

Nota Técnica

Plataforma de Información Geográfica del Centro Internacional de Hidroinformática

Geographic Information Platform of the International Hydroinformatics Center

Santiago Vera ^{1*}, María Eugenia Alderete ¹

Recibido: 12/02/2018

Aceptado: 15/01/2019

*Autor de correspondencia

Resumen

La Plataforma de Información Geográfica fue diseñada por el Centro Internacional de Hidroinformática para proporcionar un mejor acceso a información geográfica (IG) de alta calidad entre los funcionarios de la Itaipu Binacional y otros colaboradores vinculados con la gestión de recursos hídricos. La plataforma conjuga un software libre y de código abierto estable y robusta con una interfaz amigable y moderna permitiendo a los usuarios utilizar e interactuar con datos espaciales en el ambiente de trabajo. La Plataforma de Información Geográfica tiene los siguientes objetivos: (1) organizar la información geográfica a través de una Infraestructura de Datos Espaciales (IDE), (2) disponer de la información geográfica a los usuarios interesados, (3) promover la interacción entre los diferentes usuarios de información geográfica. Algunas de las funcionalidades de la Plataforma de Información Geográfica son la carga de datos, metadatos, documentos y la creación de mapas. Los datos pueden ser visualizados y compartidos por los usuarios, dependiendo de las restricciones previamente establecidas. La creación de grupos de usuarios facilita el uso, la gestión y el control de calidad de datos de la plataforma. Una de las principales ventajas de la Plataforma de Información Geográfica es la flexibilidad con la que los desarrolladores de software pueden mejorar sus características y adaptarlas a las necesidades de los usuarios.

Palabras clave: Información geográfica, datos espaciales, software libre y de código abierto.

Abstract

The Geographic Information Platform was designed by the International Hydroinformatics Center to facilitate access to high-quality geographic information among Itaipu Binacional officials and other collaborators involved in water resources management. The platform combines a free and open source and robust software with a friendly and modern interface that allows users the use and interaction with spatial data in the work environment. The Geographic Information Platform has the following objectives: (1) organize geographic information through a Spatial Data Infrastructure (IDE), (2) make geographic information available to interested users, (3) promote interaction between different users of geographic information. Some of the functionalities of the Geographic Information Platform are loading data, metadata, documents and creating maps. The data can be visualized and shared by users, depending on the restrictions established. The creation of user groups facilitates the use, management and quality control of the platform's data. One of the main advantages of the Geographic Information Platform is the flexibility with software developers can improve their characteristics and adapt them to the needs of users.

Keywords: *Geographic information, spatial data, free and open source software.*

1 Centro Internacional de Hidroinformática, Itaipu Binacional-Unesco, Paraguay, veraaqui@itaipu.gov.py ; alcormar@itaipu.gov.py

1. INTRODUCCIÓN

En el pasado, la colecta, provisión y utilización de la información geográfica (IG) era un campo de interés exclusivo de ciertas instituciones gubernamentales. Hoy en día, esta tarea es realizada por un sinnúmero de instituciones para fines de provisión de servicios públicos, científicos, comerciales, etc. Además, la ciudadanía en general ha pasado a ser un actor clave como usuario de IG, pasando a utilizarla regularmente a través de software de navegación hasta llegar a ser proveedor de información a través de plataformas como *OpenStreetMap*. Debido a esto, muchos países cuentan con información accesible, completa y a tiempo real sobre su territorio (Paudyal *et al.*, 2009).

Los términos “información geográfica”, “información espacial”, “datos espaciales”, “datos geográficos” son utilizados como sinónimos, en este artículo adoptaremos el término “información geográfica” (IG). La IG es relevante porque conjuga información relativa a la ubicación en la tierra con características biofísicas, sociales y económicas, siendo un insumo directo en la planificación, la toma de decisiones, las políticas públicas, la gestión ambiental, la preparación ante emergencias, la creación de nuevos productos, la movilidad y la participación comunitaria (Welle, 2009).

Pese al gran avance en la diseminación de la IG y el desarrollo de los sistemas de IG, se han detectado deficiencias en los canales de compartición y publicación de IG entre diferentes instituciones e inclusive en el interior de las mismas, ocurre que la IG se encuentra diseminada en diferentes áreas, se desconoce la forma en que fueron generados o no se encuentran accesibles. Estos procesos repercuten en una alta demanda de recursos, duplicación de tareas y generan desconfianza sobre la calidad de la IG. Ante esta situación, han surgido diferentes iniciativas en todo el mundo que alientan el uso de Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) con el fin de mejorar el uso de la IG.

La iniciativa INSPIRE, es una de las directiva supranacionales más relevantes, su propósito es hacer disponible la IG concertada y de calidad de forma que se permita la formulación,

implementación, monitorización y evaluación de las políticas de impacto o de dimensión territorial de la Unión Europea. Infraestructura de datos espaciales de España (Inspire-Europeo, 2007).

Según Bernabé *et al.*, (2012) una infraestructura de información geográfica o infraestructura de datos espaciales (IDE), es una herramienta que hace posible el intercambio y compatibilización de la IG a través especificaciones técnicas comunes y acciones coordinadas de recolección y mantenimiento de datos.

El *Global Spatial Data Infrastructure Association Cookbook* (Nebert, 2004), se refiere a una IDE como el conjunto de tecnologías, políticas y acuerdos instituciones que facilitan la disponibilidad y acceso a IG, promoviendo un marco para optimizar la creación, mantenimiento y distribución de la IG a diferentes niveles organizativos, involucrando instituciones privadas y públicas. Igualmente la IDE es descrita como un concepto dinámico, jerárquico y multidisciplinario que envuelve políticas, competencias organizacionales, datos, tecnología, estándares, mecanismos de entrega y recursos humanos (Paudyal *et al.*, 2009). También es posible definir a una IDE como un portal donde diferentes actores pueden acceder, usar, intercambiar IG para lograr el bienestar social, económico y ambiental (Paudyal *et al.*, 2009).

En la actualidad, se encuentran disponibles diversos tipos de IDEs, algunos son de ámbito local como las IDEs municipales (Rio de Janeiro a través del Sistema Nacional de Informaciones Urbanas), otras son a nivel nacional (Infraestructura de Datos Espaciales de España, Infraestructura Nacional de Datos Espaciales de Brasil, Infraestructura de Datos Espaciales de Canadá), otras son creadas a nivel mundial para dar una respuesta ante emergencias, como el Programa Mundial de Alimentos.

También se han desarrollado IDEs en base a una temática específica, un ejemplo de ellos es el Sistema de Red de Información sobre el Agua desarrollado por el Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO, esta IDE contiene información a escala mundial relacionada con

ecohidrología, agua subterránea, los objetivos de desarrollo sostenible, educación, asentamientos, calidad, riesgos y escasez. El objetivo del sistema es servir de referencia mundial en el diseño y gestión de funciones de apoyo para la toma de decisiones, que contribuyan a mejorar la gobernanza de los recursos hídricos y asistir a los estados miembros en el monitoreo implementación del Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 para "garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos" (ODS6) Programa Hidrológico Internacional (UNESCO, 2018).

En el ámbito de las cuencas hidrográficas, se ha identificado el proyecto SDIGER, un proyecto piloto para la implementación de una IDE, financiado por la Comisión Europea en los años 2006-2008. El proyecto consistió en el desarrollo de una IDE para permitir el acceso a IG relativa a la Directiva Marco del Agua, en el marco de un escenario transfronterizo, envolviendo a dos países (Francia y España) y dos cuencas hidrográficas (Zaragoza-Soria *et al.*, 2007).

La mayoría de los fenómenos hidrológicos y climáticos que ocurren en un territorio, sobrepasan las fronteras políticas y administrativas de los municipios, departamentos y naciones. Disponer de IG actualizada y homogénea es clave para la toma de decisiones eficaces en el marco de la gestión integrada de los recursos hídricos. La gestión integrada de los recursos hídricos se caracteriza por ser multidisciplinaria y por requerir participación multinivel, es decir, por un lado es necesaria información de aspectos ambientales, sociales y económicos y por otro lado, demanda información a nivel local, nacional y regional (Bernabé *et al.*, 2012).

2. METODOLOGÍA

La Plataforma de Información Geográfica fue desarrollada por el Centro Internacional de Hidroinformática para mejorar el acceso a la información geográfica entre los usuarios de la Itaipu Binacional y otros actores claves en la gestión de los recursos hídricos de la cuenca del embalse.

La Plataforma de Información Geográfica tiene los siguientes objetivos:

1. Organizar la información geográfica a través de una Infraestructura de Datos Espaciales (IDE).
2. Que los usuarios interesados dispongan de la información geográfica.
3. Promover la interacción entre los diferentes usuarios de información geográfica.

Los componentes principales de la Plataforma de Información Geográfica son: datos, tecnologías de acceso, metadatos, estándares, esquema organizativo y usuarios.

2.1 Datos

Son los recursos que se ponen a disposición de los usuarios con las restricciones de uso que decida su propietario, los tipos de datos que se encuentran en la plataforma son los siguientes:

- *Capas*: las capas son un recurso publicado que representa una fuente de datos espaciales *raster* (información presentada a través de una matriz de celdas) o vectoriales (información representada a través de puntos, líneas y polígonos).
- *Mapas*: los mapas se componen de varias capas y sus estilos. Las capas pueden ser capas locales en la Plataforma de Información Geográfica o capas remotas servidas desde otros servidores web.
- *Documentos*: los documentos pueden ser archivos reales o enlaces a otros documentos en línea y pueden estar asociados a una capa o un mapa.

2.2 Tecnologías de acceso

Las tecnologías son lo que hacen visible la IDE, a través de los portales, los datos ingresan a esta haciendo posible la búsqueda, acceso y exploración. El catálogo permite al usuario navegar de forma eficaz por la información contenida en una IDE.

La IDE se basa en el modelo de arquitectura informática denominado cliente-servidor. Esta tecnología es la que generalmente utilizan las

aplicaciones de internet-intranet, donde un software llamado genéricamente cliente, que funciona en un ordenador local, se comunica y realiza una petición a un ordenador remoto que le responde con la información o el servicio solicitado. Un único servidor sirve a una multitud de clientes, ahorrando a cada uno de ellos problema de tener la información almacenada localmente y verse obligado a actualizarla y gestionarla.

La plataforma de Información Geográfica se basa en *GeoNode*, una aplicación web y una plataforma para el desarrollo de sistemas de información geográfica y la implantación de una IDE. El portal permite gestionar IG a través de la web, está diseñado para permitir el acceso a la base de datos georreferenciadas, productos cartográficos y metadatos relacionados de diversas fuentes. Su principal característica es el uso de un *software* libre, lo que permite mejorar sus características y adaptarlas a las necesidades de los usuarios (Geonode, 2018).

2.3 Metadatos

Los metadatos son las descripciones de los datos y servicios disponibles, permitiendo al usuario tener información sobre el objetivo, la calidad, actualidad, disponibilidad, restricciones, etc., de la IG. Los metadatos permiten que la IG sea interoperable y pueda ser compartida entre diferentes sistemas (Luaces *et al.*, 2016).

Los metadatos de la plataforma son los siguientes:

- *Identificación*: título, resumen, fecha de publicación, tipo, categoría, regiones.
- *Dueño*: nombre, correo electrónico, posición, organización, ubicación, voz, fax.
- *Información*: imagen de identificación, resolución especial, sistema de proyección.
- *Características*: propósito, idioma, información adicional.
- *Punto de contacto*: nombre, correo electrónico, posición, organización, ubicación, voz, fax.
- *Referencias*: enlace en línea, página de metadatos.

- *Autor del metadatos*: nombre, correo electrónico, posición, organización, ubicación, voz, fax.

2.4 Estándares

Para asegurar el buen funcionamiento de una IDE, es indispensable el uso de estándares, estos posibilitan la interoperabilidad de la plataforma.

El estándar de metadatos geográfico adoptado se basa en la norma internacional ISO 19115:2003 *Geographic Information-Metadata*. Esta norma presenta la estructura y terminología que describe la IG y garantiza que la información obligatoria para los criterios de búsqueda se cumpla conforme a los protocolos internacionales de búsqueda y recuperación de información. ISO 19119:2005. La norma ISO 19115 es extensa, por lo tanto se seleccionaron aquellos elementos que conforman un perfil de metadatos. Este perfil de metadatos incluye los elementos de mayor importancia en el ámbito de aplicación de la IDE (Luaces *et al.*, 2016).

Los servicios de la plataforma utilizan estándares abiertos aprobados por el *Open Geospatial Consortium*. En particular se utilizan los siguientes estándares:

- WMS (*Web Map Service*) para acceder mapas
- WFS (*Web Feature Service*) para acceder a datos de vectores,
- WCS (*Web Coverage Service*) para acceder a datos de trama o raster.
- WMC (*Web Map Context Documents*) se utiliza para el intercambio de mapas.

2.5 Esquema organizativo

Las distintas áreas que generan IG dentro de la Itaipu Binacional fueron identificadas, cada área ha designado a un responsable de suministrar y actualizar la Plataforma de Información Geográfica con la adecuada frecuencia.

El Centro Internacional de Hidroinformática es el encargado de coordinar y mantener la Plataforma de Información geográfica actualizada.

2.6 Usuarios

Los usuarios son los pilares de la Plataforma de Información Geográfica, ya que son quienes utilizan la herramienta y aseguran su mantenimiento y evolución. Los usuarios de la plataforma son colaboradores de la Itaipu Binacional y usuarios de otras instituciones vinculadas a la gestión de los recursos hídricos de la cuenca como universidades, centros de investigación, municipalidades, organismos no gubernamentales y personas individuales.

La plataforma de IG, clasifica a los usuarios según su perfil en:

- *Usuario temporal*: usuario no registrado que visita la plataforma y la utiliza como un visor web.
- *Usuario no editor*: usuario registrado que accede a la plataforma, puede descargar recursos.
- *Usuario editor*: usuario registrado que accede a la plataforma, puede descargar y suministrar recursos.
- *Usuario gestor*: usuario que gestiona los usuarios y recursos de la IDE.
- *Administrador*: responsable de mantener la infraestructura y dar soporte técnico a los restantes usuarios.

2.7 Funcionalidades de la plataforma

La plataforma permite la visualización de una lista con todas las capas, mapas y documentos disponibles, cada recurso cuenta con sus metadatos, así como información sobre la cantidad de visualizaciones que tuvo cada recurso, la cantidad de veces que fue compartido, su calificación promedio y la posibilidad de crear mapas a partir de las capas.

Otras de las funcionalidades de la Plataforma de Información son la carga de datos, metadatos, documentos y la creación de mapas. Los datos pueden ser visualizados y compartidos por los usuarios, dependiendo de las restricciones previamente establecidas. La creación de grupos de usuarios facilita el uso, la gestión y el control de calidad de datos de la plataforma.

3. RESULTADOS

La Plataforma de Información Geográfica fue presentada a las altas partes como una herramienta para la concreción de los objetivos estratégicos de la Itaipu Binacional. Luego, funcionarios de distintas áreas fueron capacitados a través de los talleres básico y avanzado y se designaron responsables de actualizar los recursos de cada área. En conjunto, se fijaron lineamientos para los metadatos con el fin de armonizar la información y asegurar una rápida comprensión por parte de los usuarios.

Actualmente, la Plataforma de Información Geográfica permite el acceso a una amplia gama de IG relacionada con la gestión de los recursos hídricos. Las capas disponibles están en formato vectorial o *raster* y se distribuyen en 14 categorías: agricultura y ganadería, agua, ambiente, biota, catastro, cobertura terrestre, economía, elevación, estructura, geociencia, límites, localización, sociedad, transporte. La extensión geográfica de las capas disponibles es variable, dependiendo de la fuente específica de cada conjunto de datos. Están disponibles capas que cubren toda la región de América del Sur (por ejemplo, cursos de agua de América del Sur, de tipo vectorial) y una gran cantidad de capas locales, que se refieren a áreas específicas (por ejemplo, curvas de nivel de Itaipu Binacional). Cada capa cuenta con información sobre los metadatos, atributos y las opciones de compartir, puntuar y comentar.

Combinando las capas, se puede confeccionar mapas interactivos, gestionar estilos, medir, acercar o alejar el mapa y agregar leyendas. La plataforma utiliza como lienzo, las imágenes de *Google Satellite* y *OpenStreetMap*.

La plataforma pone a disposición documentos de tipo texto y mapas estáticos. Los documentos de tipo texto, en su mayoría son informes a cerca de actividades de monitoreo de calidad de agua. Los mapas, por su parte, corresponden a temas relacionados con modelados 3D en cuencas, mapas de batimetría, altimetría, inundación, planificación territorial, etc.

Otra funcionalidad adicional de la plataforma de IG es la posibilidad de descargar datos de la

plataforma Yrato, una plataforma para el monitoreo hidrológico en tiempo casi real de los principales ríos del Paraguay. En la sección “Yrato” es posible descargar imágenes (*raster*) de precipitación del proyecto GPM (Medición Global de la precipitación, por sus siglas en

inglés) en la cuenca del Plata, con un retraso de cinco horas. Además, es posible descargar datos de calidad y altura de agua de diversos puntos de los ríos Paraná, Paraguay (ríos transfronterizos) y el lago Ypacarai (Paraguay). Las figuras 1 a 4 muestran el detalle de la plataforma.

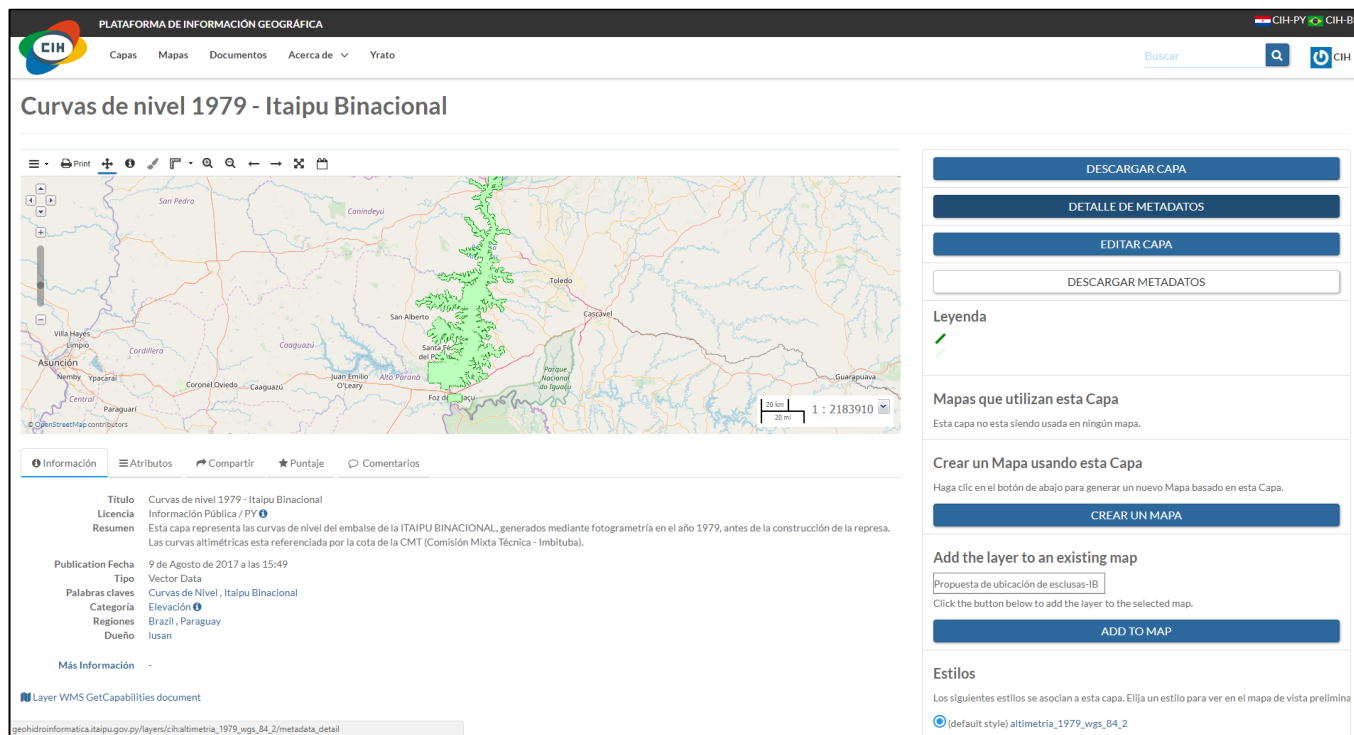


Figura 1. Capa en la Plataforma de Información Geográfica

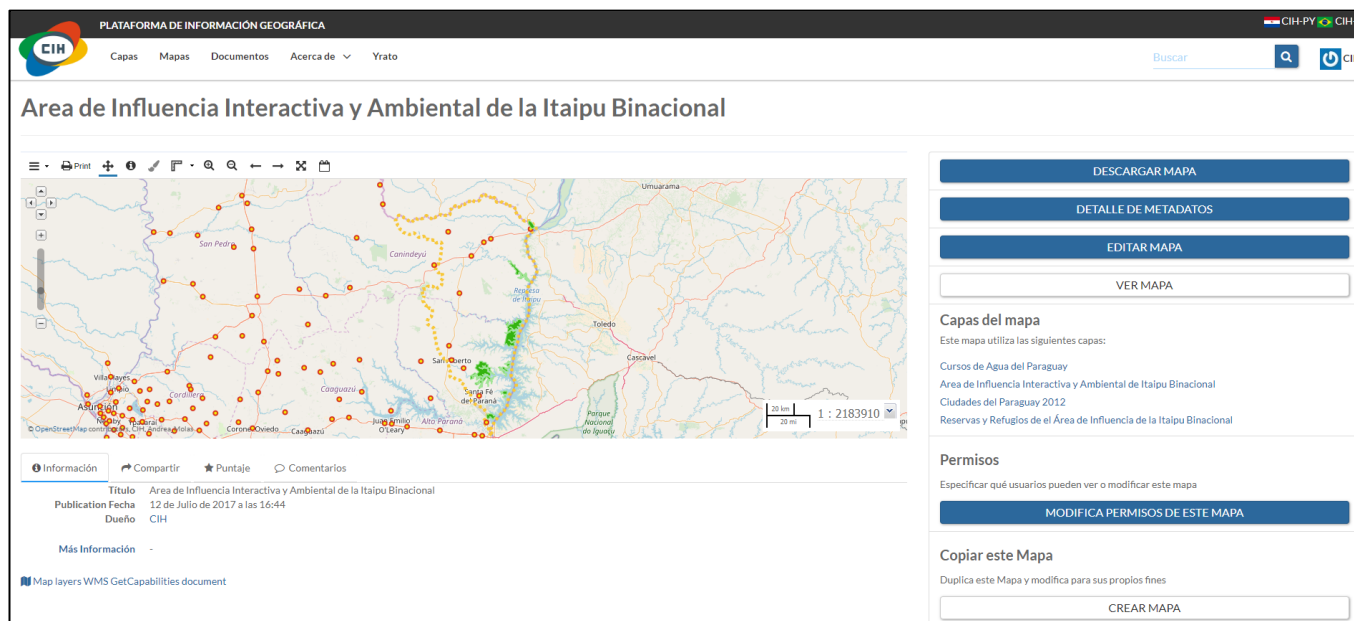


Figura 2. Mapa dinámico en la Plataforma de Información Geográfica

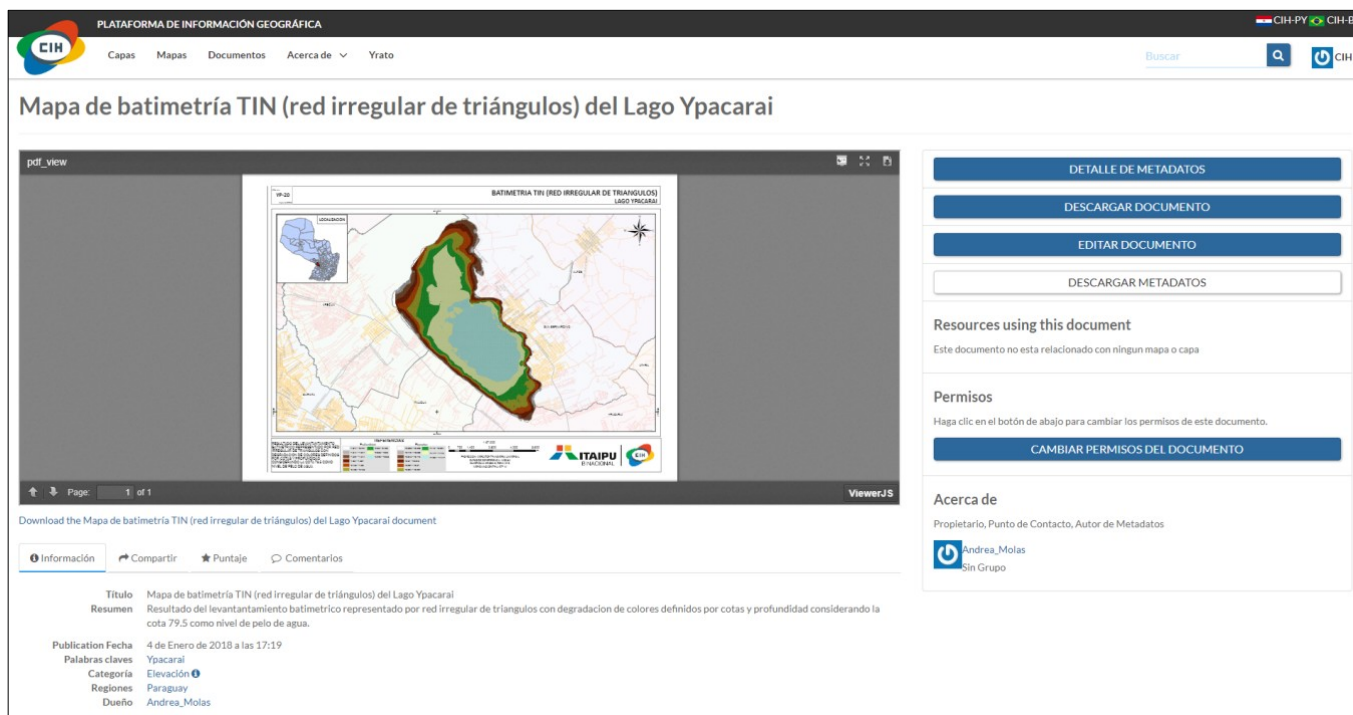


Figura 3. Documento de tipo mapa en la Plataforma de Información Geográfica

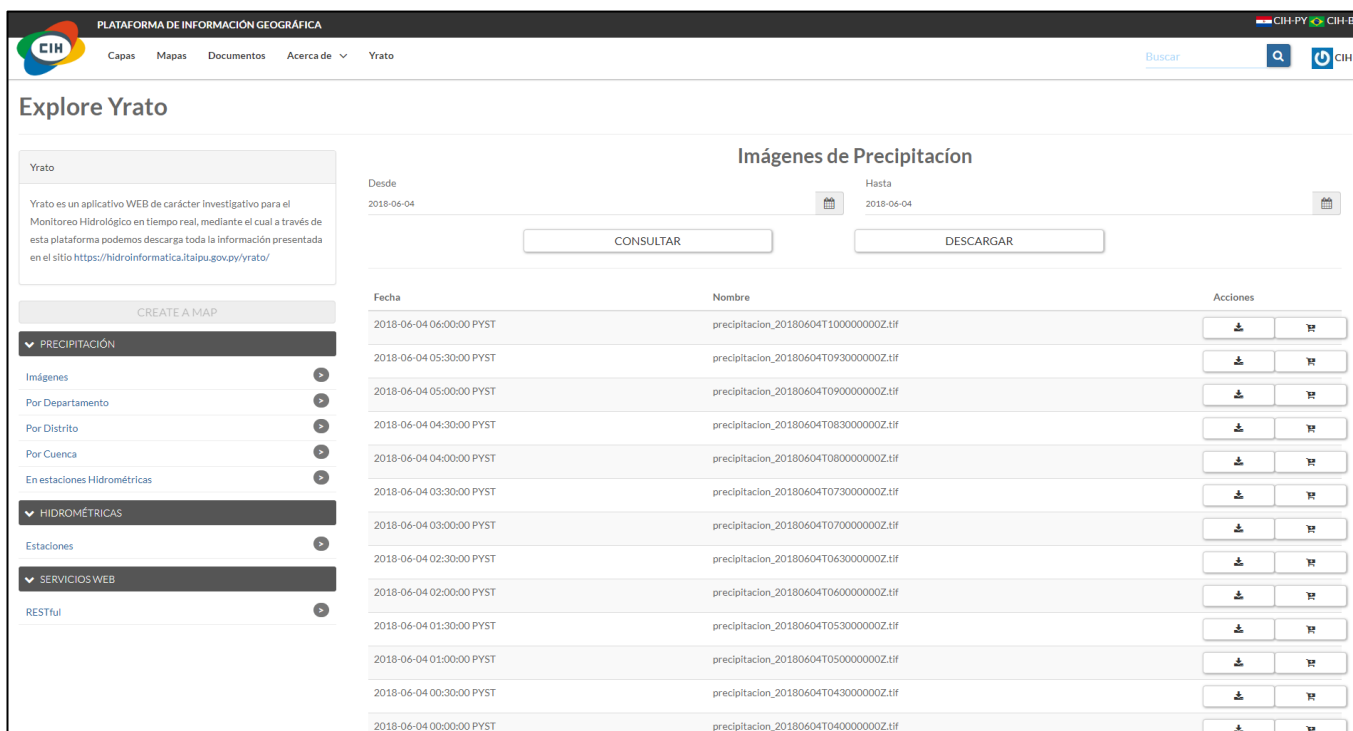


Figura 4. Opción de descarga de datos de “Yrato” en la Plataforma de Información Geográfica

4. CONCLUSIONES

La plataforma de Información Geográfica permite a los usuarios de la Itaipu Binacional y sus colaboradores externos acceder a IG de manera rápida y confiable para la gestión de los recursos hídricos en la cuenca del embalse.

La falta de cultura informacional, la falta de visiones globales, el rechazo a las nuevas tecnologías, la falta de coordinación y el desconocimiento del potencial de la IG han sido identificadas como obstáculos en la implantación de la IDE.

Para la implantación exitosa de una IDE, se identificaron ciertas características necesarias: (1) responder a las necesidades reales de los usuarios de la IG (2) contar con la infraestructura necesaria (*software y hardware*) y personal para mantenerlos y actualizarlos según las necesidades de los usuarios, (3) contar con un esquema organizativo eficaz en donde se identifique claramente a los responsables de cada actividad y que éstos le dediquen el tiempo suficiente para cumplir con los objetivos. (Luaces, 2016).

REFERENCIAS

- Bernabé, M., López-Vázquez, C. (2012). *Fundamentos de la Infraestructura de Datos Espaciales*. UPM Press, 1ª Ed. Madrid, España.
- Geonode. *Open Source Geospatial Content Management System*. (2018). 18/05/2018. <http://geonode.org/>
- Inspire-Europeo. (2007). *Infraestructura de datos espaciales de España*. 2018. 18/05/2018. <http://www.idee.es/europeo-inspire>
- Luaces, M., Olaya, V., Fonts, O. (2016). *Sistemas de Información Geográfica*. 15/05/2018. <http://volaya.github.io/libro-sig/index.html>
- Nebert, D. (2004). *The SDI Cookbook. Global Spatial Data Infrastructure*. 18/05/2018. http://gsdiassociation.org/images/publications/cookbooks/SDI_Cookbook_GSDI_2004_ver2.pdf
- Paudyal, D., McDougall, K., Apan, A. (2009). *Building SDI Bridges for Catchment Management*. p 265. In: SDI Convergence. Research, Emerging Trends, and Critical Assessment. B. van Loenen, J.W.J. Besemer, J.A. Zevenbergen (Editors). Netherlands Geodetic Commission. Delft, Holanda.
- UNESCO. (2018). Water Information Network System (IHP-WINS). 18/05/2018. <http://ihp-wins.unesco.org/>
- Welle, F. (2009). *Public Sector Geo Web Services: Which Business Model Will Pay for a Free Lunch?* p 35. In: SDI Convergence. Research, Emerging Trends, and Critical Assessment. B. van Loenen, J.W.J. Besemer, J.A. Zevenbergen (Editors). Netherlands Geodetic Commission. Delft, Holanda.
- Zarazaga-Soria, F., Noguera-Iso, J., Latre, M., Rodríguez, A., López, E., Vivas, P., Muro-Medrano, P. (2007). *Providing Spatial Data Infrastructure Service in a Cross-Border Scenario: The SDIGER Project*. p 108. In: Research and Theory in Advancing Spatial Data Infrastructure Concepts. Onsrud, H. Esri. California, USA.

Nota Técnica

Programa CSED-TRANSVEL para cuantificar transporte de sedimentos en cauces



CSED-TRANSVEL program to quantify transport of sediments in channels

Juan Pablo Molina-Aguilar ^{1*}, José Armando Vélez-Vargas ²

Recibido: 07/02/2019

Aceptado: 28/02/2019

*Autor de correspondencia

Resumen

En cauces naturales ocurre de manera permanente el transporte de sólidos conjuntamente con el agua, dicho material refiere a sedimentos minerales del cauce o de su cuenca de aportación. El mecanismo de movimiento, suspensión o arrastre, lo definen las características físicas de las partículas y los fenómenos hidrodinámicos. Las metodologías para su cuantificación han sido desarrolladas empíricamente y requieren algunas de ellas procedimientos elaborados donde intervienen en ocasiones procesos iterativos para definir la solución, las cuales han sido agrupadas en transporte de fondo, transporte de fondo en suspensión, transporte de fondo total, transporte de lavado, transporte en suspensión y transporte total. Ello motivó el desarrollo de una herramienta computacional para cuantificar los distintos transportes de sedimentos dentro de un cauce natural. Su desarrollo se basó en la hipótesis de que el cauce de estudio se aproxima al funcionamiento de un canal prismático acorde con sus características geométricas e hidráulicas. Se logró compilar un programa ejecutable en equipos de cómputo de 32 y 64 bits desarrollado en Visual Basic Net dentro del entorno Visual Studio, con una página inicial de entrada de datos, una estructura reticular conformada por el tipo de sedimento y el método de cuantificación, además de una página resumen de los cálculos. El resultado es una herramienta compatible con el sistema operativo Windows, amigable para el usuario final, que reduce el tiempo de cálculo, mejora la certidumbre del resultado obtenido y capaz de resolver el método completo de Hanss Einstein.

Palabras clave: Sedimento, suspendido, arrastrado, cauce natural, canal prismático.

Abstract

In natural streams occurs permanently transport of solids together with water, this material refers to mineral sediments of the streambed or its watershed. The mechanism of movement, suspension or dragging is defined by the physical characteristics of the particles and by hydrodynamic phenomena. The methodologies for their quantification have been developed empirically and require some of them to be followed by iterative processes to define the solution, which have been grouped into bottom transport, bottom suspended transport, total bottom transport, washed transport, suspension transport and total transport. This motivated the development of a computational tool to quantify the different sediment transports within a natural channel. Its development was based on the hypothesis that the study stream approaches the operation of a prismatic channel according to its geometric and hydraulic characteristics. It was possible to compile an executable program in 32-bit and 64-bit computer equipment developed in Visual Basic Net within the Visual Studio environment, with an initial data input page, a reticular structure formed by the type of sediment and the quantification method, as well as a summary page of the calculations. The result is a tool compatible with the Windows operating system, user-friendly, which reduces the calculation time, improves the certainty of the results obtained and capable of solving the complete method of Hanss Einstein.

Keywords: Sediment, suspended, dragged, natural channel, prismatic channel.

1 Departamento de Hidráulica, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Edificio H, Ciudad Universitaria, Francisco J. Mújica S/N. Col. Felicitas del Río, Morelia, Michoacán, México, C.P. 58030 valnabar@hotmail.com

2 ISSGEO Ingenieros S.A. de C.V. Morelia, Michoacán. avelez.issgeo@@outlook.com

1. INTRODUCCIÓN

Las partículas al interior de un cauce natural suelen ser transportados como sedimentos de fondo o sedimentos suspendidos, ello en función de las propiedades del material del cauce y su relación con las características del flujo (Van Rijn, 1993). Para llevar a cabo su cuantificación se han desarrollado múltiples ecuaciones desde los primeros trabajos de du Boys y que suelen basarse en la tensión de arrastre sobre el lecho del río, el caudal, una función estocástica para el movimiento o bien la potencia hidráulica (García y Sala, 1998), en las cuales cada autor define las condiciones de aplicación de cada una de ellas. Reduciendo tanto los errores y los tiempos de cómputo.

La condición inicial considerada en cada una de las formulaciones es el equilibrio de las partículas ubicadas en el lecho del cauce, entre las fuerzas desestabilizadoras (sustentación y arrastre) y estabilizantes (gravedad y fricción) (Aguirre-Pe y Olivero, 2000). Dichas fuerzas definen la complejidad en la mecánica del transporte de sedimentos, por lo que no existe una ecuación dinámica para la fase sólida en un flujo bifásico (Martin, 2002). En su lugar las ecuaciones empíricas propuestas no son exactas, dan soluciones aproximadas y restringidas a los límites de las variables consideradas, que han sido desarrolladas en canales experimentales donde se controla la relación entre las características hidráulicas y los sedimentos generados.

El desarrollo de programas se ha llevado a cabo con distintos enfoques, Luna *et al.*, (2013) desarrollaron el programa Hidra_flu 1.0 como propuesta para resolver la complejidad de calcular volúmenes de sedimentos transportados por lechos naturales empleando metodologías empíricas, logrando reducir los errores y el tiempo de cómputo, desarrollaron formularios en Visual Basic considerando el sistema metros (SI) y validaron los resultados respecto de un estudio sedimentológico obteniendo diferencias de 0.37% a 17.15%. El programa DEHIDRO facilita el diseño de estructuras hidráulicas en sistemas de riego y drenaje empleando el módulo de sedimentos para la cuantificación de arrastre de material considerando datos concretos de las

partículas y para calcular el transporte de fondo-suspensión-total emplearon las metodologías de Van Rijn, Meyer, Engelund-Hansen y Acker-White; además de la distribución de los sedimentos en una columna de agua (DEHIDRO, 2019). Por su parte la programación del modelo EIH AD32_TS para cuantificar el transporte de sedimentos fue realizada en el entorno de Windows de 32 bits, su algoritmo es de adaptación no instantánea que no incluye fuentes tanto constantes como variables (EIH, 2019). La herramienta computacional SETRA v1.0 (Salinas-Tapia *et al.*, 2014) se conformó de 4 módulos: la interfaz principal, la adquisición de los datos de proyecto, el análisis granulométrico del material y el cálculo de transporte de sedimentos. Todos ellos programados en Matlab2008b. Mientras que el programa SEDIMENT V 1.0 calcula el transporte de sedimentos en ríos considerando la carga de fondo, en suspensión y el total. Desarrolla y resuelve las metodologías de Duboys-Straub, Schoklits, Shields, Meyer-Peter y Müller, Leva, Einstein, Einstein-Brown, Sato-Kikkawa-Ashida, Rottner, Frijlink, Yalin, Pernecker-Vollmer, Inlis-Lacey, Bogardi, Van Rijn, Engelund-Hansen, Shen-Hung, Yang, Ackers-White, Brownlie, Karim-Kannedy y Graf-Acaroglu (HYDROVLAB, 2019)

La finalidad de calcular la cantidad de material transportado en un cauce deriva de su uso en diseño u operación de diversas obras hidráulicas; como puede ser la definición de la capacidad muerta en un embalse, la frecuencia del dragado en cauces como en embalses, el diseño de tanques sedimentadores, la altura de una obra de toma, por citar algunos (Pérez *et al.*, 2010).

Por ello se presenta la herramienta computacional Cuantificador de Sedimentos en una sección Transversal (CSED-TRANSVEL) desarrollada en lenguaje Visual Basic NET dentro del entorno de Visual Estudio 2010, que realiza la cuantificación de los distintos transportes de sedimentos dentro de un cauce natural, ofreciendo la posibilidad al usuario de seleccionar los datos que requiere en las actividades hidráulicas e hidrológicas.

2. METODOLOGÍA

2.1 sección tipo y características geométricas asociadas

En el desarrollo metodológico propuesto, se hizo la aproximación de la sección transversal del cauce natural en estudio a una sección transversal trapezoidal (figura 1), análoga a un canal prismático. Dicha sección queda definida mediante el ancho de la base (b), los taludes

izquierdo (K_i) y derecho (K_d) en las márgenes, la pendiente longitudinal (S) y la magnitud de calado o tirante dentro de la sección (d), éste último asociado a un caudal (Q) que puede ser función de un periodo de retorno (Tr). Las dimensiones de la sección transversal permiten obtener las características geométricas área hidráulica (A), perímetro mojado (P), Radio hidráulico (R_h), Ancho de superficie libre del agua (B) y tirante hidráulico medio (d_m), descritas por las ecuaciones 15 a 17.

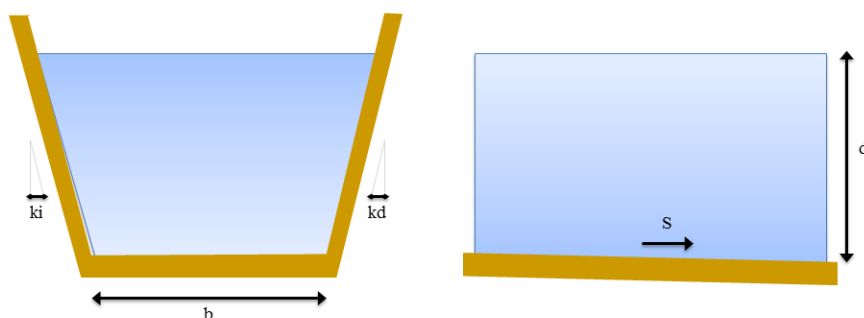


Figura 1. Sección transversal tipo y sus dimensiones geométricas

$$A = bd + kd^2 \quad (1)$$

$$P = b + 2d\sqrt{1 + k^2} \quad (2)$$

$$R_h = \frac{A}{P} \quad (3)$$

$$B = b + 2kd \quad (4)$$

$$d_m = \frac{A}{B} \quad (5)$$

2.2 Propiedades de los sedimentos y su distribución granulométrica

Una característica primordial en cauces naturales es la heterogeneidad en la forma y peso de las partículas del material, lo cual hace necesario un estudio granulométrico. En este estudio se definen propiedades que caractericen de manera pertinente la heterogeneidad mencionada, entre ellas el peso específico del material (γ_s) y el coeficiente de rugosidad (n). Una vez cribada una muestra obtenida *in situ* y graficados los resultados en distintos papeles probabilísticos, se define a que ley de probabilidad se asemeja la

distribución de diámetros en la muestra del cauce. Siendo posible posteriormente la definición de cualquier diámetro nominal (D_n) necesario para el cálculo de los sedimentos transportados. Como se aprecian en las ecuaciones (6) a (9) de la tabla 1, es necesario conocer tres diámetros nominales característicos del material granulométrico en estudio. Los diámetros D_{16} , D_{50} y D_{84} deben ser obtenidos del estudio de granulometría realizado y la magnitud de la variable aleatoria de probabilidad (Z_n) que corresponde con el diámetro nominal (D_n) a definir.

Tabla 1. Distribuciones granulométricas de sedimentos

Distribución	Expresión	Desviación estándar geométrica	Ecuación
Log-Normal	$D_n = D_{50}(\sigma_g)^{Z_n}$	$\sigma_g = \frac{D_{84}}{D_{50}}$	(6)
Normal	$D_n = D_{50} + Z_n(\sigma_g)$	$\sigma_g = \sqrt{D_{84} - D_{16}}$	(7)
Logarítmica	$D_n = D_{50}10\left[\left(\frac{n-50}{34}\right)\log(\sigma_g)\right]$	$\sigma_g = \frac{D_{84}}{D_{50}}$	(8)
Log - Log	$D_n = D_{50}e^{\left[\frac{\ln\left(\frac{n}{50}\right)\ln(\sigma_g)}{\ln\left(\frac{84}{54}\right)}\right]}$	$\sigma_g = \frac{D_{84}}{D_{50}}$	(9)

2.3 Características y propiedades hidráulicas

La correcta caracterización del fluido que interactúa con los sedimentos, establece la precisión y certidumbre de los resultados obtenidos al cuantificarse los sedimentos en las metodologías de las secciones transporte de fondo, transporte total de fondo sin separar, transporte total de fondo separando y transporte en suspensión. Debe verificarse la temperatura del fluido (T) *in situ*, para definir los valores de la viscosidad cinemática (ν) y el peso específico (γ) asociados.

No obstante se requiere la definición de parámetros que asocien las características de los materiales con el flujo, acorde con los resultados de estos parámetros se puede definir el tipo de sedimento que está presente en el cauce. De

manera concreta la magnitud de la aceleración de la gravedad (g) tiene un rol trascendental en relación fluido-sedimentos en particular su relación de pesos específicos (Δ) calculada con la ecuación (10).

Algunos de los parámetros que involucran ambos elementos son la velocidad de caída (w) acorde con la morfología de los sedimentos (ecuación 11) propuesta por Rubey (1933) en términos del parámetro F_1 (ecuación 12), la velocidad media de la corriente con transporte de sedimentos (U) propuestas por Maza - Cruickshank (1973) que contemplan el régimen inferior (ecuación 13) y el régimen superior (ecuación 14). Por su parte el parámetro adimensional de Shields (τ^*) indica el momento en el cual las partículas del fondo inician su movimiento (ecuaciones 15 a 17).

$$\Delta = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \tag{10}$$

$$w = F_1 \sqrt{g \Delta D} \tag{11}$$

$$F_1 = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36\nu^2}{g \Delta D^3}} - \sqrt{\frac{36\nu^2}{g \Delta D^3}} \tag{12}$$

$$U = 7.58 w_{50} \left(\frac{d}{D_{84}}\right)^{0.634} \left(\frac{S}{\Delta}\right)^{0.456} \rightarrow \frac{1}{S} \geq 83.5 \left(\frac{d}{\Delta D_{84}}\right)^{0.350} \tag{13}$$

$$U = 6.25 w_{50} \left(\frac{d}{D_{84}}\right)^{0.644} \left(\frac{S}{\Delta}\right)^{0.352} \rightarrow \frac{1}{S} \leq 66.5 \left(\frac{d}{\Delta D_{84}}\right)^{0.382} \tag{14}$$

$$\tau^* = \frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma)D} = \frac{\gamma R_h S}{(\gamma_s - \gamma)D} = \frac{R_h S}{\Delta D} \tag{15}$$

$$Re_* = \frac{U_* D}{\nu} \quad (16)$$

$$U_* = \sqrt{g R_h S} \quad (17)$$

2.4 Generalidades del transporte de sedimentos

La medición de la cantidad de sedimentos transportados en un cauce puede realizarse en unidades de peso (kg/s) o bien en volumen (m³/s). En el caso del primer tipo es de uso

común su manejo por unidad de B , con el cual se obtiene el gasto sólido unitario (g) cuyas unidades serán kg/s-m (ecuación 18). En el segundo caso el gasto sólido unitario (q) tendrá unidades m³/s-m. La relación entre ambas mediciones es función de γ_s .

$$g = \gamma_s(q) \quad (18)$$

Acorde con el origen del arrastre y el transporte de los sedimentos (figura 2) se han asignado los nombres: de lavado (G_L), de fondo (G_B), de fondo en suspensión (G_{BS}), en suspensión (G_S),

de fondo total (G_{BT}) y total (G_T). La definición de cada uno de ellos puede obtenerse al multiplicar

$$G = g(B) \quad (19)$$

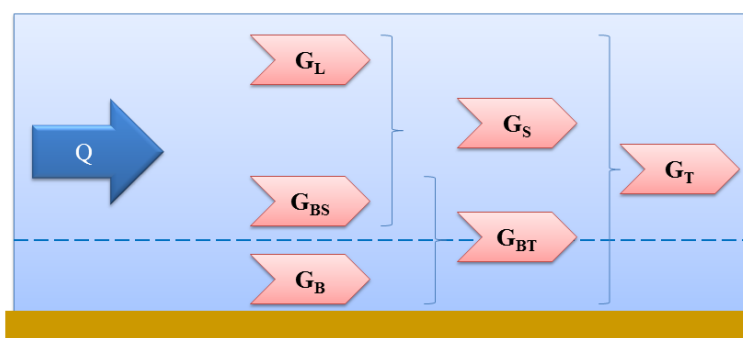


Figura 2. Definición del transporte de sedimentos acorde con su origen

2.5 Transporte de fondo

Para determinar el transporte de fondo (g_B) en la estructura del programa desarrollado, se consideraron las metodologías de Meyer-Peter y

Müller (1948), Frijlink (1982) y Pernecker y Vollmers (1965).

Método de Meyer-Peter y Müller

$$g_B = 8\gamma_s \sqrt{g \Delta D_m^3} \left[\left(\frac{n'}{n} \right)^2 \tau^* - 0.047 \right]^{\frac{3}{2}} \quad (20)$$

$$n' = \frac{D_{90}^{\frac{1}{6}}}{26} \quad (21)$$

La aplicación de las ecuaciones (2) y (3) se limita a las restricciones $0.40 \text{ mm} < D_m < 30 \text{ mm}$; $0.04 < S < 0.2$; $1 \text{ cm} < d < 120 \text{ cm}$; $0.002 \text{ m}^3/\text{s} < Q < 4 \text{ m}^3/\text{s}$; $1.25 \text{ t/m}^3 < \gamma_s < 4.02 \text{ t/m}^3$, D_{90} en m.

Método de Frijlink

$$g_B = 5\gamma_s D_{50} \sqrt{\mu R_h S} e^{\left(\frac{-0.27}{\mu \tau_*}\right)} \rightarrow \left(\frac{1}{\mu \tau_*}\right) \leq 18 \quad (22)$$

$$\mu = \left(\frac{C}{18 \log\left(\frac{12 R_h}{D_{90}}\right)}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (23)$$

$$C = \frac{U}{\sqrt{R_h S}} \quad (24)$$

En la ecuación (24) se determina U utilizando la ecuación (13) o (14) pertinente.

Método de Pernecker y Vollmers

$$g_B = 25\gamma_s \sqrt{g \Delta D_m^3} (\tau_*)^{\frac{3}{2}} (\tau_* - 0.04) \quad (25)$$

La ecuación (25) es aplicable cuando la ecuación (15) es menor que 0.5. Si no se cumple con esta restricción la ecuación en realidad define el transporte total de fondo (g_{BT}).

2.6 Transporte total de fondo sin separar

Los métodos que permiten calcular el transporte total de fondo (g_{BT}), sin especificar qué porcentaje corresponde tanto a (g_B) como a

(g_{BS}), fueron propuestos por Engelund y Hansen (1967) con buenos resultados para cauces arenosos, Graf y Acaroglu (1968) con aplicación a secciones circulares y Brownlie (1981) realizó su propuesta a partir del análisis dimensional de los parámetros que intervienen en el fenómeno. La ecuación (29) es aplicable cuando en el cauce el flujo presenta régimen inferior, por su parte la ecuación (30) es para régimen superior.

Método de Engelund y Hansen

$$g_{BT} = \frac{0.04\gamma_s (R_h S)^{\frac{3}{2}} U^2}{\sqrt{g} \Delta^2 D_{35}} \quad (26)$$

Aplicable para $0.15 \text{ mm} < D_{50} < 2 \text{ mm}$, $Re \geq 1200$.

Método de Graf y Acaroglu

$$g_{BT} = \frac{20\gamma_s \sqrt{g} (R_h S)^{3.3}}{\Delta^{2.8} D_m^{1.8}} \quad (27)$$

Método de Brownlie

$$g_{BT} = 9.0218 U \bar{d} (Fr_g - Fr_{gc})^{1.987} S^{0.6601} \left(\frac{D_{50}}{R_h}\right)^{0.3301} \quad (28)$$

$$U = \frac{4.5294\sqrt{g}d^{0.5293}S^{0.3888}}{D_{50}^{0.0293}\sigma_g^{0.1606}} \quad (29)$$

$$U = \frac{7.515\sqrt{g}d^{0.6005}S^{0.4605}}{D_{50}^{0.1005}\sigma_g^{0.01283}} \quad (30)$$

$$Fr_g = \frac{U}{\sqrt{g\Delta D_{50}}} \quad (31)$$

$$Fr_{gC} = \frac{4.596\tau_{*C}^{0.5293}}{S^{0.1405}\sigma_g^{0.1606}} \quad (32)$$

$$\tau_{*C} = \frac{0.22}{D_*^{0.90}} + \frac{0.06}{10D_*^{0.90}} \quad (33)$$

$$D_* = D_{50} \left(\frac{g\Delta}{v^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (34)$$

2.7 Transporte total de fondo separando

Método de Einstein

En este tipo de metodologías uno de los más completos fue propuesto por Hanss Einstein (1950) al considerar la mayor cantidad de parámetros presentes en el fenómeno. Su propuesta determina las características hidráulicas de la corriente al generarse el transporte de sedimentos, con ellas calcula g_B y g_{BS} . En su procedimiento establece la solución de dos integrales (35) y (36) cuya variable de integración no es explícita lo que dificulta su

solución algebraica, que adicionalmente dependen de parámetros adicionales (37) y (38). Como propuesta de solución a las integrales 35 y 36, Maza-Alvarez y García-Flores, (1993) presentan un gráfico para resolver cada integral. Acorde con la estructura de ellas se trata de una familia de curvas paramétricas en un papel doble logarítmico. La solución basada en esta propuesta establece un error de precisión dada las escalas de sus ejes y desde luego la proximidad entre curvas lo que eleva el grado de imprecisión en el valor definido de ambas integrales.

$$I_1 = 0.216 \frac{A^{Z-1}}{(1-A)^Z} \int_A^1 \left(\frac{1-Y}{Y} \right)^Z dy \quad (35)$$

$$I_2 = 0.216 \frac{A^{Z-1}}{(1-A)^Z} \int_A^1 \left(\frac{1-Y}{Y} \right)^Z \ln(Y) dy \quad (36)$$

$$Z = 2.5 \frac{w_i}{U_*} \quad (37)$$

$$Ar = 2 \frac{D_i}{d_m} \quad (38)$$

Método de Bagnold

Otra propuesta metodológica fue establecida por Bagnold (1966) quien presentó ecuaciones específicas para cada tipo de transporte, g_B (39) y g_{BS} (40).

Ambas se caracterizan por ser mucho más simples de aplicar que la elaborada y extensa

propuesta de Einstein, sin embargo requieren definirse un factor de eficiencia en el arrastre (e_b) como función de U y D_m , así como la desviación de trayectorias entre partículas líquidas y sólidas ($\tan \alpha$) en función de τ_* y D_m . Los parámetros e_b y $\tan \alpha$ pueden determinarse mediante solución gráfica propuesta por el propio autor.

$$g_B = \frac{\gamma_S \tau_* U D_m e_b}{\tan(\alpha)} \quad (39)$$

$$g_{BS} = \frac{0.01 \gamma_S \tau_* U^2 D_m}{w_m} \quad (40)$$

2.8 Transporte en suspensión

Método de Brooks

La cuantificación del transporte en suspensión (g_S) fue abordado en investigaciones realizadas por Brooks (1958), define su expresión en

términos de la concentración de partículas medido a la mitad del tirante medio ($C_{d/2}$) y un factor $f\left(Z, \frac{kU}{U_*}\right)$ definido con base a un parámetro adimensionales y la constante de Von-Karman, presentando una solución grafica para este último.

$$g_S = q C_{d/2} \left[f\left(Z, \frac{kU}{U_*}\right) \right] \quad (41)$$

Método de Lane y Kalinske

Los investigadores Lane y Kalinske (1941) empleando las distribuciones de velocidades

propuesta por Prandtl y Von-Karman y de concentración de sedimentos suspendidos de autoría propia, para calcular g_S .

$$g_S = q C_y e^{(6ZA)} P_1 \quad (42)$$

$$P_1 = \frac{1.7n\sqrt{g}}{d^6} \quad (43)$$

$$C_y = C_a e^{\left\{ \frac{-15w}{U_*} \left(\frac{y-a}{d} \right) \right\}} \quad (44)$$

Método de Einstein

Einstein propuso también una expresión para calcular g_S , la cual es consistente con la descripción realizada en la sección transporte total de fondo separando de este trabajo.

Presenta la ventaja de calcular el transporte de sedimentos en cualquier profundidad dentro del calado del cauce en estudio.

$$g_S = 11.6 U_*' \gamma (C_y) (P_1 + I_2) \quad (45)$$

Lenguaje de programación

La implementación en lenguaje de las ecuaciones 1 a 45, acorde con la lógica establecida por los autores de cada uno de los métodos descritos para calcular el transporte de sedimentos en cauces naturales, se desarrolló la programación en la paquetería de Visual Studio 2010. Dicho programa está orientado al

desarrollo de aplicaciones empresariales y de negocios, las cuales pueden ser desarrolladas en lenguajes Java, C, C+, C++ o Visual Basic NET. Visual Studio tiene como características la posibilidad de ofrecer una interfaz amigable a los usuarios finales y al programador la posibilidad de realizar compilaciones para que sean ejecutadas en sistemas de 32 o 64 bits. Se decidió implementar los algoritmos en Visual

Basic NET en el entorno de Visual Studio, particularmente por las ventajas de su interfaz. Ya que permite crear formularios de forma visual ahorrando tiempo en la implementación de código para programar y desarrollar la interfaz de usuario final del programa.

3. CASO DE ESTUDIO

Con la finalidad de evaluar cada uno de los métodos descritos en las secciones transporte de

fondo, transporte total de fondo sin separar, transporte total de fondo separando y transporte en suspensión, se llevaron a cabo estudios en el río Pitillal, ubicado en el estado de Jalisco, México.

El tramo de estudio está definido desde su cruce con la carretera que da acceso a Puerto Vallarta hasta el delta que se genera en la desembocadura con el Océano Pacífico (figura 3).

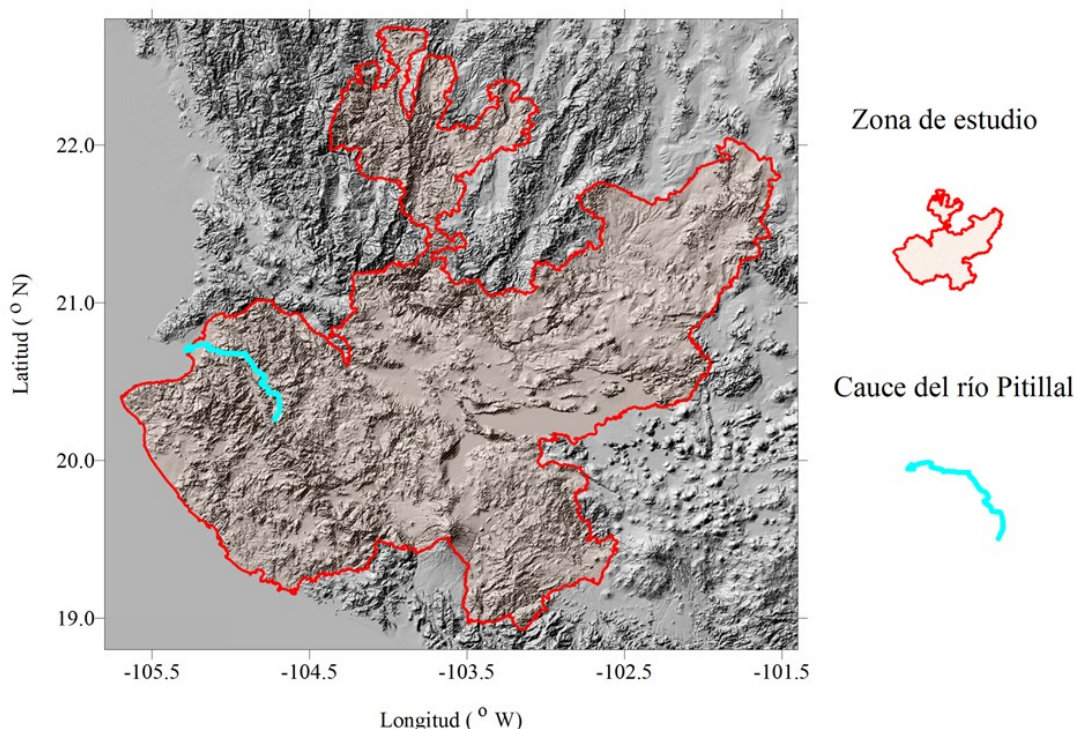


Figura 3. Tramo de estudio del río Pitillal del estado de Jalisco, México

Los estudios se realizaron a lo largo de 2120 m de longitud, identificándose con el cadenamiento 0+000 su cruce con la carretera y 2+120 la desembocadura. Las mediciones topográficas definieron un ancho en el cauce (d) de 67.00 m, un calado (d) de 2.50 m, la pendiente longitudinal del tramo (S) es de 0.002278, la margen izquierda tiene un talud (K_i) de 5:1 mientras que la margen derecha (k_d) es 4:1.

De la muestra de material que conforma el cauce, los estudios de mecánica de suelos le asignan un coeficiente de rugosidad (n) de magnitud 0.022, sus partículas presentaron una

distribución de probabilidad tipo Logarítmica, cuyos diámetros representativos D_{50} fue de 0.70 mm y D_{84} de 4.00 mm, la desviación geométrica (σ_g) asociada es 5.714 para un peso específico (γ_s) de 2,352 kg/m³.

Respecto del muestreo del fluido (d_c) realizado a una profundidad de 1.50 m medida desde la superficie libre del agua hacia el fondo del cauce, presentó una concentración de sedimentos (C_{sed}) de 3.99 ppm en peso asociada con una temperatura (T) de 25° C.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La estructura propuesta para el programa es mediante la utilización de dos pantallas. La primera de ellas tiene el objetivo ingresar todas las características geométricas del cauce natural, las propiedades de los sedimentos y del fluido así como la concentración suspendida. En el caso particular de los sedimentos ofrece al usuario la posibilidad de seleccionar una de las cuatro distribuciones granulométricas de sedimentos definidas por las ecuaciones (6), (7), (8) y (9), a partir de las cuales mediante el uso de los diámetros representativos se pueden generar los diámetros nominales necesarios para la aplicación de las metodologías consideradas en el programa. También se establecieron espacios necesarios para identificar el proyecto mediante el nombre y ubicación del sitio de estudio (figura 4a). La segunda pantalla contempla pestañas en la parte superior que consideran un método

específico para mostrar los resultados obtenidos. De forma análoga pestañas en la margen izquierda, las primeras cuatro concentran los métodos para cada tipo específico de sedimentos y la última para concentrar los resultados obtenidos.

En cada método los encabezados de las tablas consideran un fondo amarillo con texto en color naranja. En caso de ser necesario algún parámetro propio del método de cuantificación, se da la posibilidad de ingresar su valor mediante ventanas específicas. Adicionalmente se colocaron ventanas desplegables en la cuales se pueden decidir número de intervalos de cálculo o expresiones concretas para concluir la cuantificación. Una vez definidas estas características adicionales se activa el botón "análisis" ubicado en la esquina superior derecha (figura 4b).

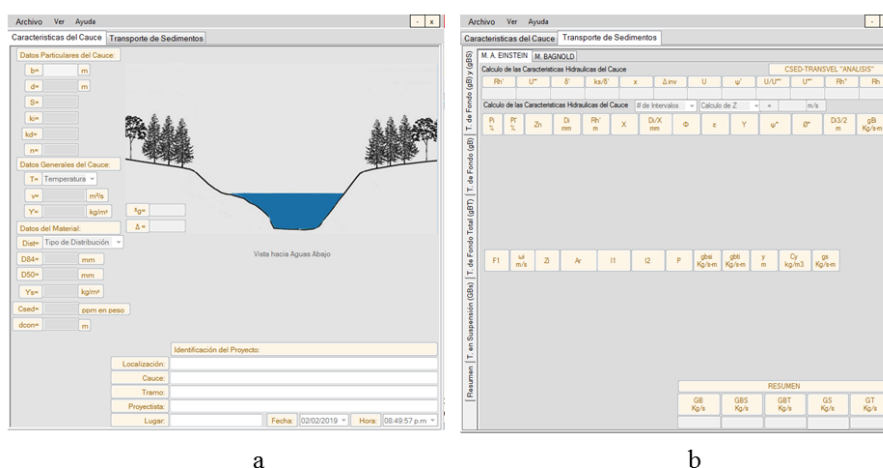


Figura 4. (a) Vista de la página de inicio del programa CSED-TRANSVEL y (b) la estructura en pestañas para ejecutar los métodos en cada tipo de transporte de sedimentos

La primera cuantificación es el transporte total del fondo separando de g_B y g_{BS} , iniciando con el método de Hanss Einstein (figura 5a). El cual se activa una vez ingresados todos los datos de entrada en la pantalla inicial (figura 4a), antes de mostrar los cálculos realizados se definen mediante las ventanas desplegables el número de intervalos para realizar el cálculo respectivo, se pueden ingresar 4, 5 o 10 intervalos, de igual manera se define la velocidad de corte para

definir Z en términos de las partículas o bien las ondulaciones del fondo.

En la implementación de las ecuaciones (35) y (36) se llevó a cabo una integración numérica definiendo el intervalo de integración mediante 50,000 segmentos, los cuales garantizaron la aproximación deseada y que corresponde a un error máximo del 4%. En el caso de los títulos de columnas con texto en color negro, indican que

al presionarla se desplegara la gráfica de la cual se tomó el valor consignado o de ser necesario incluirlo manualmente, como lo requiere el método de Bagnold (figura 5a,b) para los parámetros del factor de eficiencia en el arrastre (e_b) y la desviación de las trayectorias de las

partículas líquidas con las sólidas ($\tan \alpha$). En ambas pestañas, una vez ingresados los parámetros adicionales necesarios, se activa en botón de cálculo que se indica mediante los bordes en color azul.

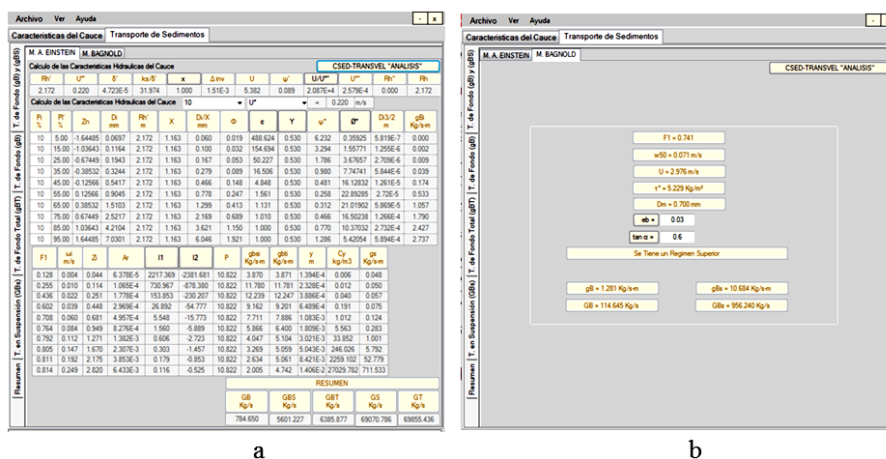


Figura 5. Resultados del cálculo de transporte total del fondo separando en g_B y g_{BS} con la metodología de Hanss Einstein (a) y Bagnold (b)

La segunda pestaña del lado izquierdo permite cuantificar el transporte de fondo g_B , como se aprecia solamente dos métodos fueron aplicados (figura 6a), ello debido a que en el caso del método de Perneckner y Vollmers en realidad calcula g_{BT} . Dado que el parámetro

adimensional de Shields (τ^*) es mayor que 0.50, por lo que en la tercera pestaña que corresponde al transporte total de fondo inicia con dicho método y se consiguan adicionalmente los resultados de los métodos de Engelund y Hansen, brownlie y Graf y Acaroglu (figura 6b).

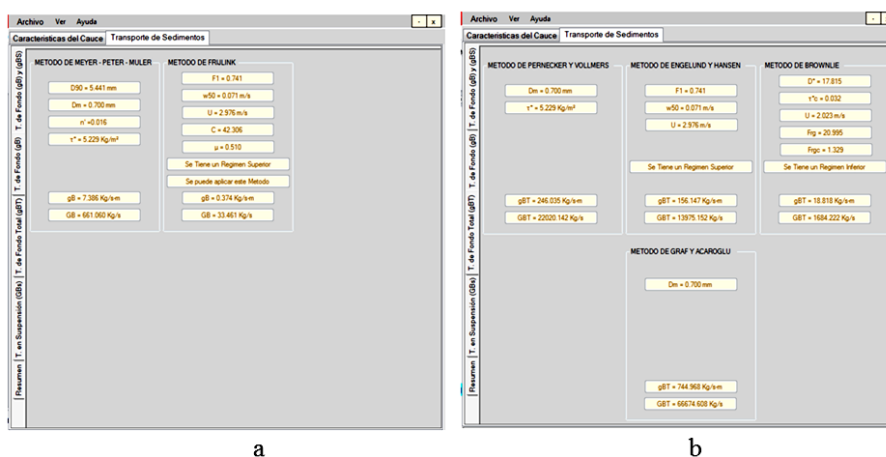


Figura 6. Resultados del cálculo del transporte de fondo g_B (a) y del transporte total de fondo g_{BT} (b)

La cuarta pestaña (figura 7a) muestra la cuantificación del transporte en suspensión

utilizando dos métodos el de Brooks y el de Lane y Kalinske. En el primero de ellos requiere

ingresar un parámetro adicional definido por el autor, por ello se vuelve a indicar el botón análisis para concluir las operaciones.

La quinta pestaña (figura 7b) presenta la síntesis de todos los métodos descritos. De los cuales

definir la solución correcta requiere de la experiencia y el conocimiento del proyectista, tanto del sitio de proyecto como de los métodos empleados.

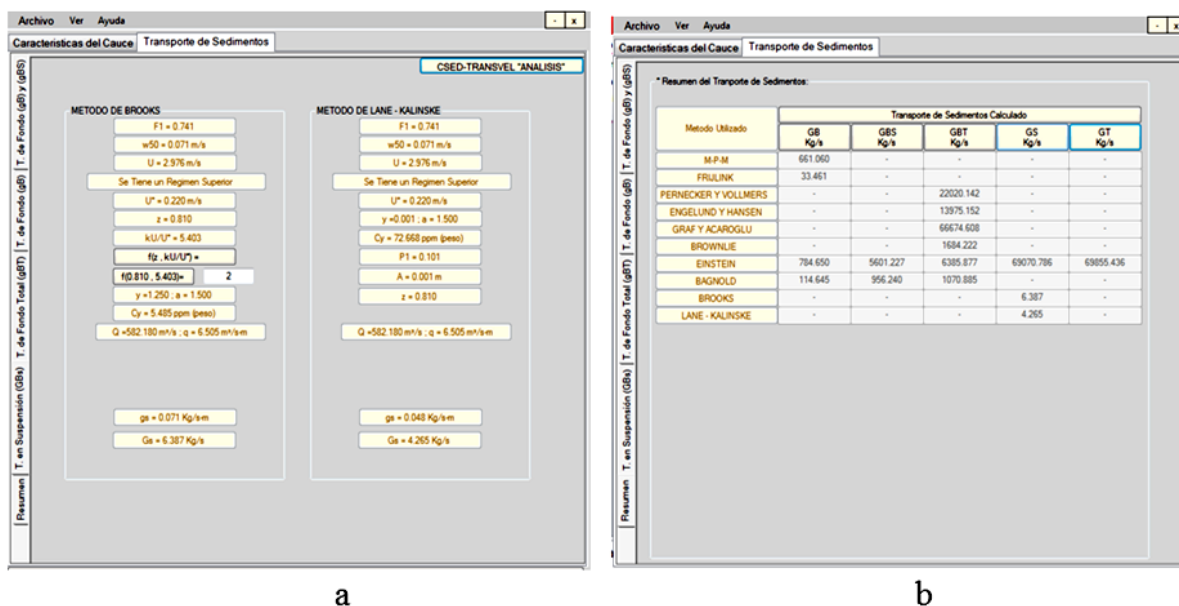


Figura 7. Resultados del cálculo de transporte total del fondo g_{BS} (a) y resumen de los métodos resueltos (b)

Los resultados obtenidos para el transporte de sedimentos en el río Pitillal, en unidades de peso parecen ser muy elevados. No obstante considerando el peso específico de los materiales, en unidades de volumen representan el 1.19% que es un porcentaje pequeño respecto del gasto líquido transportado por el cauce (Q) de $582.180 \text{ m}^3/\text{s}$. por lo que el resultado seleccionado son los valores obtenidos empleando la metodología de Einstein, es importante mencionar adicionalmente que es la única propuesta que nos permite la cuantificación de todos los tipos de sedimentos empleando un mismo fundamento teórico. No obstante todas las metodologías descritas por las ecuaciones 20 a 45 son cuantificadas de manera paralela por la herramienta y mostrados en la página resumen de cálculos (figura 7b). En este sentido se requieren trabajos futuros de implementación de la herramienta en proyectos ejecutivos que permitan su validación.

5. CONCLUSIONES

La programación realizada facilita el ingreso de datos en su ventana inicial, mostrando los resultados de cada metodología en las ventanas correspondientes integran el programa CSED-TRANSVEL. La inserción de pestañas para cuantificar cada tipo de transporte de sedimentos permite al usuario centrarse en el método de interés, convirtiéndolo en una herramienta amigable.

La herramienta desarrollada se convierte en una opción eficaz y eficiente para el desarrollo de estudios sedimentológicos, al reducir el trabajo extenso y laborioso que fundamentan algunos de los métodos, los cuales incluyen procesos iterativos en su solución. Permite la impresión de reportes para cada uno de los resultados obtenidos. Facilita las actividades diseño, operación y mantenimiento al contar con datos necesarios para la toma de decisiones. Como característica adicional permite visualizar los

gráficos que definen parámetros específicos de cada metodología, facilitando la determinación de sus valores y por ende la precisión en el resultado respectivo.

El programa CSED-TRANSVEL es un producto académico de uso libre desarrollado para la

obtención del grado del ingeniero civil del coautor del presente trabajo, por lo que se encuentra disponible a través de su correo electrónico de afiliación.

REFERENCIAS

- Bernabé, M., López-Vázquez, C. (2012). *Fundamentos de la Infraestructura de Datos Espaciales*. UPM Press, 1ª Ed. Madrid, España.
- Aguirre-Pe, J., Olivero, M. Moncada, A. (2000). *Transporte de sedimentos en cauces de alta pendiente*. Fundación para el Fomento de la Ingeniería del Agua (7) 4. Universidad de Córdoba, España. 353-365. DOI: <https://doi.org/10.4995/ia.2000.2851>
- Bagnold, R. (1966). *An approach to sediment transport problem from general physics*. United State Geological Survey. Professional paper 422-I, Washington, D. C. DOI: <https://doi.org/10.3133/pp4221>
- Brooks, N. (1958). Mechanics of streams with movable beds of fine sand. *Am. Soc. Civil Engineers Trans.*, Vol 38. 708-717.
- Brownlie, W. R. (1981). *Prediction of flow depth and sediment discharge in open-channels*. Report nº KH-R-43A. Pasadena: California Institute of Technology, W.M. Keck Laboratory, USA. DOI: <http://dx.doi.org/10.7907/Z9KP803R>
- DEHIDRO 07/02/2019. tierradehidro.com/software-dehidro/
- EIH 07/02/2019. Estudios de ingeniería hidráulica S. A. http://www.elhsa.com/software/modelo_de_sedimentacion.html
- HYDROVLAB 07/02/2019 Laboratorio Virtual de Hidrología. Programa SEDIMENT V 1.0. Universidad Técnica Particular de Loja. www.hydrovlab.utpl.edu.ec
- Einstein, H. (1950). *The bed-load function for sediment transportation in open channel flows*. Technical Bulletin 1026. U. S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Washington D. C.
- Engelund, F., Hansen, E. (1967). *A monograph on sediment transport in alluvial streams*. Teknisk Forlag, Copenhagen, Denmark.
- Frijlink, H. (1982). Discussion: Total Load Transport in Alluvial Channels by Ranga Raju, K. F., Garde, R. J., Bhardwaj, R. B. (Proc. Paper 10620), *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, No. HY3, 457 – 458.
- García, C., Sala, M. (1998). Aplicación de fórmulas de transporte de fondo a un río de gravas: comparación con las tasas reales de transporte obtenidas en el río Tordera. *Ingeniería del Agua*, vol. 5. DOI: <https://doi.org/10.4995/ia.1998.2744>
- Graf, W. Acaroglu, E. (1968). Sediment Transport in Conveyance Systems (Part 1) / A physical model for sediment transport in conveyance systems, *Hydrological Sciences Journal*. 13:2, 20-39. DOI: <https://doi.org/10.1080/02626666809493581>
- Lane, E., Kalinske, A. (1941). Engineering calculations of suspended sediment. *Transaction of American Geophysical Union*, 637 p. DOI: <https://doi.org/10.1029/TR022i003p00603>

- Luna, P., Casanova, C., González, C., De Caldas, J. (2013). Algoritmo de la metodología de Pacheco Ceballos para el cálculo de transporte de sedimentos en ríos Aluviales. *Tekhnê*. Vol. 10, Núm. 1, 38-48.
- Martín, J. (2002). *Ingeniería de Ríos*. Universidad Politécnica de Cataluña
- Maza, J., Cruickshank, C. (1973). *Stable channels in alluvion*. Proceedings International Symposium on River Mechanics, Bangkok, Tailandia, 715-722.
- Maza-Alvarez, J., García-Flores, M. (1993). *Transporte de Sedimentos*. Capítulo 10 del Manual de Ingeniería de ríos. Instituto de Ingeniería, UNAM, 549p.
- Meyer-Peter, E., Müller, R. (1948). *Formulas for bed-load transport*. Report on the 2nd Meeting International Association Hydraulic Structure Research, Stockholm, Sweden, 39-64.
- Pérez-Morales, G., Rodríguez Castro, J., Molina-Aguilar, J. (2010). *Ingeniería de ríos*. Editorial Universitaria, Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 292 p.
- Pernecker, L., Vollmer, H., (1965). *Neve Betrachtungsmöglichkeiten des Feststoff-transportes in offenen Gerinnen*. Die Wasser-Wirtschaft, 55, Jahrgang, Heft 12.
- Rubey, W. (1933). Settling velocities of gravel, sand and silt particles. *Am. J. Sci.* Vol. 25 325-338. DOI:10.2475/ajs.s5-25.148.325
- Salinas-Tapia, H., Mendoza-Silva, L. García Aragón, J. (2014). *Herramienta computacional para el cálculo de la tasa de transporte de sedimentos de fondo y en suspensión en ríos*. XXIII Congreso Nacional de Hidráulica. Puerto Vallarta, Jalisco, México.
- Van Rijn, L. (1993). *Principles of Sediment Transport in Rivers*. Estuaries and Coastal Seas. Netherlands, Aqua Publications.