Salud, Ciencia y Tecnología. 2024; 4:.1067
doi: 10.56294/saludcyt2024.1067

ORIGINAL

Emerging Technologies for the Management of the Azolvamiento at La Estancilla Dam, Manabí, Ecuador

Tecnologías Emergentes para la Gestión del Azolvamiento en la Represa La Estancilla, Manabí, Ecuador

Martha Johana Álvarez-Álvarez[1], Julio Johnny Regalado-Jalca[2], Julio Cesar Pino Tarragó[2]

[1]Doctorante del Programa Doctoral de Recurso Hídricos de la Universidad Agraria La Molina -Lima – Perú – Docente de la Universidad Estatal del Sur de Manabí. Carrera de Ingeniería Civil. Jipijapa, Manabí, Ecuador.
[2]Universidad Estatal del Sur de Manabí. Carrera de Ingeniería Civil. Jipijapa, Manabí, Ecuador.

Citar como: Álvarez-Álvarez MJ, Regalado-Jalca JJ, Pino Tarragó JC. Emerging Technologies for the Management of the Azolvamiento at La Estancilla Dam, Manabí, Ecuador. Salud, Ciencia y Tecnología. 2024; 4:.1067. https://doi.org/10.56294/saludcyt2024.1067

Enviado: 26-02-2024 **Revisado:** 10-05-2024 **Aceptado:** 23-10-2024 **Publicado:** 01-01-2025

Editor: Adrián Alejandro Vitón-Castillo

Autor para la correspondencia: Julio Johnny Regalado-Jalca

ABSTRACT

Introduction: this article focused on the management of siltation in the La Estancilla dam in Manabí, Ecuador. It highlights how one of the emerging technologies can help reduce risks to infrastructure and water resources, mitigating siltation.
Objective: the impact of siltation on the dam was analyzed using AutoCAD Civil 3D software, and how emerging technologies contribute to the management and monitoring of sedimentation was also explored.
Method: an applied research was conducted, adopting a descriptive and quantitative approach. In situ data was collected using GPS and total station, as well as three-dimensional simulations using AutoCAD Civil 3D to model the evolution of siltation. Additionally, a systematic review of the scientific literature was carried out by selecting 20 relevant articles to identify how emerging technologies can improve the monitoring and mitigation process of sedimentation.
Results: the results showed a 45,06 % decrease in the active capacity of the reservoir by the end of 2024 and a possible full saturation of more than 100 % by 2042, emphasizing the urgent need to implement more advanced technologies. Simulations and the systematic review demonstrated that the use of drones and predictive models can significantly improve accuracy and efficiency in sediment management.
Conclusions: The implementation of emerging technologies could ensure the long-term functionality and sustainability of the reservoir, optimizing siltation mitigation strategies and reducing dependence on conventional methods like dredging.

Keywords: Siltation; Water Resources Management; Erosion; La Estancilla Dam; Sedimentation.

RESUMEN

Introducción: este artículo se enfocó en la gestión del azolvamiento en la represa La Estancilla en Manabí, Ecuador. Se destaca cómo una de las tecnologías emergentes la cual puede ayudar a reducir el riesgo para la infraestructura y los recursos hídricos, mitigando el azolvamiento.
Objetivo: se analizó el impacto del azolvamiento en la represa, utilizando el software de AutoCAD Civil 3D, además se exploró cómo las tecnologías emergentes contribuyen al manejo y monitoreo de la sedimentación.
Método: se realizó una investigación aplicada adoptando un enfoque descriptivo y cuantitativos. Se recopilaron datos in situ mediante el uso de GPS y estación total, y simulaciones tridimensionales usando AutoCAD Civil 3D para modelar la evolución del azolvamiento. Adicionalmente, se realizó una revisión sistemática de la literatura científica seleccionando 20 artículos con el propósito de identificar como las tecnologías

© 2024; Los autores. Este es un artículo en acceso abierto, distribuido bajo los términos de una licencia Creative Commons (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0) que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio siempre que la obra original sea correctamente citada

emergentes pueden mejorar el monitoreo y el proceso de mitigación de la sedimentación.
Resultados: los resultados demostraron una disminución del 45,06 % en la capacidad activa del embalse al finalizar el año 2024 y una posible saturación completa para 2042 de más del 100 %, lo que enfatizó la necesidad urgente de implementar tecnologías más avanzadas. Las simulaciones y la revisión sistemática demostraron que el uso de drones y modelos predictivos puede mejorar significativamente la precisión y eficiencia en el manejo de sedimentos.
Conclusiones: la implementación de tecnologías emergentes podría asegurar la funcionalidad y sostenibilidad del embalse a largo plazo, optimizando las estrategias de mitigación del azolvamiento y reduciendo la dependencia de métodos convencionales como el dragado.

Palabras clave: Azolvamiento; Erosión; Gestión de Recursos Hídricos; Represa la Estancilla; Sedimentación.

INTRODUCCIÓN

AutoCAD Civil 3D es una herramienta importante para los ingenieros civiles, en las ciencias de la hidráulica ha permitido visualizar el flujo de la sedimentación y evaluar el cambio de la represa. Un estudio llevado a cabo es el sistema de modelado matemático de flujo y sedimentación, incorporado al mismo tiempo por AutoCAD mediante archivos DXF. Por otra parte, utiliza multithreading para mejorar la eficiencia del programa, mostrando datos en tiempo real del flujo de los sedimentos. La utilización del software AutoCAD Civil 3D para la evaluación de la acumulación de sedimentos en la Represa La Estancilla, en el cantón Tosagua, permite obtener una visión de los efectos que ocasionan la acumulación de sedimentos. La represa es una importante obra hidráulica en la gestión del agua, ya que puede controlar los aumentos de caudal, realizar riego agrícola y producir energía eléctrica.

Obando et al.[1] señala que la capacidad de almacenamiento y uso de la represa ha sido afectada por el azolvamiento; este proceso es causado a su vez por la erosión de las tierras circundantes. Aumentan el riesgo de desbordamiento y a la vez degradan los ecosistemas acuáticos.[2] La sedimentación tiende a distribuirse de manera irregular en regiones monzónicas subtropicales. Esta circunstancia hace difícil manejar sus efectos.[3] La acumulación de sedimentos influye directamente en la operación, cambiando el proceso de embalse y disminuyendo la eficiencia de esas instalaciones.[4] Cuando los depósitos de sedimentos se acumulan cerca de la base de la presa cambian la hidráulica bruscamente, forzando al agua a comportarse más bien como un canal abierto y aumentando su velocidad en la sección frontal.[5,6] Esta situación reduce el nivel del agua por encima de la represa, disminuyendo su capacidad para manejar las descargas correctamente.[7,8]

Aunque algunos estudios afirman que los umbrales en las estructuras de la presa pueden ser útiles para mejorar la descarga, su eficacia depende de la configurada cada presa y del tipo de sedimentos.[8,9] A pesar de los avances que ya se han hecho, aún queda mucho por aprender, sobre todo en embalses de tamaño pequeño y mediano en regiones monzónicas subtropicales.[10,11] Este conocimiento es esencial para lograr una mejor gestión de los sedimentos, minimizando los efectos negativos y mejorando la calidad del agua, especialmente en países en desarrollo donde se están construyendo nuevas represas.[10,12,13]

Según Olsen y Hillebrand et al.[16]; Hillebrand et al.[17] realizaron estudios sobre dinámica de fluidos computacional (CFD), demostrando cómo se pueden predecir los cambios en el lecho de un embalse en varios años de sedimentación y dragado, mediante la resolución de ecuaciones de Navier-Stokes simularon la velocidad del agua y turbulencia. Al mismo tiempo, Ji et al.[15] y Wu et al.[18] presentaron modelos numéricos en 3D para simular la deformación del lecho y el transporte de sedimentos en canales abiertos y mediciones empíricas.

Además de herramientas como softwares avanzados, existen las tecnologías emergentes que se están utilizando para el monitoreo y la gestión de los sedimentos en represas, que están cambiando la forma en que se aborda este problema crítico.[19] Una metodología innovadora es la valorización del lodo retenido por las represas, una práctica que ha sido estudiada en Marruecos, la misma que no solo se limita en la eliminación del lodo, sino en el aprovechamiento como recurso para múltiples industrias, siendo un potencial de mitigación, fomentando las prácticas sostenibles.[20,21] Además, se han desarrollado técnicas avanzadas de gestión de sedimentos que incluyen la implementación de trampas de sedimentos y medidas de control de erosión, así como el uso de vegetación para estabilizar las riberas de los ríos y mejorar la retención de sedimentos.[22]

Otro avance fue implementado en Japón con el uso de redes neuronales artificiales para evaluar y predecir el comportamiento de los sedimentos en embalses. Este enfoque permite identificar sesgos que existen en la planificación y gestión de los embalses, resaltando la necesidad de la intervención gubernamental y la monitorización para mejorar la gestión del azolvamiento.[20] Además, la coordinación de la gestión de embalses a nivel de cuenca fluvial, junto con la implementación de estrategias adecuadas de manejo de sedimentos, puede prolongar la vida útil de los embalses, disminuyendo los costos asociados a su ciclo de vida.[23]

Este estudio tiene como objetivo analizar el impacto del azolvamiento en la Represa La Estancilla, utilizando

el software de modelado como AutoCAD Civil 3D, además de explorar cómo la aplicación de tecnologías emergentes contribuye al manejo y monitoreo de la sedimentación, mediante el uso de drones equipados con sensores LiDAR, redes neuronales e inteligencia artificial, proponiendo métodos eficientes para enfrentar la pérdida de capacidad del embalse. Estos avances tecnológicos mejoran el funcionamiento y seguridad en las presas, al mismo tiempo promueven la durabilidad a largo plazo de estos recursos hídricos. Por ejemplo, la combinación de nuevas tecnologías con métodos de manejo proactivo de los sedimentos está resultando ser muy útil.[24]

Las prácticas de manejo de cuencas hidrográficas que reducen la erosión mediante el control de la vegetación y el uso adecuado del suelo están siendo adoptadas debido a su capacidad de reducir los sedimentos en los embalses, mejorando la salud ecológica de las cuencas.[25] La aplicación de estas tecnologías modernas ofrece soluciones que, si bien son preventivas y correctivas, resultan ser relativamente sencillas de aplicar, mientras que los impactos económicos y sociales que genera el azolvamiento siguen siendo una amenaza para la sostenibilidad del agua y la seguridad de las comunidades.[26]

MÉTODO

El estudio se centró en una investigación científica aplicada con un enfoque descriptivo, con el propósito de comprender el fenómeno de azolvamiento en la represa La Estancilla, analizando cómo las tecnologías emergentes podrían mejorar su funcionamiento, promoviendo su durabilidad a largo plazo. Se realizó una revisión bibliográfica para analizar las tecnologías como el uso de drones equipados con sensores LiDAR, redes neuronales e inteligencia artificial pueden optimizar la gestión de sedimentos. Se aplicaron métodos cuantitativos para recopilar datos de campo, para su posterior simulación computacional con el propósito de comprender cómo evoluciona el azolvamiento en diferentes escenarios climáticos. A continuación, se describen las fases:

1. Recolección de datos de campo

La recolección de datos de campo fue fundamental para el estudio, la cual se realizó mediante la utilización de dispositivo de posicionamiento global (GPS) y estación total, lo que permitió recopilar datos sobre la topografía y la sedimentación de la cuenca. La información recabada fue esencial para crear modelos realistas del embalse. Además, se llevaron a cabo pruebas in situ para investigar cómo la sedimentación impactó el flujo hidráulico y los ecosistemas circundantes. La combinación de la información obtenida in situ, informes climáticos históricos, y la erosión en la cuenca, permitieron proyectar el comportamiento futuro de la sedimentación.

2. Simulaciones y modelado con AutoCAD Civil 3D

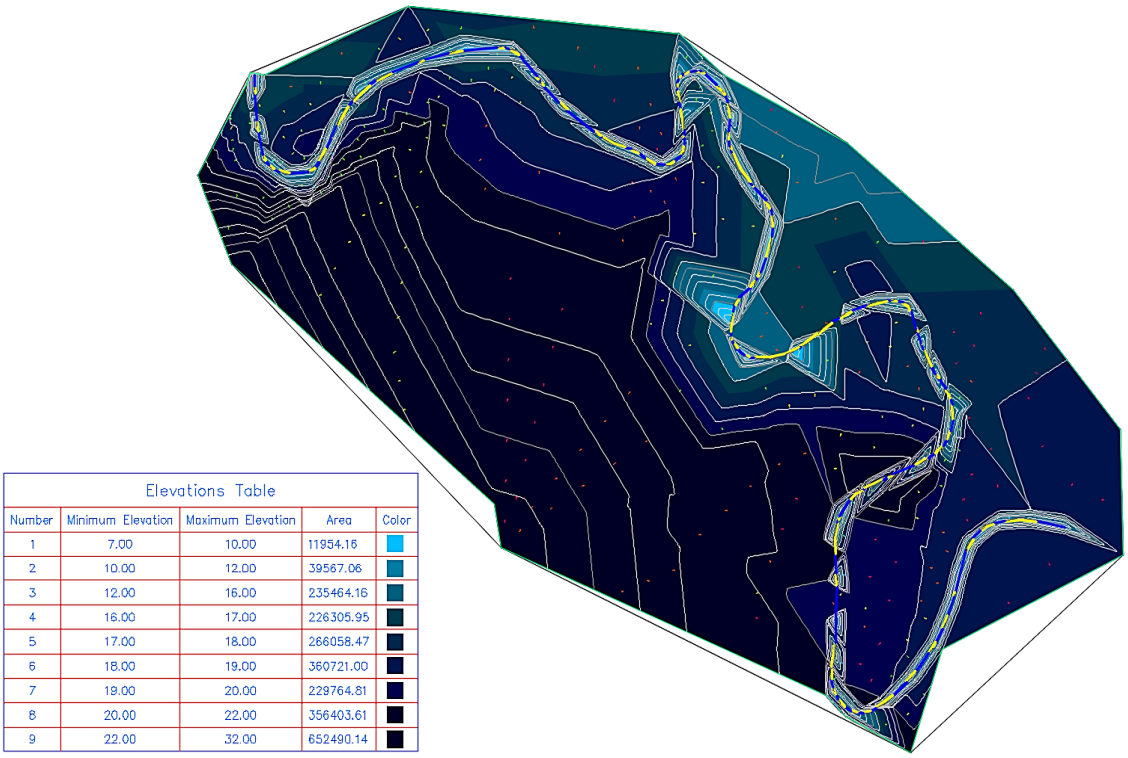
Se utilizó el software AutoCAD Civil 3D, para crear un modelo tridimensional del embalse y su cuenca tributaria, integrando datos topográficos obtenidos in situ. Además, se aplicaron algoritmos de transporte de sedimentos basados en la ecuación de la continuidad de sedimentos y la ecuación de Saint-Venant, permitiendo calcular la evolución de sedimentos en distintos escenarios climáticos e identificando aquellas áreas que acumulaban la mayor cantidad de sedimentos.

3. Revisión sistemática

Se realizó una revisión sistemática de la literatura científica, analizando un total de 50 artículos para explorar la aplicación de las tecnologías emergentes en la gestión del alzovamiento. Se seleccionaron 20 estudios que estaban relacionados con el uso de drones para el monitoreo topográfico, sensores de sedimentos en tiempo real, y redes neuronales para predecir comportamientos futuros de sedimentación. Esta revisión permitió identificar qué tecnologías emergentes tienen un mayor potencial para mejorar el monitoreo y la gestión del embalse, así como optimizar las estrategias de mitigación de la sedimentación. En particular, se destacó la capacidad predictiva de estas tecnologías para prevenir problemas antes de que se conviertan en amenazas significativas para la operatividad de la represa, reduciendo a su vez la dependencia de métodos convencionales, como el dragado, que son costosos y pueden tener un impacto negativo sobre el medio ambiente.

RESULTADOS

En el presente estudio se realizaron simulaciones mediante la utilización de AutoCAD Civil 3D, con el propósito de modelar diversos escenarios de como la sedimentación perjudica la capacidad de almacenamiento de la represa bajo diferentes condiciones. Además, considerando las características fisiográficas de la cuenca y la variabilidad climática de la zona. En la figura 1 se puede ver el área representativa de la represa presentando la amplitud de la cuenca que alimenta el embalse y al mismo tiempo presentando una representación exacta de cómo las características del terreno y las pendientes afectan el proceso de acumulación de sedimentos.



Elevations Table

Number	Minimum Elevation	Maximum Elevation	Area	Color
1	7.00	10.00	11954.16	
2	10.00	12.00	39567.06	
3	12.00	16.00	235464.16	
4	16.00	17.00	226305.95	
5	17.00	18.00	266058.47	
6	18.00	19.00	360721.00	
7	19.00	20.00	229764.81	
8	20.00	22.00	356403.61	
9	22.00	32.00	652490.14	

Figura 1. Área representativa de la represa la Estancilla

Este suceso no solamente ocurre en la represa La Estancilla. Varios estudios han analizado el impacto del azolvamiento en represas y cuencas, tanto en Ecuador como en otras regiones del mundo. Perera et al.[1] señalan que este proceso disminuye la vida útil y la capacidad operativa de las represas, afectando el suministro de agua, la generación de energía y la gestión de inundaciones, con repercusiones sociales y económicas. A nivel local, Obando et al.[27] investigaron cómo el desarrollo urbano y la deforestación incrementan la sedimentación en cuencas ecuatorianas, mostrando que la pérdida de manglares en la costa de Manabí contribuye directamente a mayores niveles de sedimentos en los ríos, afectando el funcionamiento de las represas en esta región.

El análisis de la cuenca hidrográfica que abastece la represa La Estancilla proporcionó información esencial para una gestión más eficiente. Se identificaron elementos fundamentales tales como la forma de la cuenca, caracterizada por llanuras en la parte media y pendientes menores al 30 %, lo cual facilita la evacuación natural de las precipitaciones y a su vez el manejo del azolvamiento. Adicionalmente, se realizó una evaluación de la densidad de drenaje, que fue de 4,62 km/km^2 y una longitud del río principal de 5021,52 m, lo cual muestra una elevada capacidad de transporte de sedimentos hacia la represa. Estos datos fueron obtenidos a través de la delimitación de la cuenca utilizando el programa AutoCAD Civil 3D, que permitió la estimación del área tributaria a la represa, delimitada en 2,39 km^2 (ver figura 2, modelada en Civil 3D).

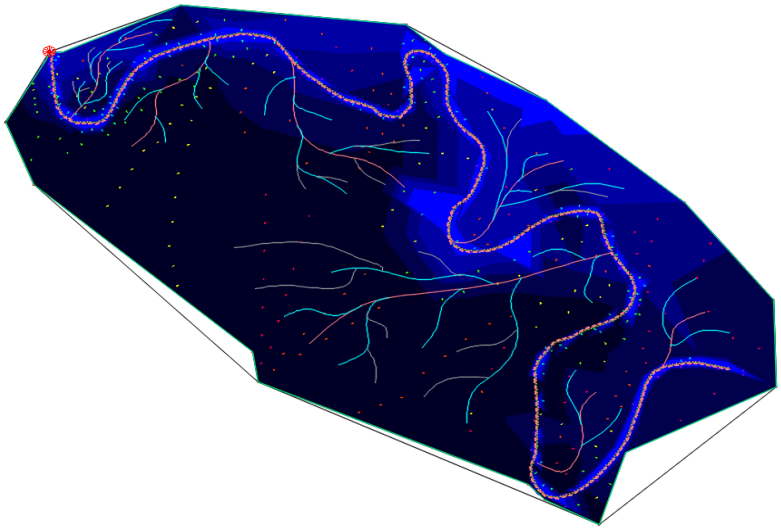


Figura 2. Distribución de drenajes superficiales de la cuenca hidrográfica

https://doi.org/10.56294/saludcyt2024.1067

La simulación fue realizada considerando una distancia de 5 km aguas arriba para definir la subcuenca hidrográfica. Además, la topografía del río fue proporcionada por los técnicos responsables de la represa, quienes destacaron la falta de registros anuales de caudales y estudios de sedimentación previos.

Simulaciones de Volumen de Sedimentación

En el modelado de la cuenca que tributa a la Represa La Estancilla, se realizó utilizando el software AutoCAD Civil 3D para simular la evolución del volumen del embalse y prever los posibles escenarios de azolvamiento en el futuro. La simulación tridimensional muestra que para el año 2024, el volumen de sedimentación ascenderá a 0,4506 hm^3, lo que implica una pérdida significativa del 45,06 % de la capacidad activa del embalse. La figura 3 (Proyección 2024) presenta el gráfico que muestra la proyección de sedimentación para dicho año. Como se puede observar, el nivel de sedimentación alcanza un volumen aproximado de 0,4506 hm^3, lo que representa un 45,06 % de la capacidad total del embalse. Este grado de sedimentación afectaría la operatividad de la represa, comprometiendo su capacidad de almacenamiento y función en la región.

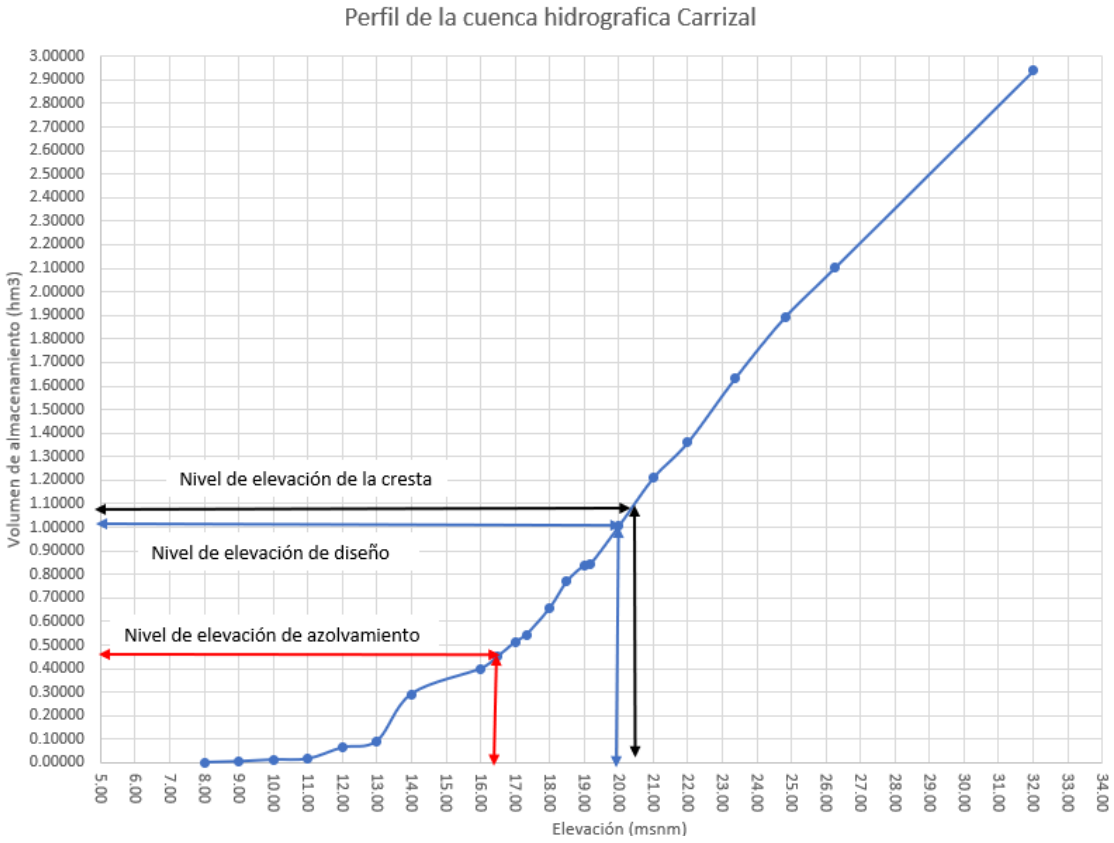


Figura 3. Perfil de Azolvamiento Proyectado para 2024

Por otra parte, se calculó que para el año 2042 la acumulación de sedimentos superará el 103 % de su capacidad prevista del embalse lo cual supone un riesgo importante para su operatividad, a menos que se apliquen medidas de mitigación adecuadas. En la figura 4 se muestra la proyección final, en la cual se aprecia que la sedimentación superará el 100 %, logrando un volumen de almacenamiento que supera los 2,0 hm^3. En este escenario, la represa perdería toda su capacidad operativa, afectando directamente la distribución de agua para riego y aumentando el riesgo de inundaciones en la región.

En cuanto a las características fisiográficas, la cuenca tiene un coeficiente de compacidad de 1,13, lo que indica que es relativamente compacta y que responde rápidamente a las precipitaciones, favoreciendo la acumulación de sedimentos. Con un coeficiente de circularidad de 0,78, se evidencia la eficiencia en la evacuación de aguas, aunque persiste la tendencia a acumular sedimentos debido a su forma. Los resultados de las simulaciones en Civil 3D muestran que, debido a las características topográficas y las suaves pendientes en la parte baja, hay una alta acumulación de sedimentos en épocas de lluvias intensas. Se resalta la importancia de realizar limpiezas periódicas y de mejorar la infraestructura de control para evitar el colapso del embalse. Además, es importante considerar las proyecciones para los años 2024 hasta 2042, las cuales enfatizan la necesidad de implementar medidas preventivas para mitigar los efectos del azolvamiento, dado que muestra una creciente superación de la capacidad del embalse.

https://doi.org/10.56294/saludcyt2024.1067

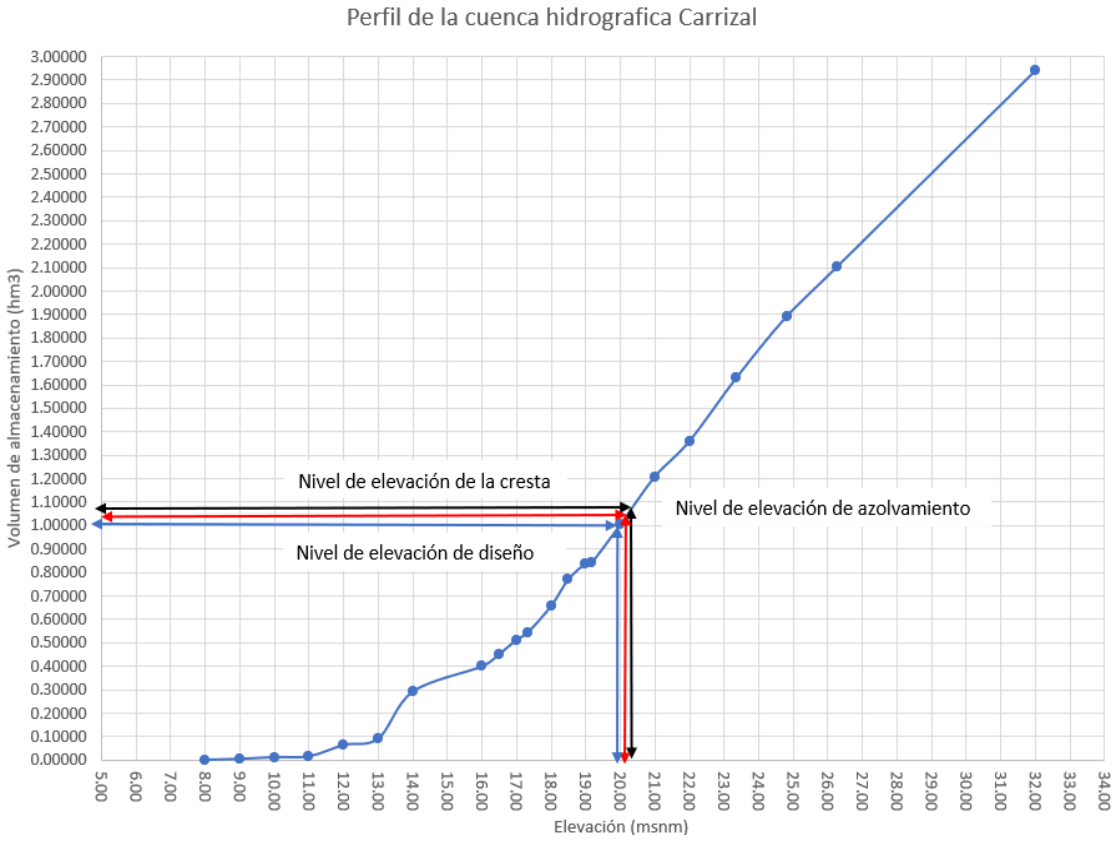


Figura 4. Perfil de Azolvamiento Proyectado para 2042

Características fisiográficas e hidrológicas

La evaluación de la cuenca que alimenta la Represa La Estancilla muestra que se trata de una cuenca relativamente pequeña, con una extensión de 2 391 km² y una superficie real que asciende a 2 394 km², tomando en cuenta las pendientes y curvaturas del terreno. A pesar de su tamaño, la cuenca tiene una red hidrológica robusta que promueve una evacuación eficiente de las aguas pluviales, aunque también implica un alto transporte de sedimentos hacia la represa. La tabla 1 proporciona un desglose de las características fisiográficas e hidrológicas más relevantes.

Tabla 1. Características fisiográficas e hidrológicas

Parámetro	Descripción
Área	2,391 km² - Considerada cuenca pequeña.
Área real de la superficie	2 394 km² - Calculada considerando pendientes y curvaturas.
Pendiente media	4,86 % - Contribuye a altos porcentajes de erosión en la parte superior.
Altura media	19,82 m - Altura promedio de la cuenca.
Coeficiente de compacidad	1,13 - Forma oval-oblonga de la cuenca.
Relación de elongación	0,70 - Relieves pronunciados, favoreciendo un buen drenaje.
Relación circular	0,78 - Eficiencia en la evacuación sin crecidas excesivas.

En la tabla 1 se pueden observar los parámetros tales como la pendiente media, de 4,86 %, que es bastante pronunciada en la parte superior de la cuenca, lo que aumenta la erosión y, por ende, la acumulación de sedimentos. La altura media de la cuenca es de 19,82 metros, y su coeficiente de compacidad, de 1,13, indica una forma ovalada, lo que influye en la rápida concentración de escurrimientos. La relación de elongación, de 0,70, confirma que los relieves de la cuenca favorecen un drenaje *adecuado* y eficiente, mientras que su relación circular, de 0,78, refuerza esta idea, destacando la capacidad de evacuación de la cuenca sin que esto implique crecidas significativas.

Comparación con la producción regional de sedimentos

Al comparar la producción de sedimentos de la cuenca de La Estancilla con otras cuencas de la región, queda

claro que esta presenta una tasa de sedimentación considerablemente elevada. Específicamente, la cuenca del Río Carrizal, que alimenta la represa genera aproximadamente 242,25 toneladas por km²/año, lo que coloca a la represa en un alto riesgo de azolvamiento. Este hecho destaca la necesidad de aplicar medidas de manejo de gestión de sedimentos para garantizar la funcionalidad del embalse a largo plazo. La tabla 2 muestra cómo el volumen de sedimentación aumenta en relación con la cota, proporcionando una representación clara del impacto progresivo del azolvamiento sobre la capacidad operativa del embalse.

Tabla 2. Volumen de sedimentación por intervalos de cota

Intervalo de Cota (m)	Área Acumulada (m²)	Volumen (hm³)	Volumen Acumulado (hm³)
7,00 a 13,00	167 731,87	0,09180	0,09180
13,00 a 16,00	466 682,68	0,30753	0,39933
16,00 a 18,00	1 171 526,47	0,19724	0,65712
18,00 a 20,00	2 209 505,09	0,28659	0,94371
20,00 a 23,36	3 652 377,48	0,62708	157079
23,36 a 26,27	4 338 326,94	0,47345	204424
26,27 a 32,00	2 378 729,17	0,83533	287957
Total	2 378 729,17	-	287957

La tabla 2 muestra un resumen del volumen de sedimentación desde la cota más baja hasta la más alta, destacando el crecimiento acumulativo del volumen de sedimentos en el embalse y proporcionando datos esenciales para la planificación de actividades de desazolve y manejo de la represa.

Aplicación de Tecnologías Emergentes para la Gestión de Sedimentación

Según Pricope y Bashit et al.[28] las tecnologías emergentes están cambiando la forma en que se gestionan los embalses y el manejo de los sedimentos, a través de la utilización de drones equipados con sensores de detección y alcance de la luz, comúnmente conocidos como LiDAR (light detection and ranging), los cuales permiten la recopilación de datos topográficos y batimétricos que son esencialmente para tareas como la navegación, el control de inundaciones y el monitoreo de la erosión en zonas costeras. Por otro lado, Szafarczyk y Toś et al.[29] mencionan que tradicionalmente, para medir la profundidad y la distribución de sedimentos bajo el agua era una tarea complicada, debido a los altos costos y el tiempo que requerían, sin embargo, los avances recientes han cambiado esto: la miniaturización de los sistemas LiDAR y su integración con drones han facilitado la recolección de datos tridimensionales de forma más rápida y económica.

Además, Tishechkin y Agbor et al.[30] resaltan que esta combinación ha posibilitado la creación de modelos tridimensionales de formaciones rocosas, con una alta resolución, lo cual resulta fundamental para el estudio geológico y estructural. El láser verde empleado por estos dispositivos penetra en los cuerpos de aguas que no son actos para la navegación, ofreciendo una evaluación detallada de la forma del lecho del río y de la disposición de los sedimentos. También se analizó que el uso de drones en combinación con la fotogrametría SfM (Structure from Motion) facilita el estudio geomorfológico en la restauración de ríos y embalses. Un ejemplo, el estudio del embalse del río Bellamy, donde pudieron mapear la vegetación y el movimiento de los sedimentos tras la remoción de una presa.[31,32]

Otra ventaja es que estas tecnologías han reducido la necesidad de depender de métodos que, además de ser costosos, eran bastantes lentos. En la actualidad se pueden utilizar drones y SfM para realizar monitoreos más precisos y económicos, tanto en zonas costeras o en áreas donde el drenaje ácido de minas ha alterado él ambiente. En estos lugares es donde los vehículos aéreos no tripulados conocidos como UAV (Unmanned Aerial Vehicle) han sido fundamentales para la obtención de datos hiperespectrales, que ayudan a clasificar los minerales en paisajes post-mineros.[32,33] En el ámbito costero, los UAV se han utilizado para crear modelos de superficie digital (DSM), el cual resulta muy útil para identificar las áreas de erosión y acreción, generando imágenes de alta resolución a un costo mucho más bajo que el LiDAR convencional.[33] Estas tecnologías han sido esenciales para monitorear ambientes que están en constante cambio, especialmente aquellos que están en áreas difíciles de acceder, donde su precisión de centímetros ha sido de mucha importancia para la reconstrucción de la topografía 3D.[34]

Asimismo, se están usando sensores para monitorear sedimentos en tiempo real. Por ejemplo, que se han implementado tecnologías como la reflectometría en el dominio del tiempo (TDR) para medir la concentración de sedimentos suspendidos durante eventos climáticos extremos, como tifones, siendo bastante efectiva en embalses como el de Shihgang.[35] Igualmente se están usando sensores que aprovechan las propiedades del agua y los sedimentos para medir la concentración de estos últimos de manera económica y precisa.[36] De igual manera, se han desarrollado sensores avanzados como el PLDD-TENG que ha demostrado ser muy preciso a la hora de identificar partículas de sedimentos usando aprendizaje profundo, lo que lo convierte en una

herramienta prometedora para monitoreo en tiempo real.[37] Igualmente, las redes de sensores inalámbricos (WSN) están siendo aplicadas en reservorios de petróleo para monitorear diferentes parámetros físicos y químicos, mejorando así la eficiencia del control de calidad.[38,39]

Finalmente, la inteligencia artificial (IA), también ha demostrado grandes beneficios para la gestión de embalses y de la sedimentación. Las redes neuronales artificiales (ANN) se están usando para predecir con precisión la cantidad de sedimentos que será expulsado durante una descarga, lo cual es muy útil en la toma de decisiones para los operadores de las hidroeléctricas.[40,41] Igualmente, los modelos híbridos de Wavelet-IA han sido efectivos para predecir la concentración de sedimentos en ríos, mejorando la gestión de cuencas hidrográficas.[42]

En algunos estudios recientes, como los realizados en sistemas de embalses en China, se ha demostrado que el uso de memoria a corto plazo LSTM (Long Short-Term Memory) y la unidad de recurrente cerrada GRU (Gated Recurrent Unit) permite hacer pronósticos mucho más útiles que los métodos deterministas tradicionales, lo cual ayuda a gestionar el agua de manera más eficiente y reducir los costos operativos.[43] Además, la IA ha sido usada para determinar el mejor lugar para instalar presas de control de sedimentos, lo que ayuda a reducir la erosión y mejorar la recarga de acuíferos.[44]

DISCUSIÓN

Las tecnologías emergentes pueden revolucionar la gestión de sedimentos en represas, cómo en el caso de la Represa La Estancilla. Se analizó como el azolvamiento afecta la capacidad del embalse a lo largo del tiempo mediante simulaciones realizadas con AutoCAD Civil 3D en diferentes escenarios climáticos. Se identificó que para el año 2024, la sedimentación alcanzará un 45,06 % de la capacidad activa del embalse, evidenciando la urgencia de implementar estrategias de mitigación efectivas para prevenir la pérdida total proyectada para 2042 (ver figura 4). Estos resultados indican que la dependencia exclusiva de métodos convencionales como el dragado podría ser insuficiente y perjudicial debido a su alto costo e impacto ambiental.

Por otro lado, la implementación de drones con sensores LiDAR y la aplicación de técnicas de fotogrametría SfM proporcionan un método más eficiente en el monitoreo y modelado de la acumulación de sedimentos. Estos avances tecnológicos han mostrado su utilidad no solo para mejorar la precisión de los datos topográficos, sino también al anticipar tendencias de acumulación de sedimentos, tal como se describe en los estudios previos sobre la represa del río Bellamy realizados por Evans et al.[31] La revisión sistemática, además, enfatiza que la incorporación de inteligencia artificial y redes neuronales puede optimizar la toma de decisiones al predecir volúmenes futuros de sedimentos, lo cual es crítico para asegurar la operatividad a largo plazo del embalse. La adopción de estas tecnologías emergentes podría marcar un antes y un después en la gestión del azolvamiento, asegurando así la funcionalidad y sostenibilidad de la Represa.

CONCLUSIONES

El estudio acerca demuestra que el problema de sedimentación está afectando significativamente el funcionamiento del embalse, con efectos aún más graves si no se aplican estrategias de mitigación. La necesidad de tecnologías de gestión de sedimentos más innovadoras y eficaces se manifiesta claramente a partir del hecho de que la presencia de sedimentos es un hecho patente. Los resultados obtenidos mediante la utilización de AutoCAD Civil 3D, señalando una disminución del 45,06 % en la capacidad del embalse en el año 2024, y una posible saturación completa para 2042, si no se implementan apropiadas medidas preventivas.

Según los resultados obtenidos en la revisión sistemática, se propone emplear drones equipados con sensores LiDAR y utilizar redes neuronales para el modelado, ambos métodos podrían mejorar la monitorización y previsión del depósito de sedimentos, lo que es esencial para la toma de decisiones a tiempo. Estas nuevas tecnologías ofrecen una alternativa viable y menos invasiva en comparación con prácticas tradicionales como el dragado, que es costoso y perjudicial para el medio ambiente.

En conclusión, es esencial la utilización de tecnologías innovadoras para la gestión de la sedimentación a fin de aumentar la precisión de vigilancia y la durabilidad de intervenciones llevadas a cabo. Si se emplean se garantiza la calidad continúa del embalse a largo plazo, atenuando las consecuencias negativas de la acumulación de sedimentos sobre el medio ambiente circundante y cuenca hidrográfica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Obando J, Vera M, Matsumoto I, Dublin D, Natori Y, Calispa A. Garantizar la conservación, la buena gobernanza y los medios de vida sostenibles a través de la gestión del paisaje de los ecosistemas de manglares en Manabí, Ecuador. 2018.

2. Espa P, Batalla R, Brignoli M, Crosa G, Gentili G, Quadroni S. Tackling reservoir siltation by controlled sediment flushing: Impact on downstream fauna and related management issues. PLoS One. 2019;14.

3. Winton R, Calamita E, Wehrli B. Reviews and syntheses: Dams, water quality and tropical reservoir stratification. Biogeosciences. 2019;

4. Majerova M, Neilson B, Schmadel N, Wheaton J, Snow C. Impacts of beaver dams on hydrologic and temperature regimes in a mountain stream. Hydrol Earth Syst Sci. 2015;19:3541–56.

5. Landwehr T, Kantoush S, Pahl-Wostl C, Sumi T, Irie M. The effect of optimism bias and governmental action on siltation management within Japanese reservoirs surveyed via artificial neural network. Big Earth Data. 2020;4:68–89.

6. Maavara T, Chen Q, Meter KV Van, Brown L, Zhang J, Ni J, et al. River dam impacts on biogeochemical cycling. Nat Rev Earth Environ. 2020;1:103–16.

7. Schälchli U. Basic Equations for Siltation of Riverbeds. Journal of Hydraulic Engineering. 1995 Mar;121(3):274–87.

8. Yang Z, Duan X, Huang J, Dong Y, Zhang X, Liu J, et al. Tracking long-term cascade check dam siltation: implications for debris flow control and landslide stability. Landslides. 2021 Dec 12;18(12):3923–35.

9. Wang Z, Gui L, Zhang J, Li Y. Research on the Influence of Siltation Height of Check Dams the on Discharge Coefficient of Broad-Crested Weirs. Water (Basel). 2023 Jan 27;15(3):510.

10. Kang RS, Chacko E, Kaur D, Viadero R. Silting patterns in the reservoirs of small- and medium-sized earthen check dams in humid subtropical monsoon regions. Earth Surf Process Landf. 2019 Oct 14;44(13):2638–48.

11. Turgeon K, Turpin C, Gregory-Eaves I. Dams have varying impacts on fish communities across latitudes: A quantitative synthesis. bioRxiv. 2018;

12. Doretto A, Bo T, Bona F, Apostolo M, Bonetto D, Fenoglio S. Effectiveness of artificial floods for benthic community recovery after sediment flushing from a dam. Environ Monit Assess. 2019;191:1–12.

13. Sun W, Zhang P. Analysis of Silt Dam System Grade and Joint Regulation in Typical Small Watershed of Loess Plateau. IOP Conf Ser Earth Environ Sci. 2020 Jun 1;526(1):012030.

14. Yong-Jun L. Integration of flow-sediment mathematical model and visualization system. Hydro-Science and Engineering. 2007;

15. Ji Z, Hamrick JH, Pagenkopf J. Sediment and Metals Modeling in Shallow River. Journal of Environmental Engineering. 2002;128:105–19.

16. Olsen N, Hillebrand G. Long-time 3D CFD modeling of sedimentation with dredging in a hydropower reservoir. J Soils Sediments. 2018;18:3031–40.

17. Hillebrand G, Klassen I, Olsen N. 3D CFD modelling of velocities and sediment transport in the Iffezheim hydropower reservoir. Hydrology Research. 2017;48:147–59.

18. Wu W, Rodi W, Wenka T. 3D NUMERICAL MODELING OF FLOW AND SEDIMENT TRANSPORT IN OPEN CHANNELS. Journal of Hydraulic Engineering. 2000;126:4–15.

19. Kougias I, Aggidis G, Avellan F, Deniz S, Lundin U, Moro A, et al. Analysis of emerging technologies in the hydropower sector. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019;

20. Mohafid S, Stour L, Agoumi A. Optimization of the methodology for valorization of mud retained by dams: Morocco case study. Global Journal of Engineering and Technology Advances. 2023;

21. Remini B. A NEW MANAGEMENT APPROACH OF DAMS SILTATION. LARHYSS Journal. 2017;51–81.

22. Rashid I, Pandit DrBA. Various Remedial Measures for Dam Siltation. Int J Res Appl Sci Eng Technol. 2023;

23. Kantoush S, Sumi T. The aging of Japan's dams: Innovative technologies for improving dams water and sediment management. 2016;1030–7.

24. Morris G. Classification of Management Alternatives to Combat Reservoir Sedimentation. Water (Basel). 2020 Mar 19;12(3):861.

25. Rachman LM, Hidayat Y, Tarigan SD, Sitorus SP, Fitri R, Ain AQ. The Effect of Agroforestry System on Reducing Soil Erosion in Upstream Ciliwung Watershed. IOP Conf Ser Earth Environ Sci. 2020 Aug 1;556(1):012010.

26. Lee Y, Yoon T, Shah FA. Economics of integrated watershed management in the presence of a dam. Water Resour Res. 2011 Oct 12;47(10).

27. Perera D, Williams S, Smakhtin V. Present and Future Losses of Storage in Large Reservoirs Due to Sedimentation: A Country-Wise Global Assessment. Sustainability 2023, Vol 15, Page 219 [Internet]. 2022 Sep;15(1):219. Available from: https://www.mdpi.com/2071-1050/15/1/219/htm

28. Pricope N, Bashit MdS. Emerging trends in topobathymetric LiDAR technology and mapping. Int J Remote Sens. 2023;44:7706–31.

29. Szafarczyk A, Toś C. The Use of Green Laser in LiDAR Bathymetry: State of the Art and Recent Advancements. Sensors (Basel). 2022;23.

30. Tishechkin D, Agbor Y. Step into Geological Samples Digital Twins. Day 4 Thu, October 05, 2023. 2023;

31. Evans A, Gardner K, Greenwood S, Still BM. UAV and Structure-From-Motion Photogrammetry Enhance River Restoration Monitoring: A Dam Removal Study. Drones. 2022;

32. Guilinger J, Foufoula-Georgiou E, Gray A, Randerson J, Smyth P, Barth N, et al. Predicting Postfire Sediment Yields of Small Steep Catchments Using Airborne Lidar Differencing. Geophys Res Lett. 2023;50.

33. Long N, Millescamps B, Guillot B, Pouget F, Bertin X. Monitoring the Topography of a Dynamic Tidal Inlet Using UAV Imagery. Remote Sens. 2016;8:387.

34. Clapuyt F, Vanacker V, Oost K. Reproducibility of UAV-based earth topography reconstructions based on Structure-from-Motion algorithms. Geomorphology. 2016;260:4–15.

35. Chung C, Wang YK. Practical Assessment of Real-Time Suspended Sediment Load Monitoring Using Time Domain Reflectometry. Water Resour Res. 2022;58.

36. Hsu Y, Wei C, Ting Y, Yuan SY, Chang CL, Chang KC. Capacitive sensing technique for silt suspended sediment concentration monitoring. International Journal of Sediment Research. 2010;25:175–84.

37. Yang L, Wang Y, Zhao Z, Guo Y, Chen S, Zhang W, et al. Particle-Laden Droplet-Driven Triboelectric Nanogenerator for Real-Time Sediment Monitoring Using a Deep Learning Method. ACS Appl Mater Interfaces. 2020;12 34:38192–201.

38. Guo H, Sun Z. Channel and Energy Modeling for Self-Contained Wireless Sensor Networks in Oil Reservoirs. IEEE Trans Wirel Commun. 2014;13:2258–69.

39. Eidam E, Langhorst T, Goldstein E, McLean M. OpenOBS: Open-source, low-cost optical backscatter sensors for water quality and sediment-transport research. Limnol Oceanogr Methods. 2021;20.

40. Lee CJ, Foster G. Assessing the potential of reservoir outflow management to reduce sedimentation using continuous turbidity monitoring and reservoir modelling. Hydrol Process. 2013;27.

41. Reisenbüchler M, Bui M, Rutschmann P. Reservoir Sediment Management Using Artificial Neural Networks: A Case Study of the Lower Section of the Alpine Saalach River. Water (Basel). 2021;

42. Rajaee T, Jafari H. Two decades on the artificial intelligence models advancement for modeling river

sediment concentration: State-of-the-art. J Hydrol (Amst). 2020;588:125011.

43. Guo Y, Xu Y, Yu X, Chen H, Gu H, Xie J. AI-based techniques for multi-step streamflow forecasts: Application for multi-objective reservoir operation optimization and performance assessment. Hydrol Earth Syst Sci. 2020;

44. Band SS, Pal SC, Bateni S, Jun C, Saha A, Chowdhuri I, et al. Using computational-intelligence algorithms and remote sensing data to optimize the locations of check dams to control sediment and runoff in Kandolus watershed, Mazandaran, Iran. Geocarto Int. 2022;37:12966–88.

FINANCIACIÓN

Ninguna.

CONFLICTO DE INTERESES

Ninguno.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Conceptualización: Martha Johana Álvarez-Álvarez, Julio Johnny Regalado-Jalca, Julio Cesar Pino Tarragó.
Curación de datos: Martha Johana Álvarez-Álvarez, Julio Johnny Regalado-Jalca, Julio Cesar Pino Tarragó.
Análisis formal: Martha Johana Álvarez-Álvarez, Julio Johnny Regalado-Jalca, Julio Cesar Pino Tarragó.
Investigación: Martha Johana Álvarez-Álvarez, Julio Johnny Regalado-Jalca, Julio Cesar Pino Tarragó.
Metodología: Martha Johana Álvarez-Álvarez, Julio Johnny Regalado-Jalca, Julio Cesar Pino Tarragó.
Administración del proyecto: Martha Johana Álvarez-Álvarez, Julio Johnny Regalado-Jalca, Julio Cesar Pino Tarragó.
Recursos: Martha Johana Álvarez-Álvarez, Julio Johnny Regalado-Jalca, Julio Cesar Pino Tarragó.
Software: Martha Johana Álvarez-Álvarez, Julio Johnny Regalado-Jalca, Julio Cesar Pino Tarragó.
Supervisión: Martha Johana Álvarez-Álvarez, Julio Johnny Regalado-Jalca, Julio Cesar Pino Tarragó.
Validación: Martha Johana Álvarez-Álvarez, Julio Johnny Regalado-Jalca, Julio Cesar Pino Tarragó.
Visualización: Martha Johana Álvarez-Álvarez, Julio Johnny Regalado-Jalca, Julio Cesar Pino Tarragó.
Redacción: Martha Johana Álvarez-Álvarez, Julio Johnny Regalado-Jalca, Julio Cesar Pino Tarragó.
Redacción – revisión y edición: Martha Johana Álvarez-Álvarez, Julio Johnny Regalado-Jalca, Julio Cesar Pino Tarragó.