene paralelo en nuestra civilización. Esta tecnología muestra una excelente gestión de la energía y una logística eficiente, lo que puede haber brindado importantes oportunidades de construcción mientras

reduciendo la necesidad de mano de obra humana. Además, plantea la cuestión de si las demás pirámides del Imperio Antiguo, además de la pirámide escalonada, se construyeron utilizando procesos similares, posiblemente mejorados, un punto que merece una investigación más profunda.

En general, el ascensor hidráulico podría haber sido una técnica de construcción complementaria a las descritas en la literatura sobre el Imperio Antiguo [8, 10]. De hecho, es poco probable que los arquitectos antiguos utilizaran una única técnica de construcción exclusiva, sino que emplearan una variedad de métodos para adaptarse a las diversas limitaciones o circunstancias imprevistas de un sitio de ingeniería civil, como una sequía. Por lo tanto, el comienzo de la construcción de la pirámide se realizó muy probablemente utilizando rampas que prolongaban el camino desde la cantera local. Según estudios petrográficos [47], la principal cantera de piedra caliza del sitio de Saqqara podría corresponder al Foso Seco que rodea el Complejo de Djoser, proporcionando acceso por los cuatro lados de la pirámide para los bloques extraídos y reduciendo la longitud media de las rampas.

Un nivel técnico y tecnológico avanzado Por su nivel técnico y su

magnitud, los proyectos de ingeniería de Saqqara son realmente impresionantes.

Si se consideran las implicaciones técnicas de la construcción de una presa, una planta de tratamiento de agua y un ascensor, resulta evidente que estas obras son el resultado de una larga tradición técnica. Más allá de los aspectos técnicos, reflejan la modernidad a través de las interacciones entre diversas profesiones y conocimientos. Aunque ya existían conocimientos básicos en el campo de la hidráulica durante el período dinástico temprano, estas obras parecen superar los logros técnicos mencionados en la literatura de la época, como las presas de Foggaras o de menor tamaño. Además, los diseños de estas tecnologías, como la presa de contención de Gisir el-Mudir, indican que se tomaron decisiones bien meditadas antes de su construcción. Sugieren que los arquitectos antiguos tenían cierta comprensión empírica y teórica de los fenómenos que se producían en el interior de estas estructuras.

. . . cuestionando la línea histórica El nivel de

avance tecnológico mostrado en Saqqara también plantea preguntas sobre su lugar en la historia. Cuando se construyeron estas estructuras sigue siendo la pregunta prioritaria a responder. ¿Se desarrollaron todas las tecnologías observadas durante la época de Djoser, o estaban presentes incluso antes? Sin una datación absoluta de estas obras, es esencial abordar su atribución y período de construcción con cautela. Debido a la importante gama de técnicas utilizadas para construir el Gisir el-Mudir, Reader estima [70] que el recinto puede haber sido un proyecto a largo plazo desarrollado y mantenido durante varios reinados posteriores, un punto también apoyado por los autores actuales. La instalación de tratamiento de agua sigue un patrón similar, con las piedras cuidadosamente cortadas cubiertas y rellenas con mampostería posterior más tosca. Finalmente, la pirámide escalonada de Djoser también presenta una superposición de piedras perfectamente cortadas, a veces dispuestas sin juntas con gran precisión y cubiertas por otras piedras más toscas y angulares [3]. Algunos de estos elementos llevaron a algunos autores [6, 100] a afirmar que la pirámide de Zoser había reutilizado una estructura preexistente.

Algunas preguntas pendientes La Fosa

Profunda fue sellada intencionalmente en algún momento de la historia, como lo demuestra el bloqueo de la tubería entre el Compartimento-0 y el Compartimento-1. Las razones son desconocidas y especulativas, y van desde el deseo de construir edificios (como las mastabas Khenu, Nebet o Kairer) sobre la fosa hasta un mal funcionamiento técnico o un cierre debido a la escasez de agua.

Este sellado también podría haber tenido otros fines culturales o religiosos.

La topografía actual del terreno que rodea el complejo de Djoser, aunque incierta dados los cambios naturales o antropogénicos que han ocurrido durante los últimos cinco milenios, no respalda la existencia de una trinchera en el lado este. Por lo tanto, nuestras observaciones se unen a las de

Welc et al. [61] y algunos de los primeros exploradores [63], atribuyendo razonablemente sólo tres secciones al Foso Seco.

6 Materiales y métodos

- Se calcularon y analizaron imágenes satelitales comerciales de alta resolución (Airbus PLEIADES, resolución de 50 cm) y modelos digitales de elevación (DEM) para identificar el impacto de la red paleohidrológica del uadi Abusir en el proyecto de construcción de Djoser. La secuencia de procesamiento para generar DEM se logró principalmente utilizando el software Micmac [116] desarrollado por el Instituto Geográfico Nacional Francés (IGN) y el [sistema de información geográfica multiplataforma](#) de código abierto Tisler.
- El análisis de datos geoespaciales se realizó utilizando el renderizador de nubes de puntos basado en WebGL de código abierto Potree 1.8.1 y QGIS 3.24.3. Tisler.
- Los perfiles CAD 2D del Complejo de Pirámides Escalonadas presentados a lo largo de este artículo se produjeron utilizando Solidworks 2020 SP5 (Dassault Systems), Sketchup Pro 2021 (Trimble), Blender (Blender Foundation) y Unreal Engine 5 (Epic Games), principalmente basados en dimensiones recopiladas por sucesivas misiones arqueológicas durante los últimos dos siglos reportadas en la literatura.
- Se han identificado la cuenca hidrográfica de Wadi Taflah y la zona de captación al oeste de Gisir el-Mudir. Se realizó la caracterización y el análisis utilizando QGIS 3.24.3. Esto se realizó con la ayuda del complemento Geomeletitiki Basin Analysis Toolbox, desarrollado por Lymperis Efsthios para Geomeletitiki Consulting Engineers SA con sede en Grecia.
- El modelado del mecanismo de elevación hidráulica se realizó utilizando el software de programación de código abierto RStudio 2022.07.2.

7. Observaciones finales y perspectivas Este artículo revela varios

descubrimientos relacionados con la construcción del complejo de Djoser, nunca antes reportados:

1. Los autores presentaron pruebas que sugieren que el sitio de Saqqara y el complejo de la pirámide escalonada se construyeron aguas abajo de una cuenca hidrográfica. Esta cuenca, ubicada al oeste del recinto de Gisir el-Mudir, drena un área total de unos 15 km². Es probable que esta cuenca estuviera conectada a otra más grande con un área estimada de aproximadamente 400 km². Esta cuenca más grande alguna vez formó el río Bahr Bela Ma, también conocido como Wadi Taflah, un afluente del Nilo.
2. Un análisis técnico exhaustivo demuestra que el recinto de Gisir el-Mudir parece ser un trampa de sedimentos masiva (360 m x 620 m, con un espesor de pared de ~15 m, 2 km de largo) que incluye una presa de contención abierta. Dado su diseño geotécnico avanzado, estimamos que dicha obra es el resultado de una tradición técnica que en gran medida es anterior a la construcción de esta presa. Para comprender con precisión el período de funcionamiento de la presa, los autores del presente trabajo consideran que es una prioridad realizar un muestreo y análisis geológico tanto dentro como fuera de la trampa de sedimentos. Este proceso también proporcionaría información valiosa sobre la secuencia cronológica de construcción de las principales estructuras que se encuentran en la meseta de Saqqara.
3. El análisis hidrológico y topográfico de la zona de aguas abajo de la presa revela la posible presencia de un lago seco, probablemente efímero, al que llamamos Lago Abusir Superior, ubicado al oeste del complejo Djoser. Los hallazgos sugieren un posible vínculo entre este lago

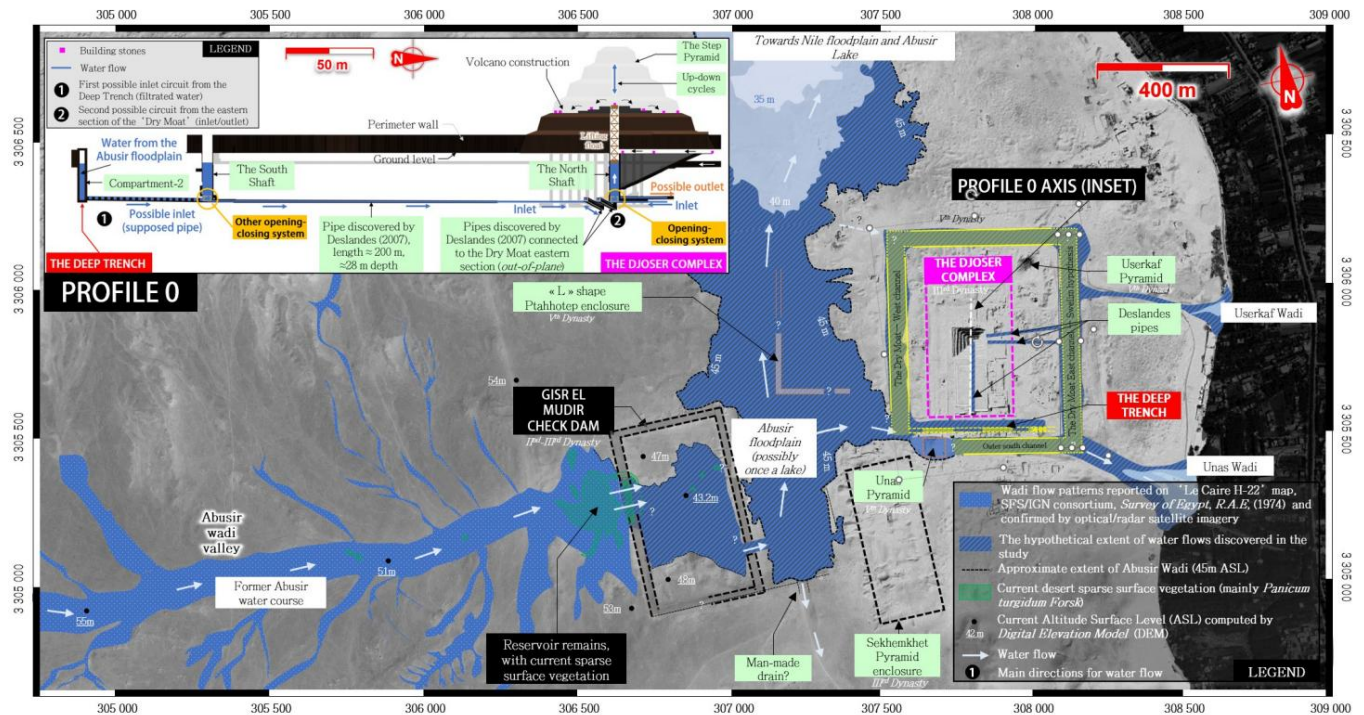


Fig. 15. Resumen del estudio. Mapa del norte de Saqqara que muestra la relación entre el curso de agua de Abusir y el proceso de construcción de la pirámide escalonada (recuadro). Las flechas que indican las direcciones del flujo son aproximadas y se proporcionan con fines ilustrativos basados en el estudio franco-egipcio SFS/IGN [52]. Imagen satelital: Airbus Pleiades, 2021-07-02, reimpresión de la biblioteca Airbus D&S SAS bajo una licencia CC BY, con permiso de Michael Chemouny, copyright original 2021.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0306690.g015>

y el corredor hidrológico de Unas, así como con el 'Foso Seco' que rodea el complejo de Djoser.

- Es probable que el «foso seco» que rodea el complejo de Djoser estuviera lleno de agua. del lago Superior Abusir, lo que lo hace adecuado para la navegación y el transporte de materiales. Nuestro primer análisis topográfico atribuye sólo tres secciones a este foso (Oeste, Norte y Sur).
- La sección sur interior del Foso Seco se encuentra dentro del corredor hidrológico de Unas. La estructura lineal excavada en la roca construida en el interior de esta zona, denominada 'Trinchera Profunda', formada por compartimentos sucesivos conectados por un conducto de roca, combina los requisitos técnicos de un sistema de tratamiento de aguas: un estanque de decantación, un estanque de retención y un sistema de depuración.
- En conjunto, el Gisir el-Mudir y la Fosa Profunda forman un sistema hidráulico unificado que mejora la pureza del agua y regula el flujo para usos prácticos y necesidades vitales.
- Hemos descubierto una posible explicación de cómo se construyeron las pirámides que involucra fuerza hidráulica. La arquitectura interna de la pirámide escalonada es consistente con un dispositivo de elevación hidráulica nunca antes reportado. Los autores actuales plantean la hipótesis de que los arquitectos antiguos podrían haber levantado las piedras desde el interior de la pirámide, a la manera de un volcán. Las cajas de piedra de granito en la parte inferior de los pozos norte y sur sobre la pirámide escalonada, consideradas anteriormente como dos tumbas de Zoser, tienen la firma técnica de un sistema de entrada/salida para el flujo de agua (Fig. 15). Se desarrolló un modelo simple del sistema mecánico para estudiar su consumo de agua y capacidad de carga. Teniendo en cuenta el consumo de agua estimado, se determinó la capacidad de carga de la pirámide.

recursos de la cuenca del Wadi Tafilah durante el Imperio Antiguo, los resultados indican órdenes de magnitud consistentes con las necesidades de construcción de la pirámide escalonada.

Conclusión gráfica

[Figura 15.](#)

Información complementaria

Figura S1

(PNG)

Archivo S1.

(Documento en formato PDF)

Archivo S2.

(Documento en formato PDF)

Agradecimientos Agradecemos

especialmente a Jonathan Cormier y Marc Diesselberg por sus valiosos comentarios, a Théo Vischel y Thierry Lebel por sus debates sobre la hidrología africana, y a Anthony y Marie Landreau por su ayuda para comprender el mecanismo de elevación hidráulica.

Muchas gracias a Clara Fily y Hilary Shirra por su revisión global y correcciones lingüísticas.

Los autores agradecen a Airbus DS por proporcionar imágenes satelitales de las Pléyades a través del programa DINAMIS y al Editor Asociado Dr. Joe Uziel, así como al Prof. Kamil O. Kur-aszkiewicz y a la Dra. Sarah K. Doherty por proporcionar comentarios estimulantes y de vanguardia sobre una versión anterior del artículo.

Contribuciones del autor

Conceptualización: Xavier Landreau, Guillaume Piton, Guillaume Morin, Pascal Bartout, Laurent Touchart, Christophe Giraud, Cyrielle Guérin, Alexis Alibert, Charly Lallemand.

Curación de datos: Xavier Landreau, Guillaume Piton, Alexis Alibert.

Análisis formal: Guillaume Piton, Alexis Alibert.

Investigación: Xavier Landreau, Guillaume Piton, Guillaume Morin, Pascal Bartout, Laurent Touchart, Christophe Giraud, Cyrielle Guérin, Alexis Alibert, Charly Lallemand.

Metodología: Xavier Landreau, Guillaume Piton, Guillaume Morin, Pascal Bartout, Laurent Touchart, Christophe Giraud, Jean-Claude Barre, Alexis Alibert, Charly Lallemand.

Administración del proyecto: Xavier Landreau, Guillaume Piton, Jean-Claude Barre.

Recursos: Xavier Landreau.

Software: Guillaume Piton, Guillaume Morin, Alexis Alibert.

Supervisión: Xavier Landreau, Charly Lallemand.

Validación: Xavier Landreau, Guillaume Piton, Pascal Bartout, Laurent Touchart, Cyrielle Guerin, Alexis Alibert, Charly Lallemand.

Visualización: Xavier Landreau, Guillaume Piton, Guillaume Morin, Christophe Giraud.

Escritura – borrador original: Xavier Landreau, Guillaume Piton.

Escritura – revisión y edición: Xavier Landreau, Guillaume Piton, Pascal Bartout, Cyrielle Guérin.

Referencias

1. Monnier F. L'ère des géants: une description de l'édifice des grandes Pyramides d'Égypte: Editions De 2017.
2. Monnier F. Le mégalithisme appareillé dans les Pyramides. Égypte, Afrique y Oriente 2021:101.
3. Lauer JP. Historia monumental de las pirámides de Egipto. T. 1. Les Pyramides à degrés (III. dynastar). 1–2. Bibliothèque d'étude. 1962.
4. Müller JF. L'extraordinaire développement de l'Égypte au cours des IIIe et IVe dynasties (2680-2470 avant J.-C.). Conferencia Hors Les Murs: Mémoires de l'Académie Nationale de Metz; 2011. pág. 291–317.
5. Arnold D. Edificios en Egipto: mampostería de piedra faraónica: Oxford University Press, EE.UU.; 1991.
6. Stadelmann R. Die ägyptischen Pyramiden. Vom Ziegelbau zum Weltwunder. 1985; 1992:147.
7. Arnold D. El complejo piramidal de Senwosret I. Expedición TMMoAE, editor. Nueva York, 1992.
8. Gourdon Y, Goher Sae-M, Blond N, Crepy M, Farout D, Gaber M, et al. Hatnoub (2021). Bulletin archéologique des Écoles françaises à l'étranger. 2022: 25 p.
9. de Haan HJ. Las grandes pirámides egipcias: modelado de un proyecto de ingeniería complejo: BAR Publishing; 2010.
10. Nicholson PT, Shaw I. Materiales y tecnología del antiguo Egipto: Cambridge University Press; 2000.
11. Butzer KW. Civilización hidráulica temprana en Egipto. Chicago: The University of Chicago Press; 1976.
12. Lehner M. Las pirámides completas. Londres: Thames & Hudson 2001.
13. Lauer JP. Cinquante années de recherches et travaux aux Pyramides de Saqqarah. Cuentas-rendus des séances de l'Académie des inscriptions et belles-lettres. 1980; 124(3):536–67.
14. Petrie WMF. Las pirámides y templos de Gizeh; 1884.
15. Vyse H. Operaciones llevadas a cabo en las pirámides de Gizeh en 1837. Londres: Universidad de Cambridge Prensa; 1842.
16. Alexanian N. Dahschur II: das Grab des Prinzen Netjer-aperef. La Mastaba II/1 en Dahschur. 1999.
17. Arnold D, White B. Cuando se construyeron las pirámides: el arte egipcio del Imperio Antiguo: Metropolitan Museo de Arte; 1999.
18. Adam JP, Ziegler C. Les Pyramides d'Égypte: Hachette Littératures.; 1999.
19. Dormion G, Verd'Hurt JY. La Chambre de Snefrou: Analiza la arquitectura de la pirámide "romboïdale": Éditions Actes Sud; 2017.
20. Dormion G, Verd'Hurt JY. La chambre de Cheops 2007.
21. Hamilton K. La pirámide inclinada. Una guía para el profano, parte 1. 2017.
22. Hamilton K. La pirámide inclinada. Una guía para el profano, parte 2. 2017.
23. Hamilton K. La Pirámide Roja. Una guía para el profano. 2017.
24. Hamilton K. Una guía para el profano sobre la pirámide de Meidum. 2017:1–68.
25. Monnier F, Puchkov A. Las fases de construcción de la pirámide acodada de Dahshur. Una reevaluación. ENIM. 2016;9:15–36.
26. Regourd MK J.; Deletie P., Haguenaier B. Microestructura de morteros de tres pirámides egipcias. Investigación sobre cemento y hormigón. 1988; 18:81–90.
27. Ragai JG, Hanaa Y.; Antar Adel. Propiedades superficiales y volumétricas de los morteros del antiguo Egipto, parte I: estudios de difracción de rayos X. Investigación sobre cemento y hormigón. 1986; 16:813–22.
28. Ragai JG, Hanaa Y.; Antar Adel. Propiedades superficiales y volumétricas de los morteros del antiguo Egipto, parte II: estudios de adsorción e infrarrojos. Investigación sobre cemento y hormigón. 1987; 17:12–21.
29. Bardot J, Darmon F. La grande Pyramide de Khéops: nouvelles découvertes: Rocher; 2006.
30. Weyburne K. Utilización de la llamada chimenea de la Pirámide Acodada para medir las elevaciones solares en verano. 2021.
31. Welc F, Marks L. Cambio climático al final del Imperio Antiguo en Egipto alrededor de 4200 AP: Nueva evidencia gearqueológica. Quaternary International. 2014; 324:124–33.
32. Mays LW. Tecnología del agua en el antiguo Egipto: Springer; 2010.

33. Noaman M, El Quosy D. Hidrología del Nilo y la agricultura antigua. Agricultura de regadío en Egipto: Pasado, presente y futuro. 2017:9–28.
34. Trzciński J, Kuraszkiewicz KO, Welc F. Informe preliminar sobre la investigación geoarqueológica en West Saqqara. Arqueología polaca en el Mediterráneo. 2010; 19:194–208.
35. Nicoll K. Cambio ambiental reciente y actividad humana prehistórica en Egipto y el norte de Sudán. *Reseñas de Ciencias Cuaternarias*. 2004; 23(5–6):561–80.
36. Tierney JE, Pausata FS, deMenocal PB. Regímenes de lluvia del Sahara Verde. *Avances científicos*. 2017; 3(1):e1601503. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1601503> Número de identificación personal: 28116352
37. Wong JY. El papel de los factores ambientales en el desarrollo temprano de la arquitectura de piedra egipcia. *Cambridge Archaeological Journal*. 2020; 31(1):53–65.
38. Bar-Matthews M, Ayalon A. Los espeleotemas como indicadores paleoclimáticos, un estudio de caso de la cueva de Soreq, situada en la región mediterránea oriental, Israel. *Variabilidad climática pasada en Europa y África*: Springer; 2004. págs. 363–91.
39. Bar-Matthews M, Ayalon A. Variaciones climáticas del Holoceno medio reveladas por registros de espeleotemas de alta resolución de la cueva de Soreq, Israel, y su correlación con cambios culturales. *El Holoceno*. 2011; 21(1):163–71.
40. Kuper R, Kropelin S. Ocupación del Holoceno controlada por el clima en el Sahara: motor de la evolución de África. *Science*. 2006; 313(5788):803–7. <https://doi.org/10.1126/science.1130989> Identificador de la empresa: 16857900
41. Vetter T, Rieger AK, Nicolay A. Áreas desconectadas que contribuyen a la escorrentía: evidencia proporcionada por antiguos sistemas de gestión de cuencas hidrográficas en la zona árida del noreste de Marmarica (NO-Egipto). *Geomorfología*. 2014; 212:41–57.
42. Gheith H, Sultan M. Construcción de un modelo hidrológico para estimar la escorrentía de los wadis y la recarga de agua subterránea en el desierto oriental de Egipto. *Journal of Hydrology*. 2002; 263(1–4):36–55.
43. Abbas M, Carling PA, Jansen JD, Al-Saqarat BS. Hidrología de inundaciones repentinas y recarga de acuíferos en Wadi Umm Sidr, desierto oriental, Egipto. *Journal of Arid Environments*. 2020; 178:104170.
44. Ba'rtá M. Ubicación de las pirámides del Imperio Antiguo en Egipto. *Cambridge Archaeological Journal*. 2005; 15(2):177–91.
45. Lector C. Un paisaje ritual dinástico temprano en el norte de Saqqara: ¿una herencia de Abidos? *Revista de Arqueología Egipcia*. 2017; 103(1):71–87.
46. Youssef M, Cherif O, Boukhary M, Mohamed A. Estudios geológicos en el área de Sakkara, Egipto. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie-Abhandlungen*. 1984:125–44.
47. Klemm D, Klemm R. Piedras de las pirámides: Instituto Arqueológico Alemán, Departamento de El Cairo; 2010.
48. Ma'lek J, Quirke S. Los templos de Menfis. Problemas destacados por la encuesta EES. *El templo en el antiguo Egipto*. 1997:90–101.
49. Reader C. Sobre las calzadas de las pirámides. *Revista de arqueología egipcia*. 2004; 90(1):63–71.
50. Dodson A. Hacia el oeste: sobre los antiguos medios de acceso a la necrópolis de Saqqara. *Momias, magia y medicina en el antiguo Egipto*: Manchester University Press; 2016. págs. 3–18.
51. Cr'lek V, Ba'rtá M, Lisa' L, Pokorna' A, Juř'ickova' L, Br'una V, et al. Desarrollo diacrónico del lago de Abusir durante el tercer milenio a. C., El Cairo, Egipto. *Quaternary International*. 2012; 266:14–24.
52. Consorcio SFS/IGN. Survey of Egypt, Le Caire, 1:5000, Ministerio de Vivienda y Reconstrucción. Disponible en IGN, Saint-Mandé, Francia 1974.
53. Denon V. Voyages dans la Basse et la Haute E' gypte, colgante les campagnes de Bonaparte, en 1798 y 1799: Impr. para S. Bagster por J. & W. Smith; 1807.
54. Savary C. Lettres sur l'Egypte: Bleuete jeune; 1798.
55. Paillou P. Mapeo de la paleohidrografía en desiertos: contribución del radar de imágenes espacial. *Agua*. 2017; 9(3):194.
56. Pokorny' P, Koča'r P, S'uvova' Z, Bezděk A, Ba'rtá M. Paleoecología de Abusir Sur según restos vegetales y animales. Complejo de tumbas Abusir XIII del visir Qar, sus hijos Qar el Joven y Senedje-mib, e Iykai Abusir Sur. 2009; 2:29e41.
57. Mathieson I, Bettles E, Dittmer J, Reader C. El proyecto de estudio de Saqqara de los Museos Nacionales de Escocia ect, ciencias de la tierra 1990–1998. *Revista de arqueología egipcia*. 1999; 85(1):21–43.
58. Mathieson IJ, Tavares A. Informe preliminar del proyecto de estudio de Saqqara de los Museos Nacionales de Escocia, 1990-91. *The Journal of Egyptian Archaeology*. 1993; 79(1):17-31.
59. Mathieson I, Bettles E, Clarke J, Duhig C, Ikram S, Maguire L, et al. Proyecto de estudio de Saqqara de los Museos Nacionales de Escocia 1993-1995. *Revista de arqueología egipcia*. 1997; 83(1):17–53.

60. Mathieson I, Dittmer J. El estudio geofísico del norte de Saqqara, 2001-2007. SAGE Publications Sage UK: Londres, Inglaterra; 2007. págs. 79-94.
61. Welc F, Mieszkowski R, Trzciński J, Kowalczyk S. Sección occidental del canal 'Foso seco' que rodea el complejo de pirámides escalonadas en Saqqara a la luz de la prospección con radar de penetración terrestre. *Prospección Arqueológica*. 2015; 22(4):293–305.
62. Welc F. La cantera abierta de la Tercera Dinastía al oeste del complejo piramidal de Netjerykhet (Saqqara). 2011.
63. Pococke R. Una descripción del Este y algunos otros países: Bowyer; 1743.
64. Regulus I. Investigación de una nueva necrópolis de la Dinastía 2 en el sur de Saqqara. *Estudios del Museo Británico sobre el Antiguo Egipto y Sudán*. 2009; 13:221–37.
65. Lauer JP. *Orientalia*. 1966; 35(1).
66. Swelim NM. Algunos problemas sobre la historia de la Tercera Dinastía: Sociedad Arqueológica de Alejandría; 1983.
67. van Wetering J. El cementerio real del período dinástico temprano en Saqqara y la Segunda Dinastía Tumbas reales 2004.
68. Lucas-Borja ME, Piton G, Yu Y, Castillo C, Zema DA. Presas de contención en el mundo: objetivos, funciones, efectividad y efectos no deseados. *Catena*. 2021; 204:105390.
69. Schwindt S, Franca MJ, Reffo A, Schleiss AJ. Las trampas de sedimentos con canal guía y diques de contención híbridos mejoran la retención controlada de sedimentos. *Peligros naturales y ciencias del sistema terrestre*. 2018; 18 (2):647–68.
70. Reader C. Saqqara antes de la pirámide escalonada. *Antiguo Egipto*. 2018; 18(105):34–41.
71. Butzer KW, Butzer E, Love S. Geoarqueología urbana e historia ambiental en la Ciudad Perdida de las Pirámides de Giza: síntesis y revisión. *Journal of Archaeological Science*. 2013; 40(8):3340–66.
72. Garbrecht G. Sadd-el-Kafara: la gran presa más antigua del mundo. *Energía hidráulica internacional y construcción de presas*. 1985; 37(7):71–6.
73. Murray GW. Una nota sobre Sadd El-Kafara: La antigua presa en el Wadi Garawi. *Bulletin de l'Institut d'Égypte*. 1945; 28(1):33–46.
74. Bard KA. *Enciclopedia de la arqueología del antiguo Egipto*: Routledge; 2005.
75. Degoutte G, Fry J. Pequeñas presas: directrices para el diseño, la construcción y el seguimiento. Ediciones Cemagref y ENGREF (Francia), con el Comité Francés de Grandes Presas. 2002.
76. Piton G, Recking A. Diseño de trampas de sedimentos con presas de contención abiertas. I: Diseño hidráulico y de deposición. *Procesos*. *Revista de Ingeniería Hidráulica*. 2016; 142(2):04015045.
77. Swelim N, El gran foso seco que rodea el complejo de la pirámide escalonada de Horus Netjerykhet. 4º Congreso Internacional de Egiptólogos; 1985; Munich.
78. Swelim N. El foso seco, la pared rocosa sur del canal interior sur. Czerny E., et al. (eds.), OLA 149; 2006.
79. Myśliwiec K, El foso seco al oeste del recinto de Netjerykhet. *Arte y arqueología del Imperio Antiguo*; 2004: Instituto Checo de Egiptología, Universidad Carolina; Editorial Academia
80. Herbich T, Jagodziński A. Investigación geofísica del foso seco del complejo Netjerykhet en Saqqara. *Hombre, milenios, medio ambiente: estudios en honor a Romuald Schild*. 2008:273–8.
81. Saad ZY. Excavaciones reales en Saqqarah y Helwan. Le Caire; 1947.
82. Hassan S, Iskandar Z. Excavaciones en Saqqara, 1937-1938: República Árabe de Egipto, Departamento de Antigüedades; 1975.
83. Welc F. La cantera a cielo abierto de la Tercera Dinastía al oeste del complejo piramidal de Netjerykhet (Saqqara). *Studia i Prace*. 2011; 24:272–304.
84. Baines J, Edwards IE. Estudios de pirámides y otros ensayos: presentado en IES Edwards: Egypt Exploration Society; 1988.
85. Mysliviec K, editor El foso seco al oeste del recinto de Netjerykhet. *Arte y arqueología del Imperio Antiguo*; 2004; Praga.
86. Kuraszkiewicz KO. ¡Viva la pirámide escalonada! *Patrimonio*. 2022; 5(3):2615–27.
87. Aston BG. Piedra. *Materiales y tecnología del Antiguo Egipto*. 2000:5–77.
88. Kerisel J. *Ge'nie et de'mesure d'un pharaon-Khe'ops*: Stock; 1996.
89. Friedman FD. Nociones de cosmos en el complejo de la pirámide escalonada. *Estudios en honor de William Kelly Simpson*. 1996; 1:337–51.
90. Friedman FD, Friedman F. Los paneles de relieve subterráneos del rey Djoser en el complejo de la pirámide escalonada. *Revista del Centro de Investigación Estadounidense en Egipto*. 1995; 32:1–42.

91. Deslandes B. Travaux récents menés dans la Pyramide à degrés de Saqqarah. *Comptes-rendus des séances de l'année—Académie des inscriptions et belles-lettres*. 2007; 151(4):1475–82.
92. Lector C. Una dimensión potencialmente significativa registrada en un papiro del Imperio Antiguo de Saqqara. *Revista de Arqueología Egipcia*. 2017; 2.
93. Chatzakis M, Lyrintzis A, Mara D, Angelakis A, editores. Tanques de sedimentación a través de los siglos. *Actas del 1er Simposio Internacional de la IWA sobre Tecnologías del Agua y de las Aguas Residuales en Civilizaciones Antiguas*; 2006.
94. Mays LW. Una breve historia de la filtración/sedimentación del agua. *Ciencia y tecnología del agua: Suministro de agua*. 2013; 13(3):735–42.
95. Mays LW. Una breve historia de la tecnología hidráulica romana: Springer; 2010.
96. Weiner R, Matthews R. Ingeniería ambiental: Butterworth-Heinemann; 2003.
97. Swelim N. Recordatorios y comentarios sobre la subestructura real de la tercera dinastía. *Mitteilungen des Deutschen Archäologischen Instituts, Abteilung Kairo*. 2014; 70:431–44.
98. Lye DJ. Microbiología de sistemas de cisternas de agua de lluvia: Una revisión: (Cisterna, Agua de lluvia, Microorganismos). *Revista de Ciencias Ambientales y Salud Parte A*. 1992; 27(8):2123–66.
99. Mays L, Antoniou GP, Angelakis AN. Historia de las cisternas de agua: legados y lecciones. *Agua*. 2013; 5(4):1916–40.
100. Stadelmann R. Constructores de las pirámides. *Civilizaciones del antiguo Cercano Oriente*. 1995; 2:719–34.
101. Dickinson T. Un enfoque basado en el paisaje y los materiales para la arquitectura funeraria real en los primeros Tercer milenio antes de Cristo Egipto: UCL (University College London); 2014.
102. Deslandes B. Travaux récents dans la Pyramide de Djeser (Nécropole de Saqqarah, Egipto). 2012.
103. Firth CM, Quibell JE, Lauer JP. La pirámide escalonada. 2 vols. El Cairo: pls. 1935:29–30.
104. Lauer JP, Derry D. Découverte à Saqqarah d'une partie de la momie du roi Zoser: Imprimerie de l'Institut Français d'Archéologie Orientale; 1935.
105. Eugen Strouhal MFG, Georges Bonani, Willy Woelfli, Alena Neimecková y Shelley R. Saunders. Nueva investigación de los restos que se cree pertenecen al rey Djoser y de los de una mujer no identificada de la pirámide escalonada de Saqqara. *Anthropologie*. 1994; 32(3):225–42.
106. Minutoli V. Reise zum Tempel des Jupiter Ammon in der libyschen Wüste und nach Oberägypten, herausg. von Dr. Toelken, Berlin. 1824:179.
107. Derry DE, editor Informe sobre los restos humanos de la gran cámara del sarcófago de granito en la pirámide medio de Zoser. *Annales du Service des Antiquités de l'Égypte*; 1935.
108. Lauer JP. La Pyramide à degrés—TOMO 1 y 2. En: *Oriente IFAO editor. La Pyramide à degrés*. le El Cairo, 1936.
109. Lauer JP. Recherches et travaux menés dans la nécropole de Saqqarah au cours de la campagne 1966–1967. *Comptes-rendus des séances de l'année—Académie des inscriptions et belles-lettres*. 1967; 111(4):493–510.
110. Lauer JP. Investigaciones y trabajos en Saqqarah: campañas 1970–1972 y 1971–1972. *Comptes-rendus des séances de l'année—Académie des inscriptions et belles-lettres*. 1972; 116(3):577–600.
111. Lauer JP. Investigaciones y trabajos en Saqqarah (campaña 1972-1973). *Comptes-rendus des séances de l'année—Académie des inscriptions et belles-lettres*. 1973; 117(2):323–40.
112. Neuzil C. Permeabilidad de arcillas y pizarras. *Revista anual de ciencias terrestres y planetarias*. 2019; 47:247–73.
113. Flandrin P, Chapuis P. Le labyrinthe des Pyramides: Actes sud; 2011.
114. Estuario, Editor Excavaciones del Departamento de Antigüedades en la pirámide escalonada de Saqqara. *Annales du Service des Antiquités de l'Égypte*; 1925.
115. Clark R. Seguridad de las tumbas en el Antiguo Egipto desde la era predinástica hasta la era de las pirámides: Archaeopress Publishing Ltd; 2016.
116. Friedt JM. Reconstrucción de estructuras tridimensionales por fotografías: le logiciel MicMac. *AbiertoSilicium*. 2014.