

2024

# INGENIERÍA

HIDRÁULICA Y AMBIENTAL



03

XLV

Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, CUJAE  
Revista científica del Centro de Investigaciones Hidráulicas

ISSN 2788-6050, RNPS 2066

La revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental tiene el propósito de divulgar el conocimiento y contribuir al intercambio de experiencias y la comunicación entre los profesionales y técnicos de habla española. Los temas de interés para la revista incluyen contenidos en la solución de problemas, aplicaciones y desarrollo de la ingeniería hidráulica.

## **Editor-Director**

Dr. José Bienvenido Martínez Rodríguez

## **Consejo Editorial**

Dra. Maray Garrido Monagas (*Directora*)

Dra. Haydee Llanusa Ruiz (*Secretaria de la publicación*)

Dr. Yoermes González Haramboure

Dr. Rafael Pardo Gómez

Dr. Norberto Marrero De León

Dr. Alcides Juan Felipe León Méndez

Dr. Armando Hernández Valdés

## **Consejo Asesor**

Damir Brjanovic, *Instituto UNESCO-IHE, Holanda*

Daniel Prats Rico, *Universidad de Alicante, España*

Joaquín Moreno Caselles, *Universidad Miguel Enrique de Elche, España*

Nahún García Villanueva, *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México*

Raúl Lopardo, *Instituto Nacional del Agua, Argentina*

Alejandro López, *Laboratorio Nacional de Hidráulica, Santiago de Chile*

Jaime Iván Ordóñez, *Universidad Nacional de Colombia, Colombia*

Rafael Guarga Ferro, *Instituto de Mecánica de Fluidos e Ingeniería Ambiental, Uruguay*

Abrahán López, *Universidad Francisco de Miranda, Venezuela*

Miguel A. Perozo Ynestroza, *Universidad Francisco de Miranda, Venezuela*

Cristóbal Díaz Morejón, *Ministerio de Ciencia Tecnología y Mediaambiente (CITMA), Cuba*

Alina Hernández Tur, *Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), Cuba*

Rafael Feitó Olivera, *Unión Nacional de Arquitectos e Ingenieros de Cuba (UNAICC), Cuba*

Julián Herrera Puebla, *Instituto de Investigación de Riego, Cuba*

Lorenzo E. Camejo Barreiro, *Universidad de Ciego de Ávila, Cuba*

Alfonso Suárez Reytor, *Universidad de Oriente, Cuba*

Eric Cabrera Estupiñán, *Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Ecuador*

Luis Córdova López, *Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría" (CUJAE), Cuba*

Yoel Martínez González, *Instituto Superior de Ciencias y Tecnologías Aplicada, Cuba*

Ronnie Torres Hugues, *Centro de Servicios Técnicos de Ingeniería y Tecnología de la Construcción, Cuba*

Ifraín Osa Bernal, *HELVEX, Cuba*

Eduardo López Bastida, *Universidad de Cienfuegos, Cuba*

Javier Orccosupa, *Universidad Tecnológica del Perú, Perú*

Natividad Ramírez Ramírez, *Universidad de Guanajuato, México*

Carlos M. López Vázquez, *Instituto UNESCO-IHE, Holanda*

Julio Iván González Piedra, *Universidad de La Habana, Cuba*

Carlos Javier Fernández de Córdova Webster, *Universidad del Azuay, Ecuador*

Lamberto Alvarez Gil, *Universidad Central de Las Villas (UCLV), Cuba*

Felicita González, *Instituto de Investigación de Riego, Cuba*

Enrique Cisneros, *Instituto de Investigación de Riego, Cuba*

01	NURIA DE LOS ÁNGELES VAILLANT LÓPEZ GUILLERMO RIBEAUX KINDELÁN	IMPACTO SOCIO-ECONÓMICO Y MEDIOAMBIENTAL DEL TRATAMIENTO MAGNÉTICO AL AGUA EN CUBA DESDE EL ENFOQUE DE LA CIENCIA, TECNOLOGÍA Y SOCIEDAD.	3 14
02	ALCIDES J. LEÓN MÉNDEZ JOHAN CHIRINO MONTANO	EVALUACIÓN CON TÉCNICAS CFD DE UN FLUJÓMETRO DE CUÑA	15 28
03	ALAIN PANEQUE MARTÍNEZ OFELIA PÉREZ MONTERO CELENE MILANÉS BATISTA JOSÉ FERNANDO ÁLVAREZ VEGA	ESTIMACIÓN DE LA COBERTURA FORESTAL EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO "SAN JUAN", CUBA	29 40
04	JOSÉ ANTONIO DÍAZ DUQUE LINNEY MARTÍNEZ PÉREZ ORELVIS DELGADO LÓPEZ	IMPACTOS POTENCIALES DE LA PRODUCCIÓN DE GAS NO CONVENCIONAL SOBRE LA DISPONIBILIDAD Y LA CALIDAD DEL AGUA EN CUBA	41 51
05	EDELSY RAMOS GUILARTE MAILÉN VIRGEN GUTIERREZ HERRERA TANIA HERRERA ACHON	FORMACIÓN CONTINUA EN AGUA Y SANEAMIENTO EN LA HABANA: IMPACTO EN LA TRANSFORMACIÓN DEL AMBIENTE SOCIAL SOSTENIBLE	52 63
06	YUDEIMYS YMAS DÁVILA DARLÉN GOIBURO CORDERO RONNIE TORRES HUGUES BASILIO DEL VALLIN MARCHECO	SOLUCIONES PARA UN DESARROLLO SOSTENIBLE EN ACUICULTURA MEDIANTE EL TRATAMIENTO DEL AGUA	64 77
07	YASET MARTÍNEZ VALDÉS DAVID ERNESTO MARÓN DOMÍNGUEZ	LLENADO Y/O VACIADO DE DEPÓSITOS EN SISTEMAS FUENTES POR BOMBEO. PARTE II.	78 91

## Impacto socio-económico y medioambiental del tratamiento magnético al agua en Cuba desde el enfoque de la ciencia, tecnología y sociedad.

**Nuria de los Ángeles Vaillant López**

E-MAIL: [nuriavl@civil.cujae.edu.cu](mailto:nuriavl@civil.cujae.edu.cu)

Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), Universidad Tecnológica de La Habana

**GUILLERMO RIBEAUX KINDELÁN**

E-MAIL: [ribeaux@uo.edu.cu](mailto:ribeaux@uo.edu.cu)

Centro de Electromagnetismo Aplicado (CNEA), Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba

### RESUMEN

Es ineludible el impacto que puede aportar el uso del tratamiento magnético al agua (TMA) como tecnología innovadora, económica y amigable, importantes aristas del bienestar social y del incremento de la calidad de vida. El estudio de la tecnología del TMA desde un enfoque de Ciencia, Tecnología y Sociedad (CTS) contribuye a elevar la dimensión ética, política y social del trabajo científico imbricado en el proceso de desarrollo e innovación de esta técnica. Por lo que esta investigación argumenta desde un enfoque CTS el impacto socioeconómico del uso del TMA como tecnología ambientalmente amigable para el tratamiento de aguas en Cuba.

**PALABRAS CLAVES:** agua, ciencia, desarrollo sustentable, sociedad, tecnología, tratamiento magnético

Socio-economic and environmental impact of magnetic water treatment in Cuba from a Science and Technology approach and Society.

### ABSTRACT

The impact that the use of magnetic water treatment (TMA) can provide as an innovative, economical and friendly technology, important aspects of social well-being and increased quality of life, is unavoidable. The study of TMA technology from a Science, Technology and Society (STS) approach contributes to raising the ethical, political and social dimension of the scientific work embedded in the development and innovation process of this technique. Therefore, this research argues from a STS approach the socioeconomic impact of the use of TMA as an environmentally friendly technology for water treatment in Cuba.

**KEYWORDS:** water, science, sustainable development, society, technology, magnetic treatment.

## 01 INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, e incluso ya antes de nuestra era, se conocía la necesidad de tratar el agua para mejorar su calidad y evitar enfermedades y epidemias; el propio desarrollo industrial ha exigido cada vez más, una mejor calidad del agua en sus procesos. Pero la demanda global de agua sigue aumentando por el crecimiento poblacional, el desarrollo de las actividades socioeconómicas, el uso indiscriminado y mal manejo del agua, provocando que disminuya peligrosamente la calidad de las fuentes de abasto de agua potable.

Además, en algunos países, el acceso al agua cruda con una calidad aceptable es problemático, y se tienen que tratar aguas de no muy buena calidad con resultados discutibles. En naciones en vías de desarrollo como Cuba, las limitaciones económicas para la implantación de sistemas convencionales, (ni pensar en alta tecnología) de potabilización y de depuración, hacen que el volumen de efluentes tratados no sea suficiente, por lo que disponer de tecnologías eficaces y eficientes para el tratamiento del agua, es hoy un imperativo para la supervivencia futura de la sociedad (Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. CITMA, 2015).

A nivel internacional, existen investigaciones que demuestran la capacidad del TMA para inducir cambios en el pH, tensión superficial, solubilidad, turbidez, conductividad, capacidad calorífica, comportamiento del potencial Z, y la susceptibilidad magnética. (Siau, 2014; Bartušek et al., 2017; Chibowski y Szcześ, 2018; Ayat *et al.*, 2019). En Cuba, la ciencia relacionada con el tratamiento magnético, liderada por el Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado (CNEA), ha derivado hacia la vertiente de sistemas industriales (calderas, sistemas de enfriamiento, como separadores de partículas ferromagnéticas, en la industria azucarera, industria del petróleo y la prevención de incrustaciones calcáreas en redes y tuberías), y agropecuarios (agua para el riego agrícola, agua para alimentación animal) fundamentalmente. (Acea, 2004; Gilart, 2009; Arias y col., 2018).

Otras novedosas aplicaciones del TM al agua son estudiadas: efectos bactericidas y alguicida, absorción de metales pesados, eliminación de organismos patógenos y como ayudante en los procesos de coagulación. (Vaillant y Fernández, 2021), estudios que se muestran como un abanico de nuevas aplicaciones en nuestro país, que contribuyen al desarrollo de procesos inherentes al agua, como la coagulación, la vaporización, la solvatación, y la desinfección, entre otros.

Teniendo en cuenta que la mayoría de los tratamientos para la potabilización y el reúso, se realizan con productos químicos no degradables, caros y de difícil almacenamiento, se hace necesario el estudio y uso de tecnologías económicas, limpias, basadas en métodos físicos, y de fácil aplicación como el Tratamiento Magnético (TM). Aunque conocida mundialmente desde inicios del siglo XX, su utilización es novedosa porque se siguen encontrando nuevas prácticas y procedimientos para su uso, y ha recibido mucha atención de la comunidad científica por la implicación que tiene en lo económico y en el cuidado del medio ambiente.

El estudio de la tecnología del TMA desde un enfoque CTS contribuye a elevar la dimensión ética, política y social del trabajo científico imbricado en el proceso de desarrollo e innovación de la misma. Argumentar el impacto cultural, socioeconómico y ambiental, así como las contradicciones presentes en la aplicación del TMA, y su implicación e imbricación como paradigma tecnológico en el panorama científico cubano, favorecerán su evolución en la conversión de cultura tecnológica.

## 02 TRATAMIENTO MAGNÉTICO AL AGUA

La observación del efecto de los campos magnéticos en el TMA es conocida desde el siglo XIX, no obstante, la actualización de esta técnica se acredita al ingeniero belga, Theo I. S. Vermeiren (1958),

que tuvo la brillante idea de utilizar el fenómeno descubierto por Michael Faraday para el tratamiento del agua industrial. En 1957, también propuso la primera aplicación práctica para el control de incrustaciones.

El efecto fundamental observado con el TMA es la reducción de las incrustaciones de sales, e incluso, la disolución de los mismos, fundamentalmente carbonatos de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) y carbonato de magnesio ( $\text{MgCO}_3$ ) en las paredes de tuberías de abasto de agua y equipos. Además, en este proceso, el agua modifica algunas propiedades físico-químicas como, el pH, la solubilidad, la susceptibilidad magnética, la conductividad eléctrica, tensión superficial, la turbidez, punto de ebullición y la velocidad de cristalización, entre otras (Zhao et al., 2014; Wang et al., 2018).

Pero a pesar de sus aplicaciones comprobadas, en la literatura científica se debate como explicar satisfactoriamente los fenómenos observados: si la causa recae sobre posibles cambios en la estructura del agua en sí misma, cambios en el potencial Z, la influencia de las impurezas presentes o los estados electrónicos a nivel molecular, e incluso, si depende del material de la tubería por donde corre el fluido.

### 03 ENFOQUE CTS. CONCEPTUALIZACIÓN

Un enfoque de Ciencia Tecnología y Sociedad, debe partir de una perspectiva social heterogénea, es decir la participación de todos los actores de la sociedad, orientados hacia la determinación y el empleo de aquellos medios que propicien el desarrollo científico y tecnológico sustentable. De ahí la pertinencia de los estudios CTS, que en Cuba defienden principios éticos, ambientales, históricos, educativos y económicos en total armonía con la situación actual.

Reflexionando en torno a estas cuestiones, Armenteros considera la relación de la ciencia y la tecnología de conjunto con los procesos económicos, políticos, sociales y culturales: La importancia de la ciencia y la tecnología, (...) está fuera de discusión. La ciencia y la tecnología modernas se encuentran en la base de una serie de transformaciones que, a ritmo acelerado, se difunden por el mundo; su estrecha y creciente interrelación con los procesos económicos, políticos, sociales y culturales, fundamentan estrategias y políticas globales de desarrollo, la tecnología se ha convertido en uno de los factores de poder en las relaciones internacionales. (Colectivo de Autores, 2004, p. 140)

En el caso de Cuba, desde el triunfo de la revolución, la vanguardia política supo vislumbrar el papel de la ciencia y la tecnología en el desarrollo de la naciente sociedad cubana, desarrollando universidades, investigadores y centros de investigación. El debate en los últimos tiempos en torno al tema, nos dice que no ha sido suficiente, y corrobora la necesidad del conocimiento y concientización de su uso, desde un enfoque CTS, equitativo, con conocimiento no solo de su impacto positivo en lo económico, social, cognitivo, ambiental, sino también de las consecuencias y daños multifactoriales que esta pueda generar. Pero para lograrlo, es necesario comprender adecuadamente la interrelación entre ciencia-tecnología-sociedad-desarrollo.

¿Pero es ciencia por ciencia? ¿Es ciencia solo por conocimiento, por prosperidad económica, por la solución de problemas básicos e imprescindibles de la humanidad? La ciencia que debemos defender no puede desarrollarse al margen de los costos sociales y medioambientales, de ello depende la supervivencia de la raza humana. Hoy en día se hace más necesario la globalización de

una sociedad en la que el desarrollo científico tecnológico sirva a los fines reales del hombre, donde la tecnología sea centrada en el ser humano, más que a fines técnicos o económicos.

Díaz Canel (2021) en su tesis doctoral plantea: El conocimiento, la ciencia, la tecnología y la innovación constituyen insumos imprescindibles para avanzar en el proceso de desarrollo. Sobre todo, si se trata de un modelo de desarrollo como el que se formula en la Visión de la Nación, el Plan nacional de desarrollo económico y social hasta el 2030 y la Conceptualización del modelo económico y social cubano de desarrollo socialista que la define como soberana, independiente, socialista, democrática, próspera y sostenible. No puede haber verdadera soberanía, sostenibilidad y prosperidad sin capacidades de conocimiento, ciencia, tecnología e innovación. (p. 1)

Entonces, está claro que el conocimiento, la ciencia y la tecnología están articulados a la estrategia económica, social y cultural del país, generando beneficios en el sistema de salud, en la alimentación y en otros sectores vinculados a las necesidades humanas básicas de la población. Sin embargo, aunque avanza la interacción entre las universidades y centros de investigación con las de producción y servicios, no está generalizada como se espera, limitando la innovación tecnológica y la generalización de los principales descubrimientos.

Pero esta no es la única dificultad, la economía cubana, no rebasa aún su precaria situación, la obsolescencia del equipamiento científico, lo difícil de mantener estabilidad y cuantía del financiamiento a las actividades de *I+D*, las reglas que establecen la globalización neoliberal, y el bloqueo económico, son factores que atentan contra la política tecnológica y científica cubana.

Según Núñez Jover (2000): El problema de la relación entre innovación y desarrollo social es uno de los más relevantes que podemos imaginar para el campo CTS, sobre todo si se le enfoca desde la perspectiva de los países subdesarrollados. Es un tema que enlaza cuestiones técnicas con valoraciones política y éticas fundamentales". (p.242)

Teniendo en cuenta los preceptos anteriores, no es posible hablar de Innovación si esta no trae consigo: integración de conocimientos, participación social, nuevos o mejorados productos, satisfacción de necesidades sociales o demandas del mercado, y comercialización.

Entonces, asumiendo las ideas de Díaz Canel: La innovación desde el enfoque SNI (Sistema Nacional de Innovación), se entiende como un proceso social, multiactoral, interactivo que involucra organizaciones y actores que interactúan vigorosamente entre sí, apoyándose en políticas, normas, reglamentos, hábitos, lo que en economía de la innovación se llaman "instituciones". Todos esos elementos (...), deben funcionar como un sistema que favorece la producción, difusión y uso del conocimiento". (Díaz Canel, 2021, p.18)

No obstante, todo lo anterior, unido al estímulo económico, no es suficiente para el desarrollo de una nueva tecnología. Esta, además de romper paradigmas y demostrar su valía frente a otras tecnologías, necesita estar técnicamente madura para su uso en la práctica social y producir un cambio tecnológico que debe estar articulado con estrategias políticas, sociales, productivas y ambientales. La necesidad de establecer modelos de desarrollo que tengan como base la sustentabilidad ambiental es de vital importancia en las circunstancias actuales.

El tema medioambiental debe convertirse en un objetivo esencial tanto para el gobierno como para todos los agentes económicos que inciden en la sociedad. No es posible concebir crecimiento económico sin Desarrollo Sustentable, tema que predomina actualmente en el debate a todos los niveles. Desarrollo humano y protección de la naturaleza no se contradicen con el crecimiento económico, sino que lo orientan por el sendero de la sustentabilidad, que no es más que satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones. Entonces, la categoría de “Desarrollo Sustentable o Sostenible” abarca no solo lo económico, sino también lo social, lo cultural, institucional y el medio ambiente.

Según Arana y Valdés, el término de desarrollo sostenible constituye hoy un nuevo paradigma y a la vez una utopía del desarrollo humano... (...). Para los países en vías de desarrollo, el desarrollo sostenible se convierte en un enorme reto, pues por un lado está la carencia de recursos económicos, financieros y humanos capacitados, y por otro, la falta de políticas y estrategias integradas hacia este objetivo, lo que tiene su causa en el sistema socioeconómico capitalista imperante, basado en relaciones de propiedad privada que conducen al individualismo y la diferenciación económica y social; la deuda externa; la explotación irracional de los recursos; etc. (Colectivo de autores, 2004).

El Desarrollo Sostenible, aunque tiene dos componentes básicos: protección ambiental y satisfacción de las necesidades básicas de generaciones presentes y futuras, posee variables claves, articulados en componentes económicos, sociales y ecológicos cuya incidencia pueden ir desde lo local hasta nivel de país: la sostenibilidad, la equidad, la sustentabilidad ambiental y la sustentabilidad cultural.

La Agenda 2030 y los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible aprobada en septiembre de 2015 por la Asamblea General de las Naciones Unidas, establece una visión transformadora hacia la sostenibilidad económica, social y ambiental de los 193 estados miembros que la suscribieron. Para Cuba, la adopción de la agenda 2030 constituyó una prioridad nacional y concreta los 17 objetivos de Desarrollo Sostenible con los ejes estratégicos del Plan Nacional de Desarrollo Económico y Social hasta el 2030 (PNDES 2030), aprobando el Decreto Presidencial 261/2021 para la implementación de los mismos.

En la Visión de Cuba para 2030 expuesta en el PNDES 2030, se subrayan los valores del desarrollo sostenible y la prosperidad. Prosperidad, en términos del socialismo cubano, tiene que significar crecimiento y desarrollo económico y, a la vez, desarrollo social, caracterizado por la equidad y la inclusión social (Díaz Canel, 2021, p.13).

El escenario actual cubano ofrece grandes potencialidades para el desarrollo de documentos rectores que contribuyan con los objetivos de Desarrollo Sostenible. La aprobación de la nueva Constitución de la República, el proceso de perfeccionamiento e implementación del Macroprograma de Recursos Naturales y Medio Ambiente que responde a las Bases del PNDES 2030, la generalización del nuevo modelo de los órganos locales del poder popular, la aprobación del Plan de Estado para el enfrentamiento al cambio climático (Tarea Vida), el perfeccionamiento del CITMA, la aprobación de la Política para el perfeccionamiento del Sistema Ambiental y de otras relativas al sistema de ciencia, tecnología e innovación, la verticalización de la actividad reguladora ambiental; así como la

aprobación de diferentes normas legales. En este dinámico y complejo contexto nacional, el Estado ha continuado con el reconocimiento, de forma permanente, a la importancia de la sostenibilidad ambiental (CITMA, 2015).

No obstante, en el panorama nacional, a pesar de algunos resultados alcanzados con los organismos regulatorios responsables, persisten dificultades en aras de alcanzar las metas del desarrollo sostenible, elevar cualitativamente la complementación y articulación con otras estrategias, planes y programas, así como potenciar la gestión local en la preservación del medio ambiente. De manera adicional, la incorporación, tendencia al incremento y desarrollo de las nuevas formas de gestión económica, exigen la adopción de medidas adicionales de prevención y control, que pueden comprometer el estado de calidad ambiental de diversos ecosistemas, la salud humana y la comunidad.

El desarrollo e implementación de la tecnología del TMA forma parte de dos de los Ejes Estratégicos del PNDES 2030 adoptados: 4) Ciencia, tecnología e innovación, y 5) Recursos naturales y medio ambiente. Se corresponde con las direcciones estratégicas de la Estrategia Ambiental Nacional y varias de sus acciones prioritarias. Se imbrica también en el Proyecto de Macroprograma: Protección y uso sostenible de los recursos naturales, conservación de los ecosistemas y cuidado del medio ambiente, y contribuye con la Política Nacional del Agua y el Programa Hidráulico Nacional.

## ENFOQUE CIENCIA TECNOLOGÍA Y SOCIEDAD EN EL TRATAMIENTO MAGNÉTICO AL AGUA

Antes de 1959, las aplicaciones del TMA ya se comenzaban a introducir en Cuba por empresas azucareras extranjeras en el proceso de producción de azúcar, momento en que varios dispositivos magnetizadores fueron instalados en algunos centrales, pero a este trabajo no se le dio seguimiento y fueron desactivados, evidencia de transferencia tecnológica sin tener en cuenta el contexto socioeconómico. (...) "hasta para poder comprar tecnología hay que entender de lo que se trata, lo cual es poco factible sin capacidad de investigación autónoma" (Arocena,1993, p.103).

No es hasta 1988 que investigadores del sector se dan a la tarea de retomar esta tecnología, surgiendo así en 1992 como consecuencia de un proyecto de investigación de la Universidad de Oriente, el Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado (CNEA), entidad de Ciencia, Tecnología e Innovación adscripta a la Universidad de Oriente, que se dio a la tarea de liderar, encauzar y desarrollar las investigaciones en este campo, extendiendo su aplicación por todo el país, en diferentes sectores, salud, agricultura, industria, entre otros.

En las últimas dos décadas, con la creación del CNEA, la ciencia en el tratamiento magnético ha promovido importantes avances científicos en el tema del TMA en Cuba, consistentes con nuevas interpretaciones del comportamiento del CM en diferentes esferas económicas y sociales: salud, industria, agricultura. Todas estas investigaciones sustentan el uso de esta tecnología, llegando a establecer formulaciones que facilitan su diseño y aplicación.

Pero esta tarea desde sus inicios trajo grandes contradicciones entre los investigadores, pues muchos no estaban convencidos, o no aceptaban su aplicación como método para evitar y eliminar

las incrustaciones, pues estaban adaptados al método convencional de limpieza química de los sistemas y, de hecho, a las habituales paradas de la industria para esta operación. La tecnología del TMA se inicia entonces como un paradigma tecnológico.

Para el caso específico del TMA, siguiendo los preceptos de Sáenz, los resultados de las investigaciones realizadas permiten convertir la “tecnología tradicional” de eliminación de incrustaciones por medios químicos, en “tecnología de avanzada”, con la aplicación del TMA, y mínimo costo económico (ahorro de energía, de reposición de equipos, de uso de químicos para la limpieza y eliminación de paradas de la producción) a partir de la aplicación de conocimientos científicos novedosos (Colectivo de Autores, 2004).

El TMA responde al concepto de tecnología. La interacción ciencia-tecnología en el tratamiento magnético es cada vez más dinámica y coherente, porque las urgencias técnicas, producto también de las necesidades sociales, han influido en el desarrollo del conocimiento científico, y en reversa, las nuevas teorías científicas derivadas de su estudio, y los programas, proyectos y el centro de investigación creado a tal efecto, concretan formas de acción que envuelven en sí misma a la tecnología del TMA.

En los últimos años de ingeniería revolucionaria, en Cuba se han creado las tres fuentes que sustentan la tecnología para la aplicación del TMA: el conocimiento científico (estudio de la teoría del TMA y sus mecanismos de interacción por científicos de reconocimiento nacional, e internacional) entre los que se pueden citar a (Ribeaux y col., 2008; Gilart 2009; Campo et al., 2015); el quehacer tecnológico (en la continua búsqueda de conocimientos y experiencias en el tema, respaldada por la elaboración de numerosos proyectos, liderados por el CNEA, que garantizan la reducción de costos en términos de ahorro de energía y uso de químicos fundamentalmente); y la práctica concreta (reflejado en la construcción de acondicionadores magnéticos y su introducción en la industria).

El proceso de generación y desarrollo de la tecnología del tratamiento magnético en Cuba, tiene como punto de partida las necesidades sociales y económicas de ahorro de energía, de materia prima y, cuidado del medio ambiente fundamentalmente. Tales necesidades motivaron las investigaciones recientes y actuales, por lo que es posible afirmar que toda innovación tecnológica que resulte del estudio e implantación del TMA puede considerarse “halada por demanda” “demand pulled” (Colectivo de Autores, 2004).

Según Arana y colaboradores: “La actividad científica y técnica no puede ser atributo de una persona o grupo de personas aisladas, sino debe corresponder a las instituciones y comunidades científico-técnicas capaces de ponerlas al servicio de la humanidad y de promover la interacción y el diálogo con los diferentes agentes del proceso innovador” (Colectivo de Autores, 2004).

En términos de paradigma, se trata de transformar con la introducción de la tecnología del TMA, la práctica del uso de técnicas de eliminación de incrustaciones, ahorro de materia prima y portadores energéticos, en las que la tradición sería eclipsada por un nuevo concepto con superiores factores de seguridad, satisfaciendo el deseo primario de todo ingeniero: “hacer más, con menos”.

Se trata de convertir el TMA en cultura tecnológica, desde los cimientos de su aplicación. De extender la sustentabilidad (como premisa para alcanzar el desarrollo sostenible) del TMA desde el aspecto económico hacia el aspecto tecnológico, es decir, conseguir, o más bien, potenciar y afianzar la apropiación de una tecnología constructiva de probados resultados económicos y resiliente con el medio ambiente. Además, la racionalidad en el ahorro de materiales que caracteriza al TMA está acorde con las políticas de desarrollo sostenible que distinguen a nuestro país.

Entonces, es posible afirmar que existen hoy dos condiciones favorables para lograr convertir el TMA en cultura tecnológica: 1) capacidad científico-tecnológica propia y 2) potencial científico-técnico. La tercera condición necesaria: el sistema socio-económico que combine estrategias y políticas de desarrollo, se perfecciona a nivel de país con la actualización del modelo económico vigente. La “tecnología apropiada” se ajusta a los enfoques dados al respecto por Schumacher, Saézn y García, y Brander [citados por Arana y Valdés], porque responde a la necesidad de desarrollo tecnológico del país (Colectivo de Autores, 2004).

Sin lugar a dudas, el TMA adquiere la dimensión de tecnología, pues a la experiencia práctica, se agrega el acervo de conocimientos adquiridos en sustanciosas investigaciones nacionales e internacionales de la última década del siglo XX, y primera del siglo XXI.

## IMPACTOS Y CONTRADICCIONES EN LA APLICACIÓN DEL TRATAMIENTO MAGNÉTICO AL AGUA

La aplicación del TMA se ha limitado en Cuba por criterios discutibles que, en el contexto socio-económico actual, requieren un nuevo enfoque:

### Políticas

- Lentitud para la innovación tecnológica y para la introducción y generalización de los avances científicos técnicos, sin explorar otras vías (no romper paradigmas).
- Desactualización, baja efectividad y poco acatamiento del marco legal vigente.
- Limitada introducción de los resultados de la ciencia, la tecnología e innovación, así como de la dimensión ambiental a nivel de país en las políticas, planes, programas de desarrollo y el ordenamiento territorial.

### Económicas

- La no existencia de financiamiento para la compra de tierras raras (materia prima) para la producción de acondicionadores magnéticos de alta calidad.
- Obsolescencia en la infraestructura y tecnologías de diferentes procesos productivos e indisciplina tecnológica de las plantas de tratamiento de agua existentes, incumplimiento de los ciclos de reparación y mantenimiento.
- Limitados recursos materiales y financieros para la ejecución de acciones encaminadas a las inversiones, reparación y mantenimiento de las redes hidráulicas y equipos posibles beneficiarios del TMA.

### Culturales

- La existencia del CNEA fuera de la capital (Santiago de Cuba) lo que contribuye a cierta marginación, aún a pesar de sus resultados científicos probados.
- La falta de cultura, compromiso y conciencia ambiental en todos los niveles de la sociedad, sumado a la necesidad de un cambio de paradigma cultural en relación a la conservación y protección del medio ambiente.
- Ausencia de estrategias de comunicación adecuadas y débiles resultados en el cambio de conductas y percepción ambiental. Se aprecia un distanciamiento entre las campañas de bien público de corte ambiental y la realidad social.
- La preferencia por recibir cursos, capacitaciones, servicios y productos internacionales demeritando tecnologías nacionales de alto impacto.
- A pesar de las indicaciones y esfuerzos del presidente Díaz Canel, aún no existe un acercamiento pleno entre universidades, instituciones de investigación y centros productivos limitando el impacto de los resultados obtenidos con el estudio del TMA.

### **Ambientales**

- Insuficiencias y deterioro de las de las redes de monitoreo ambiental que ayudarían a revelar en toda su magnitud el impacto ambiental de algunas tecnologías y la importancia de la aplicación del TMA como “tecnología apropiada”.
- El desconocimiento o poco control del incremento de los niveles de sales solubles en las aguas de los acuíferos cársicos costeros por intrusión salina, debido, tanto a causas naturales como a inadecuados regímenes de explotación, que comprometen la vida útil de las redes hidráulicas y cuyo conocimiento aumentarían la necesidad del uso del TMA.

El uso del TMA constituye una innovación tecnológica de práctica concreta, eficiente, eficaz y de fácil y sencilla aplicación. El impacto de los resultados de su aplicación es notable para el tratamiento del agua:

### **Impacto económico**

- Permite optimizar los procesos productivos en donde se aplica, a través de la aplicación de la capacidad científica tecnológica.
- Aumenta la eficiencia económica al eliminar los aspectos negativos que presentan los sistemas con incrustaciones.
- De rápida amortización, sin consumo adicional de energía y factible de reproducir, introducir y de generalizar en la industria.
- Aumento de la eficiencia técnico-energética por disminución del consumo de combustible.
- Ahorro de materias primas en los procesos de potabilización.

### **Impacto ambiental**

- Es tecnología limpia, disminuye la contaminación del medio ambiente. Es una solución ecológica y sustentable.
- No induce ni promueve la aparición de enfermedades en los organismos vivos, en particular al hombre.

### Impacto socio-cultural

- Ayuda en la incorporación de la dimensión ambiental en las políticas, planes y programas de desarrollo de las entidades.
- Es fuente de nuevas investigaciones (tesis, proyectos, etc.) que contribuyen con el trabajo en grupo, la búsqueda de información y el desarrollo del pensamiento abstracto, flexible e innovador.
- Incrementa la cultura y disciplina tecnológicas del hombre.
- Sensibiliza al hombre con la introducción y generalización de los avances científicos-técnicos, el cuidado del medio ambiente y de ahorro de materia prima y de portadores energéticos.
- La disminución del vertimiento de productos químicos al medio ambiente, redundando en la Sociedad y en particular en la salud de los seres vivos (hombres, animales y plantas).

## 04 CONCLUSIONES

La tecnología del TMA es eficaz en la eliminación de las indeseadas incrustaciones en la industria. Aumenta la eficiencia económica y técnico-energética disminuyendo los sobreconsumos de combustibles y de productos químicos. Es una solución ecológica y sustentable. Aunque económicamente la inversión para su uso es alta, se recupera en corto plazo por encima de otras con uso de recursos químicos dañinos al medioambiente.

El TMA responde al concepto de tecnología. La interacción ciencia-tecnología en el tratamiento magnético es cada vez más dinámica y coherente, porque las urgencias técnicas, producto también de las necesidades sociales, han influido en el desarrollo del conocimiento científico, y en reversa, las nuevas teorías científicas derivadas de su estudio, y los programas, proyectos y el centro de investigación creado a tal efecto, concretan formas de acción que envuelven en sí misma a la tecnología del TMA.

La tecnología del TMA constituye un paradigma al convertir la tecnología tradicional de eliminación de incrustaciones por medios químicos, en tecnología de avanzada, con ahorro energético y cuidado del medio ambiente.

A pesar de criterios discutibles en los ámbitos económicos, político, cultural y medioambiental, Existen hoy condiciones favorables para lograr convertir el TMA en cultura tecnológica, y es factible la generalización del TMA en la industria cubana por el impacto multisectorial que de su aplicación se consigue.

El estudio de la tecnología del TMA desde un enfoque CTS contribuye a elevar la dimensión ética, política y social del trabajo científico imbricado en el proceso de desarrollo e innovación de esta tecnología.

### RECOMENDACIONES

Trabajar por introducir la tecnología del TMA hasta el nivel del ciudadano común.

Perfeccionar la legislación ambiental e incrementar los niveles de exigencia para su cumplimiento real y sistemático.

Elevar la educación, buenas prácticas, comunicación e información orientada a desarrollar la cultura ambiental en la ciudadanía, que garantice mayor participación en la gestión y protección del medio ambiente.

Lograr mayor imbricación del CNEA en la localidad, con acciones de formación ambiental, ahorro energético y de recursos, y aporte de resultados científicos para solucionar los problemas de la comunidad.

## 05 REFERENCIAS

- Acea Carlos** (2005) "Efecto del tratamiento magnético sobre la temperatura de ebullición", Ingeniería Energética, Volumen 26, N°1. ISSN 1815-5901. <https://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/article/view/139>. Cuba
- Arias R., Silveira, Y., Campos, M., Falcón, J.** (2018) "Efecto de un campo magnético estático en la tensión superficial del diésel y su atomización", Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica, Volumen 22, N° 1, 25-34 pp. ISSN 1137-2729. España
- Arocena R.** (1993): Ciencia, tecnología y sociedad: cambio tecnológico y desarrollo, Centro Editor de América Latina, Buenos Aires. ISBN: 9502521021, 9789502521022
- Ayat H.; Seroor, K.; Mohammed, I.** (2019): "Effect of magnetic treatment of water on the reduction of heavy metal concentration", International journal of recent scientific research, Volume 10. doi:10.24327/ijrsr. ISSN: 0976-3031. India
- Bartušek K., Marcoñ, P., Fiala, P., Máca J. and Dohnal, P.** (2017) "The Effect of a Spiral Gradient Magnetic Field on the Ionic Conductivity of Water". Water, 9 (9), 664. <https://doi.org/10.3390/w9090664>. EISSN 2073-4441. Published by MDPI. Switzerland
- Campo-Sofia M., Moro-Martínez A.; León-Cañet M., Silveira-Font Y., Falcón-Hernández J.** (2015). "Tratamiento magnético sobre parámetros físico-químicos de muestras de petróleo", in Tecnología Química., vol.35, n.3, pp.271-281. ISSN 2224-6185.2015, Facultad de Ingeniería Química. Universidad de Oriente: Santiago de Cuba. Cuba. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=445543785001>
- Chibowski E., Szcześ A.** (2018) "Magnetic water treatment—A review of the latest approaches", ScienceDirect, Chemosphere, Volumen 203, 54-67 pp. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653518305836>. ISSN: 0045-6535. England
- Colectivo de Autores** (2004). "Tecnología Y Sociedad". Plaza de la Revolución. Cuba. Editorial Poligráfica Félix Varela ISBN: 978-959-258-641-1.
- Díaz-Canel Bermúdez M.** (2021) "Sistema de gestión del gobierno basado en ciencia e innovación para el desarrollo sostenible en Cuba". Tesis en opción al título de Doctor en Ciencias. Universidad Central de Las Villas. Santa Clara. Edición: Editorial Universitaria. La Habana. ISBN 978-959-16-4713-9.
- Gilart González F.** (2009) "Avances en la búsqueda de los mecanismos de acción de los campos magnéticos sobre los sistemas biológicos", Conferencia Magistral. III Conferencia Internacional de Electromagnetismo Aplicado CNEA 2009, Santiago de Cuba, 18 -21 pp.
- Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente. CITMA.** (2015). Estrategia Ambiental Nacional 2016 / 2020.
- Núñez Jover J.** (2000). "La Ciencia y la Tecnología como procesos sociales. Lo que la educación científica no debería olvidar". Editorial Félix Varela. La Habana, Cuba. ISBN: 978-959-07-0468-0.

- Ribeaux G. y Gilart F.** (2011). "Influencia de un campo magnético estático sobre la cristalización de la sacarosa en solución" [Tesis doctoral, CNEA, Universidad de Oriente] Santiago de Cuba, Cuba, pp79-88.
- Ribeaux G., Ares O. Fernández A. y Falcón F.** (2008) "Influencia del Campo Magnético Estático en la nucleación y cristalización de la sacarosa", *Biol. Soc. Quím. Méx.*, 2(2), 60-62, ISSN 1870-1809.
- Siau Shi H.** (2014) "Effect of magnetic field on scale removal in drinking water pipeline" Thesis submitted in fulfillment of the requirements for the award of the degree of Master of Engineering (Environmental). Faculty of Civil Engineering, University Technology Malaysia.
- Vaillant López N. y Fernández Revilla L. E.** (2021) "Tratamiento magnético en la potabilización y el tratamiento de aguas residuales". 2do Congreso Iberoamericano de Magnetobiología. México.
- Vermeiren T.** (1958). "Magnetic treatment of liquids for scale and corrosion prevention." *Anti-Corrosion Methods and Materials*. ISSN: 0003-5599. United Kingdom
- Wang Y., Wei H, and Li Z.** (2018). "Effect of magnetic field on the physical properties of water". *Results in Physics*, Vol. 8. pp. 262-267. ISSN 2211-3797 <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2017.12.022>: [www.journals.elsevier.com/results-in-physics](http://www.journals.elsevier.com/results-in-physics)
- Zhao J-D. Liu Z. A. and Zhao E. J.** (2014). "Combined effect of constant high voltage electrostatic field and variable frequency pulsed electromagnetic field on the morphology of calcium carbonate scale in circulating cooling water systems". *Water Science & Technology*. 70(6):1074-1082. IWA Publishing. ISSN 0273-1223. <https://doi.org/10.2166/wst.2014.337>. United Kingdom

#### RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración del Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado (CNEA) y los laboratorios de calidad del agua de Aguas de La Habana, sin los cuales hubiera sido casi imposible la obtención de los resultados referidos en el artículo.

#### CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

#### CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

**Nuria Vaillant López** <https://orcid.org/0000-0001-7362-084X>

Participó en la búsqueda y organización de la información,  
la redacción y revisión del trabajo.

**Guillermo Ribeaux Kindelán** <https://orcid.org/0000-0002-3296-3536>

Participa en la orientación del enfoque de la investigación y la revisión del documento final.

## Evaluación con técnicas CFD de un Flujómetro de Cuña

**Alcides J. León Méndez**

E-MAIL: aleonm@civil.cujae.edu.cu

Centro de Investigaciones Hidráulicas, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de La Habana, CUJAE

**Johan Chirino Montano**

E-MAIL: johan@ecmmariel.cu

Dirección Técnica de Ingeniería, Empresa de Construcción y Montaje (ECM), Zona Especial de Desarrollo Mariel, Artemisa, Cuba

### RESUMEN

El trabajo enfoca la modelación con técnicas de la Mecánica de los Fluidos Computacional del flujómetro de cuña normado por la ISO 5167-6 del 2022. Los buenos resultados obtenidos en la calibración, con valores por debajo del 2,7% para la relación entre la diferencia de presión y el caudal y de menos del 1,9% para las pérdidas de carga permanentes en el conducto, permiten tener un modelo patrón, en cuanto a geometría, mallado y configuración de las condiciones de borde del modelo que permitirán acometer nuevas alternativas de diseño de este y de otros flujómetros para conductos forzados, con principios semejantes al del elemento evaluado. La modelación de las nuevas alternativas en el diseño del flujómetro ha permitido resolver el gran problema del flujómetro original, que son las altas pérdidas de carga permanentes que se producen en la conducción. Los nuevos diseños de cuñas asimétricas han permitido reducir las pérdidas en más de un 80% respecto a la cuña original.

**PALABRAS CLAVES:**

CFD, flujómetros, flujómetro de cuña, mecánica de los fluidos.

## Evaluation with CFD techniques of a Wedge Flowmeter

### ABSTRACT

The work focusses the modelling with Computational Fluid Mechanics techniques of the wedge flowmeter standardized by ISO 5167-6 of 2022. The good results obtained in the calibration, with values below 2,7% for the relationship between the pressure difference and the flow rate and less than 1,9% for the permanent pressure losses in the duct, allow for a standard model, in terms of geometry, meshing and configuration of the model's boundary conditions that will allow new design alternatives to be undertaken for this and other flowmeters for forced ducts, with principles similar to those of the evaluated element. The modelling of the new alternatives in the design of the flowmeter has made it possible to solve the major problem of the original flowmeter, which is the high permanent pressure losses that occur in the duct. The new asymmetric wedge designs have made it possible to reduce losses by more than 80% compared to the original wedge.

**KEYWORDS:** CFD, flowmeters, wedge flowmeter, Fluids Mechanics

## 01 INTRODUCCIÓN

La correcta medición de caudales tanto en conductos a presión como en conducciones libres, tiene un alto impacto económico y medioambiental. La diversidad de soluciones existentes permite una adecuada selección de la alternativa a emplear, siempre que se disponga de toda la información necesaria. En algunos casos la información proveniente del productor del flujómetro no es suficiente para realizar una adecuada comparación entre posibles opciones y en esos casos hay que recurrir a un estudio detallado a nivel de laboratorio, o empleando la modelación hidrodinámica.

En los últimos años la fortaleza de los programas para computadoras basados en la Dinámica de los Fluidos Computacional (DFC), conocida por sus siglas en inglés como CFD (Computational Fluids Dynamics), permite realizar estudios detallados del comportamiento de los flujómetros aportando mucha información valiosa acerca de su comportamiento.

Para el desarrollo de este trabajo se ha elegido estudiar el flujómetro de cuña por ser el flujómetro del tipo deprimógeno (caudal como función del diferencial de presión) más reciente normado por la Organización Internacional de Patrones (International Organization of Standardization, ISO).

La cuña además de ser un flujómetro muy robusto, es de fácil construcción y operación, tiene como desventaja los muy altos valores de pérdida de carga permanentes que introduce en la conducción, solo comparables a los de la Placa Orificio (Orifice Meter).

Los resultados obtenidos en la calibración del modelo DFC empleado para el estudio, arrojaron resultados altamente satisfactorios, lográndose valores de la diferencia de presión que provocan diferentes caudales con diferencias de menos del 2,7% respecto a lo normado por la ISO correspondiente y menos del 1,9% para las pérdidas permanentes que se introducen en la conducción respecto a las pérdidas normadas en la ISO. Esto permitió realizar un análisis del diseño de la cuña lográndose, a nivel de modelo DFC, obtener valores de pérdidas permanentes muy bajos en comparación con el modelo original.

Por otra parte, las características de geometría, mallado y configuración de las condiciones de borde del modelo permiten emplear esta configuración en futuros trabajos conducentes al estudio de flujómetros semejantes y obtener de los mismos resultados con alta credibilidad y un alto valor práctico.

## 02 DESARROLLO

### ESTRUCTURA DEL MODELO

El flujómetro de cuña, al igual que todos los deprimógenos, permite medir el caudal midiendo la diferencia de presión que este genera al pasar por la restricción que crea el elemento en la sección de la tubería (Figura 1). La norma ISO 5167-6 del año 2022 (ISO,2022), norma en su segunda edición las características hidráulicas y constructivas de este flujómetro.

Para enfrentar el modelo DFC del flujómetro de cuña se empleó el programa ANSYS. Este programa es el software líder de simulación para análisis y simulación por elementos finitos de problemas relacionados a la Mecánica de los Fluidos.

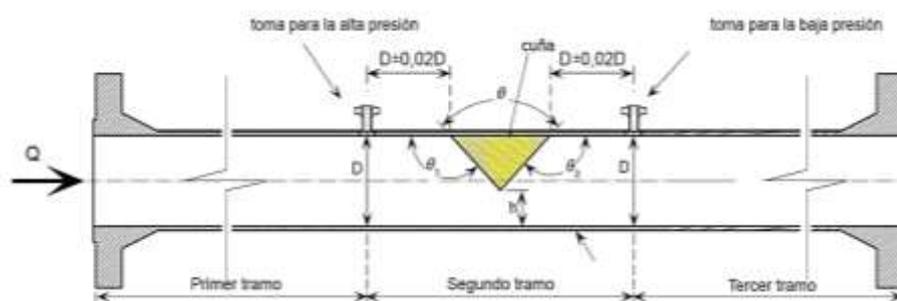


Figura 1. Perfil de la tubería con el flujómetro.

ANSYS está dividido en tres herramientas principales llamados módulos: preprocesador (creación de geometría y mallado), procesador y posprocesador. Tanto el preprocesador como el posprocesador están provistos de una interfaz gráfica.

De gran importancia en la modelación con ANSYS, o con cualquier plataforma que modele DFC, es el dimensionamiento del modelo y su mallado. La geometría del objeto que se desee analizar y su mallado en particular, puede generar errores en la solución debido a que si no se mantienen ciertos parámetros como son, en este caso de estudio, las longitudes de los tramos del modelo respecto a su diámetro, la densidad global de la malla y su refinamiento en zonas de interés particular, la forma de suministrar el caudal a modelar y otros más específicos, los resultados obtenidos se alejan mucho de los datos empleados como referencia para la calibración e incluso puede fallar a tal punto que afecte la convergencia del modelo.

ANSYS provee al usuario de parámetros para analizar la calidad del mallado de forma general, lo cual es muy importante en la fase de construcción del mismo y además mucha flexibilidad para la construcción geométrica del modelo y alternativas múltiples para crear las condiciones de borde e iniciales, pero solo la calibración de cada modelo en particular a partir de una base de datos confiable y segura arrojará los resultados finales en cuanto a las posibilidades del modelo calibrado de reproducir fielmente el proceso que se modela.

## GEOMETRÍA

A partir de los estudios realizados anteriormente por los autores [2, 3] y de nuevos ensayos de prueba y error se logró obtener un diseño geométrico y un mallado, tanto global como refinado que, junto a la configuración de las condiciones de borde del modelo, que lograron disminuir los errores de calibración respecto a los obtenidos anteriormente.

Para el modelo se empleó una geometría de tubería circular de 300 milímetros de diámetro interno ( $D$ ), de interior rugoso con una altura media de rugosidad de 0,15 mm, correspondiente a una tubería de hierro fundido nuevo con bridas o hierro galvanizado e incluso a tubos de fundición de buena calidad. La relación altura-diámetro ( $h/D$ ) empleadas fueron la máxima y la mínima normada por la ISO y una media ( $h/D= 0,6; 0,4; 0,2$ ) que representan coeficientes de contracción ( $\beta$ ) con valores de 0,7916; 0,6113 y 0,3775 respectivamente. Estas tres contracciones cubren el intervalo de posibilidades de la cuña y su calibración garantiza que los resultados sean confiables.

La longitud total del modelo se subdividió en tres partes (Figura 1): un tramo de entrada, un tramo que contiene el flujómetro y un tramo para la descarga del caudal. La longitud del primer tramo fue de 10,00 metros ( $\geq 30 \cdot$  diámetro interno del ducto) y la misma tiene una dependencia directa con la estrategia que se emplee para suministrar el caudal al modelo. ANSYS permite configurar este dato de entrada de muy diversas formas. En este trabajo se optó por un patrón de distribución de la

velocidad (León et al. 2023), que se obtuvo de pruebas adicionales, tal como se detallará en la subsección dedicada a la configuración de las condiciones de contorno e iniciales.

La longitud del segundo tramo se realiza acorde a lo normado para la geometría de este flujómetro por la norma ISO correspondiente (Chirino,2023) y abarca desde la toma de presión aguas arriba de la cuña hasta la toma de presión aguas debajo de ella. La longitud del tercer tramo se determinó en 12,00 metros ( $\geq 40 \cdot \text{diámetro interno del ducto}$ ) a partir de la experiencia anterior acumulada y del resultado de los análisis de la estabilidad del patrón de velocidades hasta la descarga libre aguas abajo. Esta longitud es muy importante también ya que garantiza que la medición en el punto donde la rasante piezométrica se restituye (punto de medición, aguas abajo, de las pérdidas permanentes) y por tanto, no está influenciada por la perturbación creada por el flujómetro.

## MALLADO

Por su parte la malla fue estudiado con varias opciones de mallado global y de refinación del mismo hasta lograr errores de calibración satisfactorios. La información del mallado global que se empleó en los tres tramos, así como la información de la las capas de inflación y los detalles de las esferas de influencia que se emplearon para refinar el mallado alrededor de los puntos de tomas de presión, la zona de la cuña y la zona donde se restituye la rasante piezométrica aparecen en la tabla 1 y en las figuras 2 y 3 se destacan algunas vistas de detalle. En términos medios, el mallado estuvo constituido por 1E07 nodos y 3,6E07 elementos.

Tabla 1. Detalles más relevantes del mallado.

Malla global		Inflación	
Tamaño mínimo=	0,01 m	Capas=	20
Tamaño máximo de la cara=	0,01 m	Altura de la primera capa=	0,00015m
Tamaño máximo=	0,01 m	Razón de crecimiento=	1,41
Ángulo normal de curvatura=	5°		
Esferas de influencia			
Radio de las esferas=	0,30 m	Tamaño de los elementos=	0,0025 m

En la figura 2 se detalla la posición de los ejes coordenados auxiliares definidos para ubicar las esferas de influencia que refinarán en mallado en puntos de importancia para el resultado. Debajo, en la misma figura, aparecen ubicadas las esferas de influencia, destacándose en importante solape obtenido entre las esferas ubicadas en los puntos de toma de presión aguas arriba y aguas debajo de la cuña y la ubicada en el vértice de la misma.

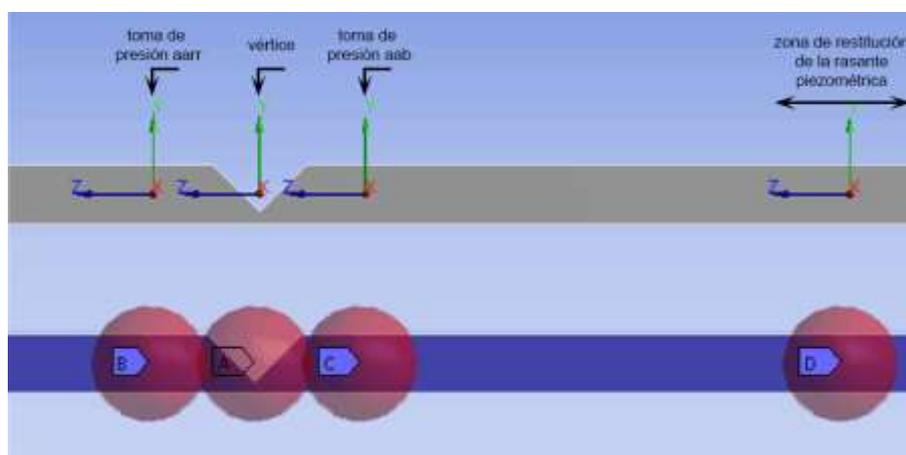


Figura 2. Detalles de las esferas de influencia.

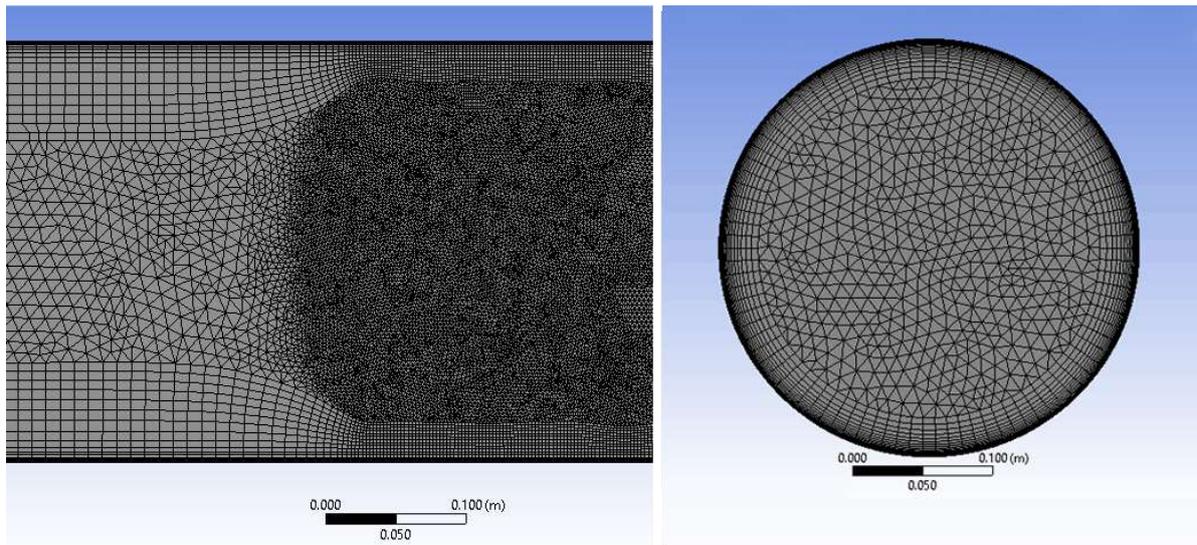


Figura 3. Detalles del mallado global, la frontera entre el global y la refinación y la inflación.

Parte importante es esta etapa del diseño es el análisis de la calidad del mallado. Para esto ANSYS tiene un grupo de parámetros que permiten conocer este importante factor. La tabla 2 muestra los parámetros que ANSYS CFX tiene para evaluar la calidad del mallado. De la tabla se infiere que la calidad de la malla empleada para la evaluación de este flujómetro cumple con altos índices los valores exigidos por ANSYS.

Tabla 2. Calidad del mallado.

Indicador	Intervalo	Modelo
Calidad de elementos (Element Quality)	1 óptimo 0 pésimo	Media= 0,791 Desv. Típica= 0,226
Relación de aspecto (Aspect Ratio)	1 óptimo Mientras sea > 1 es peor Menor que 100 es aceptable	Media= 3,4776 Desv. Típica= 7,3759
Relación Jacobiana (Jacobian Ratio)	1 óptimo Buena calidad entre 1 y 10	Media= 1,0085 Desv. Típica= 2,0808E-02
Asimetría (Skewness)	0 equilátero Mayor que 0 a 0,25 excelente Mayor que 0,25 a 0,5 bueno	Media= 0,19038 Desv. Típica= 0,12091
Calidad ortogonal (Orthogonal Quality)	0,95 a 1 excelente 0,70 a 0,95 muy bueno	Media= 0,89777 Desv. Típica= 8,6686E-02
Desviación paralela (Pararell desviation)	0 ideal 70 aceptable	Media= 3,4881 Desv. Típica= 5,539

## CONDICIONES DE CONTORNO

Las condiciones de contorno culminan la etapa de construcción del modelo y definen parámetros que tienen un papel protagónico en la obtención de los resultados. Una estrategia igual a la descrita en anterior publicación de los autores (León et al. 2023), se empleó para las condiciones de entrada un patrón de velocidades estable obtenido previamente en tubería de idénticas características para la misma velocidad de entrada. Para el modo de turbulencia a emplear los resultados obtenidos por Chirino (Chirino,2023), el sitio web DFC Online (<https://www.cfd-online.com/Tools/turbulence.php>) y del Langley Research Center (Rumsey,2024), brindaron la información necesaria para la selección de los valores iniciales del valor de la energía cinética turbulenta ( $k$ ) y de la razón específica de

disipación de la energía cinética de la turbulencia a energía térmica interna ( $\omega$ ). En la mecánica de fluidos computacional, el modelo de turbulencia  $k$ -omega ( $k$ - $\omega$ ) es un modelo de turbulencia de dos ecuaciones, utilizado como cierre de las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds. El modelo predice las características de la turbulencia mediante dos ecuaciones diferenciales parciales de dos variables:  $k$  y  $\omega$ .

La ejecución de cada modelo se prolongó hasta que la raíz cuadrada del valor medio del cuadrado de los residuos (Root Mean Square, RMS) fueran menor que una millonésima ( $1E-06$ ), o el comportamiento respecto al tiempo mostrará un comportamiento estable respecto al eje de las iteraciones, o lo que es igual, respecto al tiempo de ejecución de la corrida.

## RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN

Para la obtención de los resultados se empleó una PC con una placa base B365M DS3H, memoria GPU compartida 3,9 Gb; procesador Core i5 de 9<sup>na</sup> generación, 6 núcleos y 24 Gb de memoria RAM de 2666 MHz. La calibración se realizó por comparación contra la ecuación brindada por la ISO 5167-6 (ISO,2022) que relaciona el caudal con la diferencia de presión entre las tomas de presión definidas aguas arriba y aguas abajo de la cuña y la ecuación que relaciona la pérdida permanente de carga con el caudal.

## CARACTERÍSTICAS DEL MODELO EMPLEADO

Las velocidades medias, empleadas para comprobar la fidelidad del modelo al reproducir la variación de los valores de la rasante piezométrica, para cada uno de los valores de la altura de la garganta del flujómetro ( $h$ ), fueron 0,25 m/s; 0,50 m/s; 1,25 m/s y 2,00 m/s respectivamente. Los cuatro valores anteriores abarcan el intervalo de velocidades más común para la conducción de agua. La comprobación de estos valores de velocidad para el patrón de velocidades a la entrada y en la sección de medición de la presión aguas arriba de la cuña, se realizó empleando el método aritmético normado por la British Standard (BS,2008) tomando la máxima cantidad de puntos normado por radio (5 por radio). Los resultados para los cuatro caudales y las tres alturas de la cuña ( $h$ ) aparecen en la tabla 3.

Tabla 3. Velocidad media de los patrones de velocidad

h (mm)	Velocidad (m/s)	Sección entrada		Sección de medición de p1	
		$v_{media}$ (m/s)	Diferencia (%)	$v_{media}$ (m/s)	Diferencia (%)
60	2,00	1,998	0,100	1,993	0,350
	1,25	1,251	-0,080	1,249	0,080
	0,50	0,499	0,200	0,497	0,600
	0,25	0,249	0,400	0,251	-0,400
120	2,00	2,038	1,866	2,018	0,914
	1,25	1,275	1,967	1,261	0,904
	0,50	0,511	2,153	0,505	1,012
	0,25	0,256	2,226	0,253	1,173
180	2,00	2,035	1,741	2,018	0,909
	1,25	1,266	1,294	1,261	0,900
	0,50	0,510	1,999	0,505	1,007
	0,25	0,255	2,099	0,253	1,181

## RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN

Los resultados obtenidos en la calibración tomando como base los resultados brindados por la ISO 5167-6 del 2022 (ISO,2022) aparecen en la tabla 4 y graficados en la figura 4.

Tabla 4. Resultados de la calibración

h (mm)	v (m/s)	Dp (Pa)			hf (Pa)		
		ISO	Modelo	error (%)	ISO	Modelo	error
60	0,250	2,784E+03	2,723E+03	2,20	2,205E+03	2,242E+03	1,70
	0,500	1,114E+04	1,087E+04	2,36	8,818E+03	8,952E+03	1,52
	1,250	6,960E+04	6,805E+04	2,23	5,511E+04	5,603E+04	1,67
	2,000	1,782E+05	1,744E+05	2,11	1,411E+05	1,434E+05	1,63
120	0,250	3,766E+02	3,710E+02	1,49	2,286E+02	2,290E+02	0,17
	0,500	1,506E+03	1,481E+03	1,69	9,145E+02	9,140E+02	0,05
	1,250	9,415E+03	9,382E+03	0,35	5,716E+03	5,701E+03	0,25
	2,000	2,410E+04	2,377E+04	1,38	1,463E+04	1,458E+04	0,33
180	0,250	9,899E+01	1,010E+02	2,03	4,600E+01	4,600E+01	0,01
	0,500	3,960E+02	4,050E+02	2,28	1,840E+02	1,810E+02	1,62
	1,250	2,475E+03	2,541E+03	2,67	1,150E+03	1,131E+03	1,64
	2,000	6,336E+03	6,502E+03	2,63	2,944E+03	2,888E+03	1,89

Los resultados menores del 2,7% para la relación entre el caudal y la diferencia de presión entre los puntos normados por la ISO 5167-6 del 2022 para este flujómetro y menores que 1,9% para los valores de las pérdidas de carga permanentes que introduce el flujómetro, permiten asegurar que el modelo está en capacidad de brindar nuevos análisis acerca de las características de este flujómetro empleando el DFC como herramienta de trabajo. Además, permite analizar posibles cambios en el diseño de este flujómetro, así como estudiar nuevos diseños con principios semejantes para la medición del caudal.

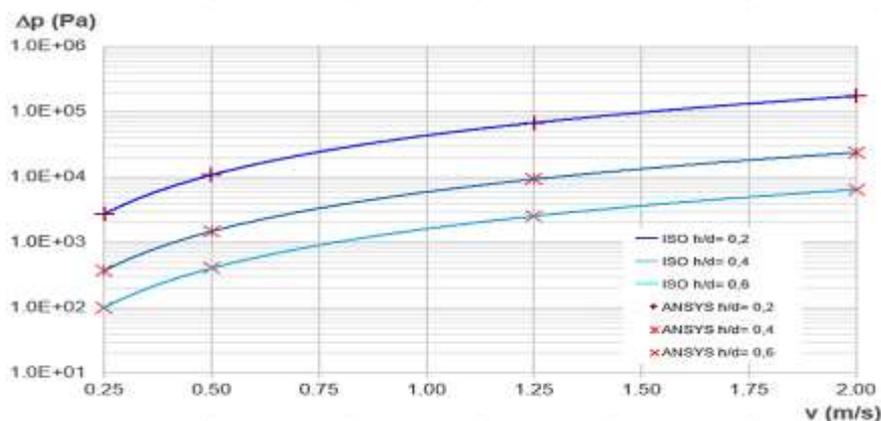


Figura 4. Resultados gráficos de los valores dados por la ISO 5167-6 y por el modelo

## RESULTADOS INICIALES DEL MODELO CALIBRADO

Muchas son las respuestas que pueden obtenerse del modelo DFC de este flujómetro, e incluso nuevas versiones de diseño tratando de eliminar problemas que la cuña asimétrica produce.

Los cambios en la velocidad, la presión, la energía cinética turbulenta, la disipación de los remolinos turbulentos y la razón de cambios de los remolinos viscosos pueden analizarse mediante los modelos DFC calibrado. Las imágenes resultantes transmiten una idea muy completa del comportamiento hidrodinámico del modelo analizado.

La figura 5 muestra dos casos extremos estudiados. En un caso un modelo con alta velocidad y máxima penetración y el otro un modelo con mínima velocidad con mínima penetración. Para ambos se muestra los contornos de la distribución de la velocidad ( $v$ ), la presión ( $p$ ) y la distribución de la

energía cinética turbulenta (tke) son tres respuestas del modelo que informan sobre las zonas de interés para la disipación de la energía. Otras salidas del modelo que pueden obtenerse para completar la información son la disipación de los remolinos turbulentos (ted) y la frecuencia de los remolinos turbulenta (tef).

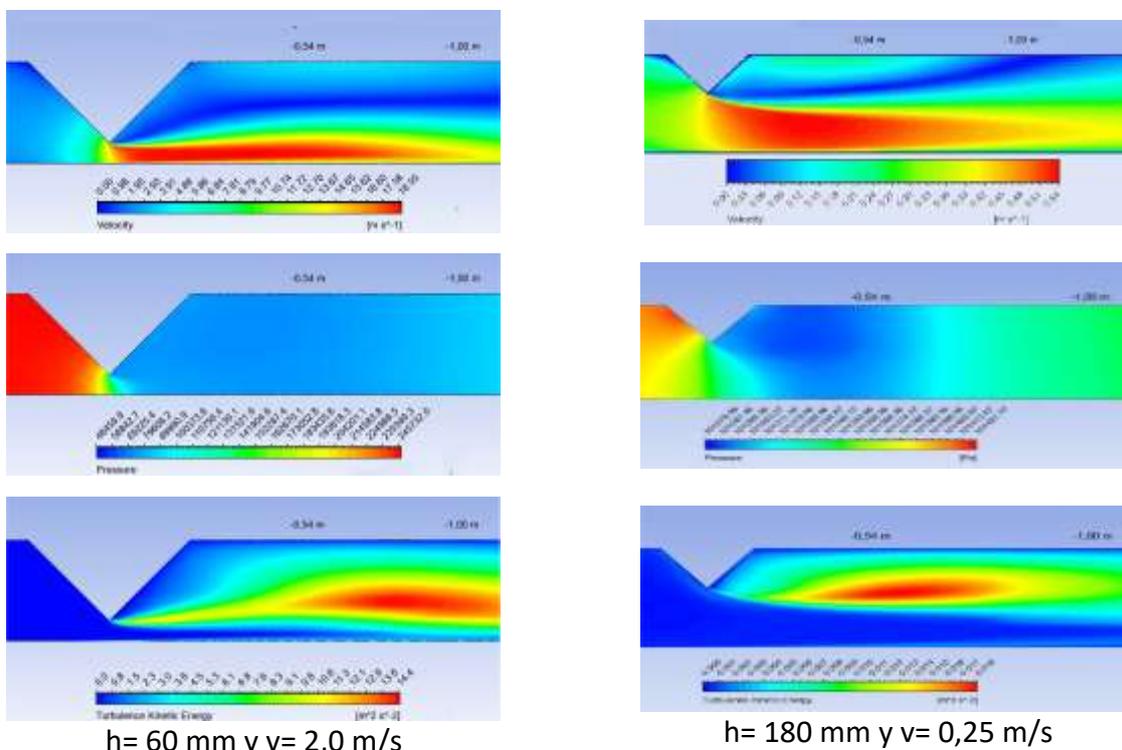


Figura 5. Algunos contornos de los resultados de la calibración

Esta información afirma lo que inicialmente puede pensarse sobre un elemento con un diseño geométrico como el de la cuña. Tanto la penetración del conducto por un solo lado como los ángulos de entrada y salida provocan una fuerte asimetría del chorro y una fuerte proyección del mismo hacia aguas abajo, contribuyendo al valor de las pérdidas permanentes en el conducto.

Nótese en la gráfica de velocidad la fuerte contracción del chorro para la menor abertura, junto a la tendencia de las altas velocidades a permanecer por un largo tramo cerca de la invertida del conducto. También es de notar la rápida restitución de la rasante piezométrica de la cuña que tiene la mayor abertura respecto a la de menor. Y por último la amplia zona de remolinos turbulentos a medida que la abertura se hace más pequeña.

## RESULTADOS SOBRE LAS PÉRDIDAS PERMANENTES

Para la medición de las pérdidas permanentes, que introduce el flujómetro en el conducto, se empleó una técnica de análisis muy detallada. Esta consistió en medir la presión en 500 puntos, equidistantes entre sí, a lo largo del eje de simetría del conducto a partir del punto de medición de la presión aguas abajo (Figura 1). Esta información graficada y tabulada permitió obtener con gran exactitud el punto en que la rasante piezométrica generada por la obstrucción creada por el flujómetro, comienza a comportarse, de nuevo, como función de las características del conducto, o lo que es igual, deja de estar influenciada por la obstrucción. La figura 6 muestra un ejemplo de esto.

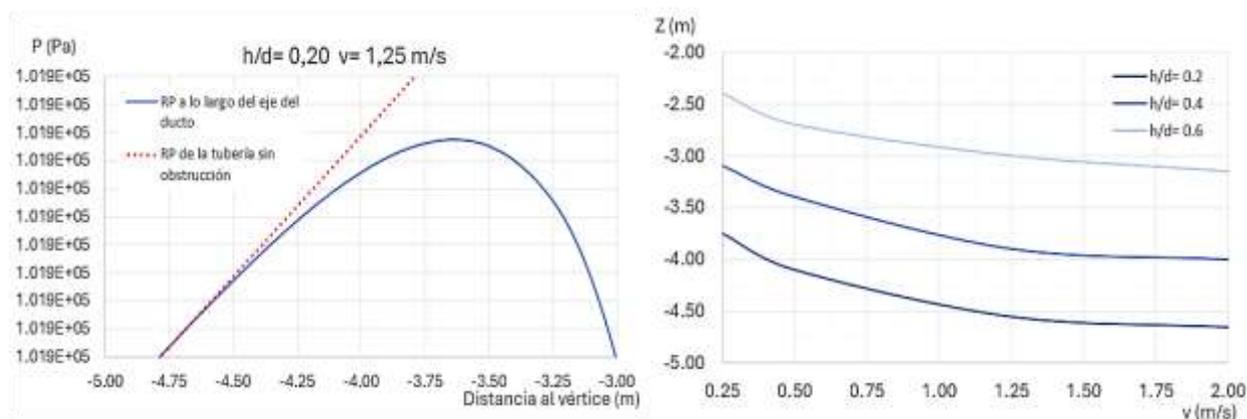


Figura 6. Movimiento de la rasante piezométrica aguas abajo de la obstrucción

En la figura 6 a la izquierda, aparece un detalle del comportamiento de la rasante piezométrica aguas abajo de la obstrucción creada por la cuña para un caso específico. Los valores de  $Z$  negativos son convencionales ya que para el modelo DFC se colocó el vértice de la cuña en la coordenada  $Z$  igual a cero ( $Z= 0,00$ ); correspondiendo los valores positivos de  $Z$  al tramo de conducto aguas arriba de la cuña y viceversa. La figura 6, a la derecha, muestra un comportamiento no referenciado en la ISO 5167-6. En la imagen cada curva representa la distancia al eje en que la rasante piezométrica deja de estar influenciada por el elemento empleado como deprimógeno para la medición del caudal. El conocimiento de esta distancia es importante, ya que permite al proyectista de una instalación que emplee este flujómetro poder decidir a qué distancia colocar otro accesorio aguas abajo sin que el comportamiento hidrodinámico esté influenciado por el elemento empleado para la medición del caudal, en este caso la cuña.

No obstante, el comportamiento anterior, el patrón de velocidades aguas abajo sigue estando influenciado por la obstrucción asimétrica que provoca la cuña en la tubería. Un estudio detallado del comportamiento del patrón de velocidades aguas abajo de la cuña, acompañado del cálculo de la velocidad media de cada patrón indican lo siguiente:

- La característica del diseño de este flujómetro, donde la contracción del chorro se produce mucho más cerca de la invertida que de la corona interna del ducto, genera un chorro de alta velocidad muy cerca de la invertida, con concentración de remolinos de bajas velocidades en la dirección contraria. La figura 7 muestra, para dos casos extremos, la configuración de los vectores velocidad donde se observa las altas velocidades y los remolinos de baja velocidad producido por la obstrucción.

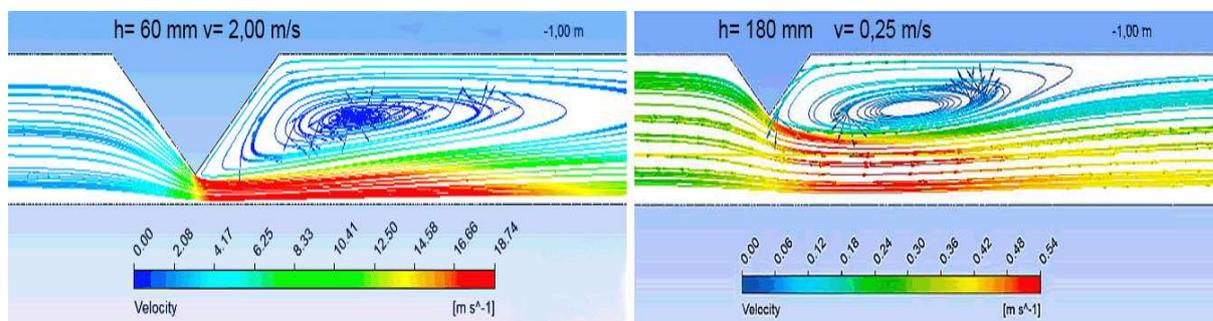


Figura 7. Vectores velocidad para los dos casos extremos del presente estudio

- El diseño de este flujómetro provoca que el patrón de distribución de velocidades tenga que avanzar un largo tramo, figura 8, hasta lograr su estabilización completa. Aunque la figura

solo recoge los casos extremos del estudio, en los doce escenarios modelados se pudo constatar que la velocidad media del patrón de entrada se restablecía en las secciones en que la rasante piezométrica dejaba de estar influenciada por la cuña. Y además, que la forma asimétrica del patrón viajaba mucho más hacia aguas abajo, influenciando secciones hasta diez metros aguas abajo del vértice de la cuña.

- El ángulo del tramo convergente y del tramo divergente de la cuña (ambos con 45° respecto a la horizontal) tiene una gran influencia en el alto valor de las pérdidas permanentes que introduce en el conducto, comparada con otros flujómetros deprimógenos. En la hidrodinámica está muy bien estudiado la influencia del diseño del tramo de salida de un conducto, libre o forzado, que su sección transversal haya tenido un estrechamiento y ángulos tan fuertes como el de la cuña no son los más aconsejables si se quieren minimizar las pérdidas permanentes (Idel'cik, 1969). La figura 9 muestra un ejemplo de las pérdidas permanentes que introducen varios deprimógenos para una misma razón de contracción ( $\beta = \text{área reducida} / \text{área de la sección}$ ), el mismo diámetro de conducto y las cuatro velocidades medias empleadas en el estudio. Estas altas pérdidas permanentes que introduce la cuña solo son superadas por la Placa Orificio.

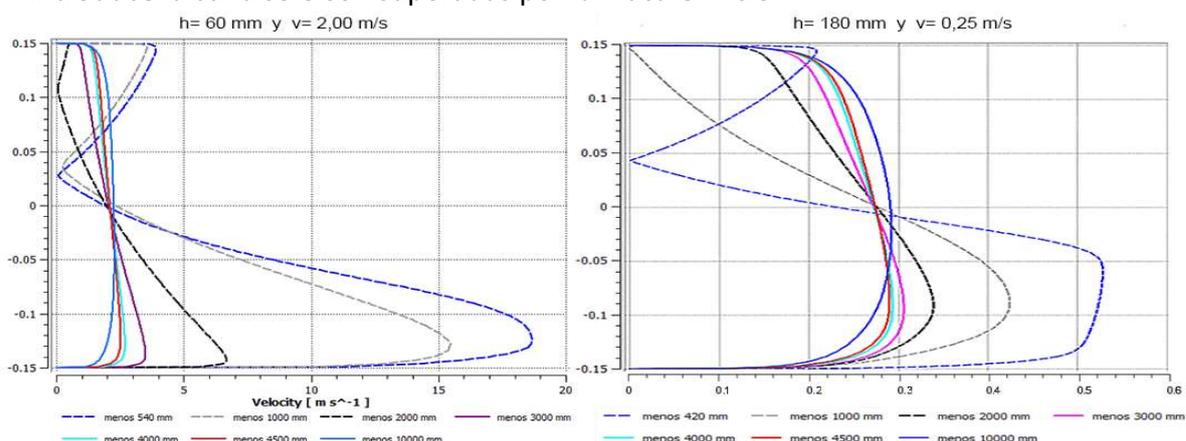


Figura 8. Comportamiento del patrón de velocidades para los dos casos extremos del presente estudio

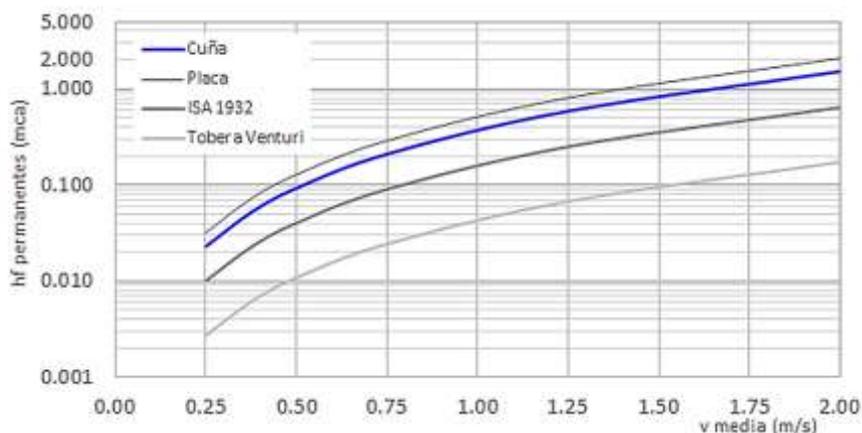


Figura 9. Pérdidas de carga permanentes de varios deprimógenos

A partir de tener calibrado el modelo y ratificar que el principal problema en este deprimógeno radica en las altas pérdidas de carga que introduce de forma permanente en el conducto se aborda

a continuación, la influencia que pueden tener dos elementos del diseño geométrico: los ángulos de entrada y salida y la asimetría del elemento respecto al eje de simetría del conducto.

## UN NUEVO DISEÑO DE CUÑA

A partir de los resultados obtenidos anteriormente y con el objetivo de minimizar las pérdidas permanentes introducidas por la cuña se analizarán dos diseños nuevos: la cuña con diferentes ángulos de entrada y salida (SCuña) y una cuña doble, o lo que es igual, simétrica respecto al eje de simetría del conducto (DCuña) y también con diferentes ángulos de entrada y salida.

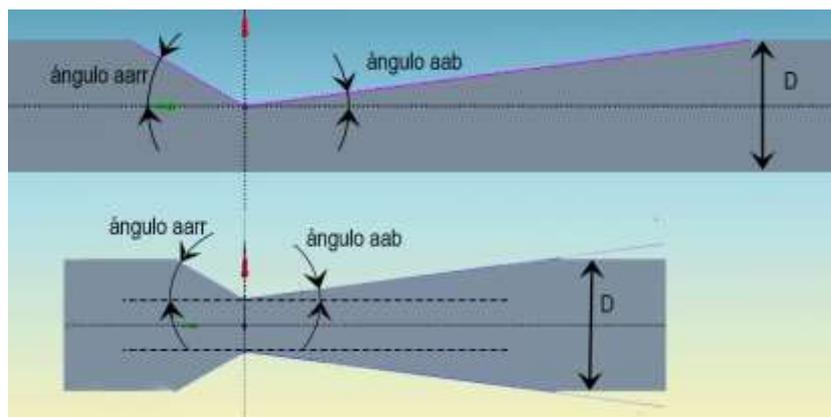


Figura 10. La SCuña y la DCuña para un mismo D y una misma contracción (8)

## DISEÑOS GEOMÉTRICOS Y RESULTADOS DE LA SCUÑA Y LA DCUÑA

Los resultados obtenidos no abarcan todas las interrogantes que pueden presentarse en un nuevo diseño, pero, tal como se demuestra a continuación, dejan un camino abierto para futuros estudios.

### Resultados de la SCuña

Para el primer diseño (SCuña) se analizarán las combinaciones de 45° en la entrada con 30°, 15° y 7,5° a la salida y posteriormente las mismas combinaciones a la salida con 30° a la entrada. Se mantuvo el diámetro interior de 300 mm y se modelarán para la cuna original y para el nuevo diseño las soluciones para una penetración de 150 mm ( $h = 150$  mm) para velocidades desde 0,25 m/s hasta 2,0 m/s. La tabla 5 recoge los primeros resultados de los modelos.

Tabla 5. Reducción de  $h_f$  del modelo respecto a las  $h_f$  de la cuña original

v (m/s)	45° aarr			30° aarr			
	30° aab	15° aab	7,5° aab	45° aab	30° aab	15° aab	7,5° aab
0,250	0,92	0,72	0,31	0,75	0,74	0,41	0,18
0,375	0,92	0,71	0,31	0,75	0,74	0,41	0,18
0,500	0,92	0,71	0,31	0,75	0,74	0,40	0,18
0,750	0,92	0,71	0,30	0,74	0,73	0,40	0,18
1,250	0,91	0,70	0,30	0,74	0,73	0,39	0,18
2,000	0,91	0,70	0,30	0,74	0,72	0,39	0,18
Promedio=	0,92	0,71	0,31	0,74	0,73	0,40	0,18
Desv. típica=	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00

La tabla 5 muestra un grupo de resultados que son de gran valor práctico:

- 1º. El ángulo de salida de la SCuña tiene un gran peso en la disminución de las pérdidas de carga, obteniéndose reducciones en todos los casos y muy fuertemente para el ángulo de 7,5°.

2º. El ángulo de entrada tiene también un marcado efecto en el valor de las pérdidas, lo cual se evidencia en todos los casos, llegando a reducirse un 18% con la combinación 30º/7,5º.

3º. De interés es destacar que las combinaciones 30º/45º y 30º/30º no arrojaron diferencias significativas.

Si algo puede complicar el empleo de los ángulos estudiados es la longitud que toma el deprimógeno, sin contar las distancias aguas arriba y aguas abajo de las tomas de presión. Para el caso estudiado la longitud que abarca la cuña respecto a la cuña original (45º con 45º) va desde 1,37 veces para la combinación de 45º con 30º; hasta 4,66 veces para la combinación 30º con 7,5º.

### Resultados de la DCuña

En busca de minimizar tanto las pérdidas permanentes como la longitud del elemento deprimógeno se ensayó una doble cuña simétrica al eje de simetría del conducto. Los resultados, solo para la mejor combinación obtenida para la SCuña, dan los valores que aparecen en la tabla 6.

Tabla 6. Reducción de hf y la longitud de las nuevas soluciones

v (m/s)	30º con 7,5º		L nueva solución/L original	
	SCuña	DCuña	SCuña	DCuña
0,250	0,18	0,16	4,66 (para la misma $\beta$ )	2,78 (para la misma $\beta$ )
0,375	0,18	0,16		
0,500	0,18	0,16		
0,750	0,18	0,16		
1,250	0,18	0,16		
2,000	0,18	0,16		
Promedio=	0,18	0,16		
Desv. típica=	0,001	0,0005		

Es significativo la reducción de la longitud de la DCuña, lo cual facilita su construcción y manejo en la práctica, mientras que las pérdidas permanentes no disminuyen significativamente respecto a la SCuña.

Obtener este valor de pérdidas de carga permanentes con estos ángulos coloca a este deprimógeno respecto a los otros normados por la ISO, tabla 7, con valores de pérdidas de carga muy por debajo de las Toberas ISA1932 y las Toberas de Radio Largo y ligeramente por encima de la Tobera Venturi.

Tabla 7. Comparación de las pérdidas con otros deprimógenos para una misma contracción ( $\beta$ )

v (m/s)	hf (m)					
	Plato	T. ISA 1932	TRL	T. Venturi	Scuña 30ºx7,5º	DCuña30ºx7,5º
0,250	0,0125	0,0040	0,0035	0,0013	0,0018	0,0016
0,375	0,0282	0,0089	0,0077	0,0029	0,0041	0,0036
0,500	0,0504	0,0158	0,0137	0,0052	0,0073	0,0063
0,750	0,1142	0,0355	0,0305	0,0117	0,0164	0,0143
1,250	0,3199	0,0982	0,0838	0,0325	0,0453	0,0398
2,000	0,8256	0,2509	0,2124	0,0831	0,1154	0,1020

Para concluir este último análisis sobre la efectividad de los cambios introducidos al modelo original del flujómetro de Cuña se presenta la figura 11 con una primera información visual del comportamiento de estos nuevos diseños.

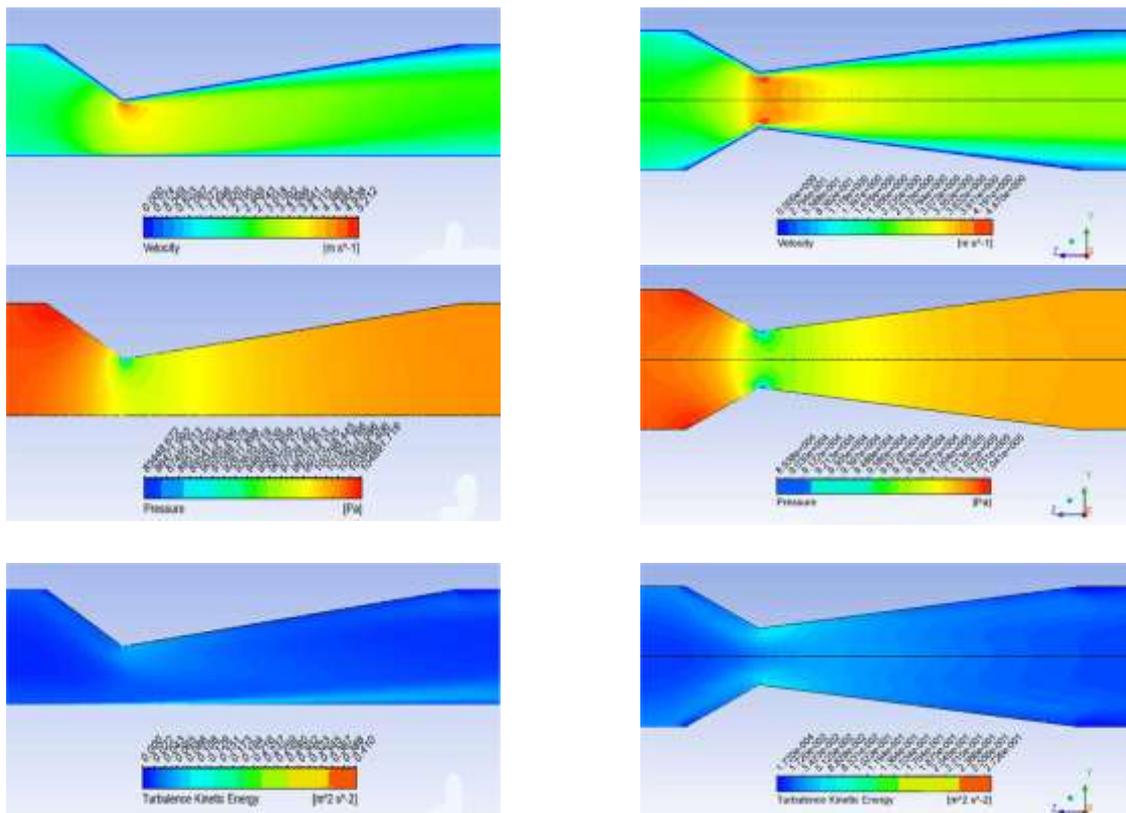


Figura 11. Comportamiento para 2 m/s de  $v$ ,  $p$  y  $k_{tke}$  para SCuña y la Dcuña con la variante de  $30^\circ$  con  $7.5^\circ$

Se destaca en las imágenes la variación gradual de los contornos de velocidad y presión. En el caso de los contornos de la energía cinética turbulenta, resalta la poca variación lo cual es compatible con los resultados alcanzado en relación con las bajas pérdidas de presión que el diseño incorpora permanentemente en el conducto.

### 03 CONCLUSIONES

Se demostró que los parámetros empleados para el diseño geométrico, el mallado global, la refinación del mismo y las condiciones de contorno han resultado satisfactorios tanto para la obtención de la relación gasto versus diferencia de presión, como para la relación gasto versus perdidas permanentes en el conducto.

A partir de los resultados obtenidos se logró demostrar la alta incidencia de los ángulos de entrada y salida en el valor de la pérdida de carga permanente.

Como resultado del estudio de la SCuña con varias combinaciones de valores para los ángulos de entrada y salida, se llegó a obtener una pérdida de carga permanente con un valor equivalente al 18% de la perdida permanente que introduce la cuña original en el conducto.

De manera inicial se estudió y se presenta una variante del flujómetro con doble cuña simétrica, que produce muy bajas pérdidas permanentes y además reduce considerablemente la longitud de la nueva variante de flujómetro denominada SCuña.

### 04 REFERENCIAS

- International Standard (ISO). ISO 5167-6.** (2022). Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full — Part 6: Wedge meters. Suiza, 2022. [Consultado julio de 2024]. Disponible en: <https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&q=ISO+5167-6+segunda+edici%C3%B3n>
- León A. J., Stefano E. y CHIRINO J.** (2023) “Reducción de longitudes de tubería en la simulación CFD de flujos a través de accesorios”. Revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Vol. XLIV (3), (Jul-Sep 2023). ISSN 2788-6050, ISSN-L 1680-0338 y RNPS 2066. Disponible en: <https://riha.cujae.edu.cu/index.php/riha>
- Chirino J.** (2023). “Estudio de la influencia de modelos RANS en la modelación de un flujo a través de una obstrucción. Caso de estudio en caudalímetro de cuña”. Tesis en opción del título académico de Ingeniero Hidráulico. Centro de Investigaciones Hidráulicas, Universidad Tecnológica de La Habana, CUJAE, La Habana, Cuba. 2023.
- British Standard. BS ISO 3966** (2008). “Measurement of fluid flow in closed conduits. Velocity area method using Pitot static tubes”. Second Edition, British Standard, United Kingdom. ISBN 978 0 580 62863 4.
- Rumsey C.** (2004) “Turbulence Modeling Resource”. Langley Research Center, National Aeronautics and Space Administration (NASA), U.S.A, 2024 (actualizado 06/15/2024). [Consultado julio de 2024]. Disponible en: <https://turbmodels.larc.nasa.gov/>
- Idel’cik I. E.** (1969) “Mémento des pertes de charge: coefficients de pertes de charge singulières et de pertes de charge par frottement”. Editorial Eyrolles, OCLC Number 421565917. Paris, ©1969. [Citado: 30 de julio de 2024] Disponible en: [https://www.amazon.com/stores/I.-E.-Idelcik/author/B00DQ6A1KO?ref=dbs\\_a\\_mng\\_rwt\\_scns\\_share&isDramIntegrated=true&shoppingPortalEnabled=true](https://www.amazon.com/stores/I.-E.-Idelcik/author/B00DQ6A1KO?ref=dbs_a_mng_rwt_scns_share&isDramIntegrated=true&shoppingPortalEnabled=true)

#### CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses

#### CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

**Alcides J. León Méndez**

<https://orcid.org/0000-0002-5072-6438>

Realizó contribuciones en el diseño de la investigación, desarrollo de la investigación, redacción del documento y análisis y discusión de los resultados.

**Johan Chirino Montano**

<https://orcid.org/0009-0001-3749-5938>

Realizó contribuciones en el diseño de la investigación, desarrollo de la investigación y análisis y discusión de los resultados.

## Estimación de la cobertura forestal en la cuenca hidrográfica del río “San Juan”, Cuba

**Alain Paneque Martínez**

E-MAIL: [alain5@uo.edu.cu](mailto:alain5@uo.edu.cu)

Departamento de Ingeniería Hidráulica. Universidad de Oriente. Santiago de Cuba.

**Ofelia Pérez Montero**

E-MAIL: [ofelia@uo.edu.cu](mailto:ofelia@uo.edu.cu)

Centro de Estudios Multidisciplinarios de Zonas Costeras. Universidad de Oriente. Santiago de Cuba.

**Celene Milanés Batista**

E-MAIL: [unimagdalena@cmb.edu.co](mailto:unimagdalena@cmb.edu.co)

Universidad del Magdalena. Santa Marta. Colombia. Departamento civil y ambiental.

**José Fernando Álvarez Vega**

E-MAIL: [alvarez@uo.edu.cu](mailto:alvarez@uo.edu.cu)

Departamento de Ingeniería Hidráulica. Universidad de Oriente. Santiago de Cuba.

### RESUMEN

Una problemática a nivel mundial es la pérdida de cobertura boscosa, por lo que su protección es prioridad en Cuba, además de formar parte del plan del estado para enfrentamiento al cambio climático. El objetivo de esta investigación consistió en evaluar la dinámica espacio-temporal del cambio de cobertura boscosa acontecida entre los años 2015 y 2023 en la cuenca hidrográfica “San Juan”, provincia de Santiago de Cuba. Se realizó el análisis multitemporal y clasificación supervisada de imágenes satelitales Landsat 8, bandas 6-5-4 del sensor OLI-TRS, procesadas en el software profesional QGIS v-3.24. Se catalogó la cobertura en cuatro categorías y se determinó el área de cobertura boscosa. Como resultado se obtuvo que índice de boscosidad disminuyó en 1.32%, con una afectación de 182 ha de cobertura boscosa de la cuenca.

**PALABRAS CLAVES:** cobertura forestal, cuencas hidrográficas, imágenes satelitales, índice de boscosidad, SIG

Estimation of forest cover in the “San Juan” river basin, Cuba.

### ABSTRACT

A worldwide problem is the loss of forest cover, so its protection is a priority in Cuba, in addition to being part of the state plan to confront climate change. The objective of this research was to evaluate the spatio-temporal dynamics of forest cover change between 2015 and 2023 in the “San Juan” watershed, province of Santiago de Cuba. A multitemporal analysis and supervised classification of Landsat 8 satellite images, bands 6-5-4 of the OLI-TRS sensor, processed in the professional software QGIS v-3.24 was carried out. The cover was catalogued into four categories and the area of forest cover was determined. As a result, the forest cover index decreased by 1.32%, affecting 182 ha of forest cover in the watershed.

**KEYWORDS:** forest cover, watersheds, satellite images, forest cover index, GIS.

## 01 INTRODUCCIÓN

Entre los principales problemas que afronta en la actualidad muchos países en vía de desarrollo, se encuentra, el manejo incorrecto de sus recursos naturales (Alarcón et al. 2019). El importante crecimiento demográfico y concentración de la población en asentamientos humanos, la pobreza

estructural, la debilidad de sectores alternativos, el mal uso de los suelos y la inexistencia de vigilancia y control en áreas naturales, son algunas de las diversas causas que propician una serie de transformaciones ambientales y efectos negativos que deterioran los bienes y servicios ecosistémicos dentro de las cuencas hidrográficas, que unidas a las altas tasas de consumo, tienen como resultado patrones asociados a procesos de degradación de hábitat y altos índices de deforestación (FAO 2006).

Los factores directos e indirectos son dos de los principales impulsores de la deforestación, entre los que se incluyen factores ecológicos, sociales, comerciales y biofísicos que interactúan de forma compleja y que, en última instancia, provocan la pérdida de vegetación. Los factores directos de la deforestación pueden ser tanto naturales como antropogénicos (FAO 2006). Entre los impulsores directos naturales se encuentran los daños causados por las fuertes inundaciones, las zonas quemadas por los incendios forestales, la infestación o el ataque de parásitos o depredadores y los huracanes.

En Cuba la protección de la cobertura vegetal tiene como eje principal de su tutela jurídica la Ley No. 85 de 21 de julio de 1998, y como parte de la complementariedad a esta legislación, existen un conjunto de resoluciones que desde la institucionalidad gubernamental garantizan esta protección (Alarcón et al. 2019). Conforme a la dinámica forestal, se encuentran cubiertos el 31,15% de la superficie terrestre nacional, lo que conforma el patrimonio forestal. Éste se encuentra administrado por diferentes poseedores de tierras, siendo los más representativos, las empresas Agroforestales, la Empresa Nacional de Flora y Fauna y las empresas Agropecuarias y Ganaderas (Alarcón et al. 2019).

A lo anterior se suma que, como parte de la política ambientalista del país, en el Plan de Estado para el enfrentamiento al cambio climático (Tarea Vida), se intenciona el cuidado y conservación de la cobertura forestal, como parte de la Tarea No. 5, y se diseñan medidas estratégicas, institucionales, legales, o de carácter organizativo, así como inversiones y otros gastos, para dirigir la reforestación hacia la máxima protección de los suelos y las aguas en cantidad y calidad. Todo ello en congruencia con la Estrategia ambiental nacional (2021-2025), donde se declara expresamente que la deforestación es un problema ambiental del país (CITMA 2022).

Los análisis de cambios en la vegetación, características de los paisajes o propiedades de los hábitats por medio de información satelital son relativamente frecuentes, pero en Cuba han sido poco abordados (CITMA 2022).

La cobertura terrestre se reconoce mediante dos términos: cobertura y uso de la tierra. El primero hace referencia a los aspectos presentes de la superficie de la tierra, independiente de su origen (natural o antrópico) e involucra la fisonomía y composición de la cobertura vegetal. El segundo término se aplica a los tipos de ocupación o utilización que de una cobertura hace el hombre, de forma temporal o permanente (Chuvienco et al. 2010).

De acuerdo con criterios de (Chávez 1996), el conocimiento de la cobertura constituye uno de los aspectos más importantes dentro de los análisis biofísicos de los territorios, ya que permite espacializar los cambios de las coberturas y hacer una lectura ante diferentes escenarios de tiempo (análisis multitemporales).

La aplicación de tecnologías basadas en Sistemas de Información Geográfica (SIG) es cada vez más relevante para estimar y monitorear parámetros forestales en períodos cortos (Chávez 1996). De acuerdo con Borges et al. (2019), existe un particular interés en el manejo forestal del uso de imágenes satelitales para la estimación de atributos forestales, ya que favorecen la obtención de datos consistente, actualizada y espacialmente explícita en áreas de difícil acceso y con amplia cobertura. Al respecto, la estimación de parámetros forestales a partir de la combinación del uso de

satélites, sistemas de información geográfica y de sitios de campo georreferenciados (sitios permanentes) se han convertido en técnicas útiles y confiables para estimar variables como el volumen forestal y la biomasa forestal aérea (Chávez 1996).

Las técnicas relacionadas con la percepción remota han significado una herramienta fundamental para el estudio del ambiente (Chuvienco et al. 2010). Estas técnicas constituyen un conjunto de instrumentos que permiten la obtención, medición y registro de información a distancia, fundamentalmente se basan en las propiedades que poseen los diferentes cuerpos de reflejar la energía electromagnética proveniente de la radiación solar incidente sobre la superficie terrestre. Las imágenes obtenidas por los satélites ofrecen una perspectiva única de la tierra y sus recursos. El valor de las imágenes de satélite y la información extraída de ellas ofrecen una cobertura global y periódica de la superficie terrestre con una visión panorámica y homogeneidad en la toma de datos (Chuvienco et al. 2010).

Por su parte, según Sobrino (2011), el análisis multitemporal permite detectar cambios entre diferentes fechas de referencia, deduciendo la evolución del medio natural o las repercusiones de la acción humana sobre ese medio. Estos estudios evalúan la velocidad de la deforestación o reforestación, determinan su extensión geográfica y contribuyen al entendimiento de las causas naturales, sociales o económicas de los cambios en las escalas global, regional y local.

El paulatino y acentuado deterioro de ecosistemas frágiles, la consecuente pérdida sensible de suelos productivos y de la diversidad biológica, cambios en los ciclos hidrológicos e inundaciones, deterioro de las condiciones higiénico-ambientales, así como la pérdida de la capacidad de fijar el carbono son atributos de la inevitable y progresiva deforestación, (CITMA 2022) la cuenca hidrográfica San Juan, que tributa a la zona costera de la ciudad de Santiago de Cuba, constituye uno de los escenarios más representativos de esta situación en el municipio y de la cual los estudios con imágenes satelitales son escasos. El presente estudio se realizó con el objetivo de evaluar la dinámica espacio-temporal del cambio de cobertura boscosa que esta área ha experimentado durante el período comprendido entre 2015 al 2023, que permitió analizar los parámetros socioeconómicos que afectan la degradación de la cobertura boscosa de la zona objeto de estudio.

Esta investigación tiene un carácter interdisciplinar e interinstitucional. Es una investigación exploratoria y se basa en los principios del manejo integrado de cuencas y zonas costeras (Alarcón et al. 2021). Se hizo uso del método cualitativo de la investigación social para el análisis de contenido de documentos históricos sobre el crecimiento de la ciudad de Santiago de Cuba según fuentes de la Oficina Nacional de Información y Estadísticas de Cuba (ONEI 2022) y el auxilio de los sistemas de información geográfica.

## 02 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

### UBICACIÓN FÍSICO-GEOGRÁFICA

De acuerdo con la clasificación de Regiones Naturales y Antrópicas de Cuba de A. Núñez Jiménez y N. Viña Bayés (1989) la zona de estudio se encuentra ubicada en la Región Oriental, subregión de la Sierra Maestra, provincia de Santiago de Cuba, Cuba. La cuenca del río "San Juan" se ubica en la ciudad de Santiago de Cuba (19°58,0'N; 75°49,4'W), al este del archipiélago cubano, como se muestra en la figura 1 (García et al. 2021).

El área de estudio tiene 138,1 km<sup>2</sup> de superficie. Está identificado como un ecosistema bajo protección de interés provincial. Es una cuenca fluvial permanente, con un caudal hiperanual superficial medio aproximado de 30,1 hm<sup>3</sup>, el principal río desemboca en el paso Aguadores en el

Mar Caribe y sus principales afluentes son los ríos: Seco, Zacateca, Maisí, Cocal y Soledad. Está formado por la cuenca principal superficial y la subterránea (Duran 2021).



Figura 1. Ubicación de la zona de estudio mediante software QGIS (Paneque 2023)

## SÍNTESIS DE LA EVOLUCIÓN DEMOGRÁFICA DE LA CIUDAD DE SANTIAGO DE CUBA

Santiago de Cuba surge como villa en el año 1515. Por el desarrollo alcanzado, se convirtió en una de las ciudades más importantes de Cuba, siendo capital del país desde 1515 hasta 1556, año en que pasa a ser el segundo Gobierno de la Isla. Al dividirse la Isla en tres departamentos (Occidental, Central y Oriental) se mantuvo como capital del Departamento Oriental a lo largo de las diferentes divisiones político-administrativas. En 1878 se crea la antigua provincia Santiago de Cuba (figura 2), quedando dividida a su vez en términos municipales. Para 1960 se decidió incrementar el número de municipios y fortalecer la autoridad de las instancias provinciales de Gobierno. Se creó además un eslabón intermedio llamado región, con el objetivo de mejorar el sistema organizativo y de dirección territorial de las actividades económicas y sociales (ONEI 2021).

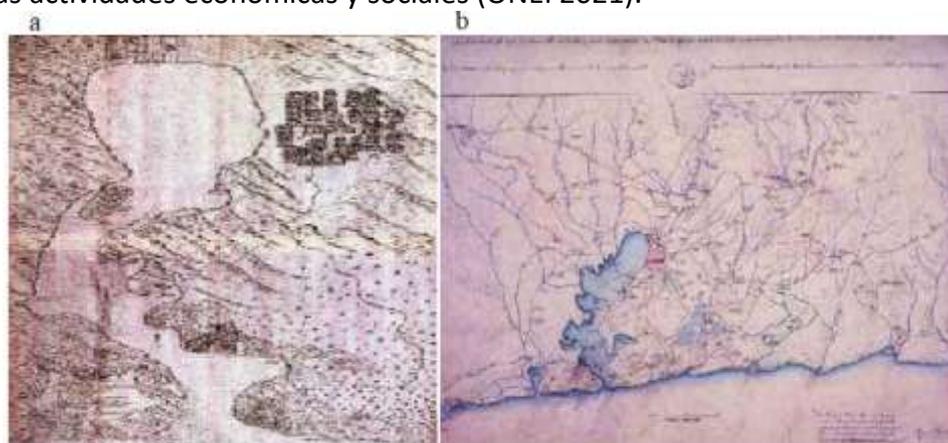


Figura 2. Mapas de 1669, ciudad de Santiago de Cuba (López 2005)

Según el consejo provincial de cuencas hidrográficas del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), la zona de estudio presenta los siguientes problemas ambientales: 1) sequía; 2) contaminación del agua por falta de alcantarillado; 3) contaminación de aguas superficiales por la presencia de actividades industriales, de servicios y residenciales; derrame de petróleo, generación de residuos peligrosos (neumáticos, bacterianos, entre otros); 4) degradación de la tierra; 5) usos inadecuados de áreas para cultivo; 6) deforestación; 7) contaminación de la base del río por un gran desarrollo antrópico; 8) salinización del agua por la intrusión salina en la estación seca. Los ocho problemas mencionados derivan de la necesidad de realizar investigaciones pertinentes en las cuencas de los ríos cubanos (García et al 2021).

Presenta un relieve heterogéneo debido a las diferentes superficies por las que atraviesa. El 73,5 % de la misma presenta valores de hipsometría inferior a 200 msnm, hacia su parte media e inferior. La parte norte tiene alturas entre 201 y 400 msnm dado fundamentalmente hacia la Sierra de Boniato y los sistemas de alturas de la Gran Piedra por el Este (García et al. 2021). Sobre esta última también existen valores superiores a 401 msnm ocupando una pequeña porción del área.

Actualmente, la población total de la provincia de Santiago de Cuba es de 1 049 256 habitantes, que representa el 9,36% de la de Cuba (11 209 628 habitantes) (ONEI 2021). Posee un grado de urbanización del 75,9% y es la segunda más poblada del país después de la capital. Su densidad poblacional es de 168 hab/km<sup>2</sup>. Su municipio cabecero, Santiago de Cuba, es el más poblado del país, con una población de 510 037 habitantes (ONEI 2021).

## ASENTAMIENTOS POBLACIONALES EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA SAN JUAN

Varios estudios demuestran este crecimiento de la población de forma no planificada. En el año 2004 se realizó el diagnóstico ambiental en la cuenca San Juan con una descripción más detallada, reportando un total de 11 Consejos Populares, con una población de 179 287 habitantes en 29 874 viviendas (CITMA 2004).

La población urbana era de 160 723, habitantes representando un 89.64 % de la población total y la población rural es de 11 362 para un 6.33%. Por otra parte, el Instituto de Recursos Hidráulicos (INRH) y la Delegación del CITMA en Santiago de Cuba, estimó una población de 195 582, distribuidos en 14 consejos populares y 115 circunscripciones, lo que representaba el 39.6 % del total de la población del municipio de Santiago de Cuba (CITMA 2015).

Estudios recientes realizados por la Oficina de Estadísticas e Información (ONEI) de Santiago de Cuba, resaltan que la población de la cuenca del río San Juan alberga el 41 % de la población del municipio, lo cual resulta significativo dado el crecimiento acelerado de la población urbana concentrada en este espacio. Como resultado la población ha mantenido su incremento animado por la migración del campo a la ciudad y hoy asciende a habitantes, en un total de 21 asentamientos poblacionales, distribuidos en 10 consejos populares, (figura 4), arrojando una densidad de 1446 habitantes por km<sup>2</sup> (ONEI 2022).

La cuenca hidrográfica del río “San Juan” alberga una población de 199 447 habitantes en 38 327 viviendas. La población urbana es de 180 723 habitantes representando un 90,61% de la población total y la población rural es de 18 724 para un 9,38%, (ONEI 2022) evidenciando un crecimiento más acelerado en la población urbana.

Conformada además por 21 asentamientos, de ellos, 1 urbano y 20 rurales. Ello se corresponde con la parte Oeste de la ciudad Santiago de Cuba y los poblados El Caney, Boniato y otros de significativo tamaño. La población total de la cuenca (exceptuando la ciudad Santiago de Cuba), es de aproximadamente 10113 habitantes (ONEI 2022). Solo la ciudad Santiago de Cuba está clasificada de 1er orden, el resto son poblados y caseríos de 3er orden, existiendo diez asentamientos, con poblaciones mayores de 200 habitantes. El 49,26 % de la población pertenece al sexo masculino y el 50.74% al femenino, distribuidos en estos momentos en 14 consejos populares y 115 circunscripciones, (figura 3) lo que representa el 39,6 % del total de la población del municipio de Santiago de Cuba (ONEI 2022).

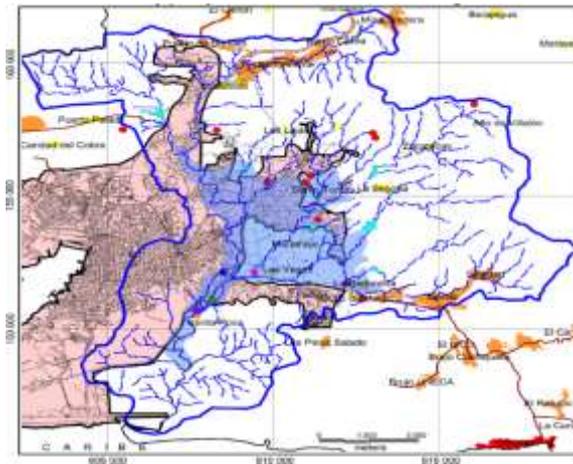


Figura 3. Consejos populares dentro de la cuenca hidrográfica San Juan (INRH 2019)

### 03 IMÁGENES SATELITALES Y LA EVALUACIÓN DEL CAMBIO DE COBERTURA VEGETAL

La formación de nubes en toda la zona sur-oriental de Cuba es muy frecuente, esto sucede ya que el país se encuentra en la Zona de Convergencia Tropical (ZCT), (Duran 2021). Asimismo, se menciona una fuerte presencia de nubes por debajo de los 500 msnm, mientras que en la zona central y occidental la nubosidad es parcial. Por tanto, el área de estudio se delimitó sobre los 500 msnm, con este rango de elevación, se minimizó la incidencia de nubes, considerada una fuerte limitante en el uso de imágenes de satélite para diversas investigaciones (Duran 2021).

La zona de estudio se delimitó conforme a la superficie correspondiente al área de manejo "San Juan". Las variaciones ocurridas en la vegetación fueron estimadas con la ayuda de imágenes satelitales, una imagen Landsat 8 para el año 2015 y otra para el 2023 con una resolución espacial 30 x 30 m, bandas 6-5-4 del sensor OLI-TIRS y proyección cartográfica Universal Transversal de Mercator (WGS 84 Zona 18 N, coordenadas 75.76951,20.03908), Map CRS- EPSG:3796 (611273,154420) obtenidas del portal de internet del Servicio Geológico de los Estados Unidos (United States Geological Survey USGS) y correspondientes al mes de febrero de ambos años (path/row: 11/62). Además, se utilizaron imágenes de la base de datos internacional Copernicus Open Access Hub (ver tabla 1).

Tabla 1. Detalles de las imágenes descargadas (Paneque 2023)

No	Fecha de la Imagen	Satélite/Sensor	Sistema de Referencia
1	Febrero 15, 2015	Landsat 8 Level 1 (OLI-TIRS)	WGS 84/UTM zone 18N
2	Febrero 27, 2020	Landsat 8 Level 1 (OLI-TIRS)	WGS 84/UTM zone 18N
3	Abril 12, 2023	Landsat 8 Level 1 (OLI-TIRS)	WGS 84/UTM zone 18N

#### SOFTWARE

Se emplearon técnicas de percepción remota y el Sistema de Información Geográfica QGIS versión 3.24 Tisler, en el procesamiento de las imágenes. El manejo y procesamiento de la información geográfica se realizó por medio de las herramientas libres del software QGIS versión 3.24 Tisler, se aplicó un filtro de <5% de nubes en toda la escena y así obtener productos satelitales dentro del periodo seco en las fechas de estudio. Se utilizó además el plugin de la Clasificación Semi-Automática (SCP, por sus siglas en inglés), ubicado en el entorno de QGIS. Se contrastó la cartografía temática propuesta por el MAE del 2016, con fines de exploración visual, tanto para la imagen del 2015 como para el 2023, se manejó la combinación de bandas espectrales 6,5 y 4, esta combinación se denomina,

Análisis de la Vegetación (AV), que permitió la comparación visual previa a la clasificación supervisada (Ver tabla 2).

Tabla 2. Principales combinaciones de bandas satelitales (Chuvieco 2010)

Combinación RGB					Aplicación Principal/Descripción
Sentinel-2	Modis9	Aster	LandSat 4,5 y 7	LandSat8	
4,3,2	1,4,3	-	3,2,1	4,3,2	Color Natural/ Es una composición que se aproxima al color real de las coberturas.
8A,4,3	2,1,4	3,2,1	4,3,2	5,4,3	Infrarrojo Color/. Es útil para estudios de vegetación, patrones de suelos, crecimiento de cultivos y monitoreo de drenajes
8A,11,4	2,6,1	3,4,2	4,5,3	5,6,4	Combinación útil para diferenciar tierra/agua y para destacar áreas de bosque.
11,8A,4	6,2,1	4,3,2	5,4,3	6,5,4	Análisis de vegetación.
12,8A,3	7,2,4	7,3,1	7,4,2	7,5,3	Natural con remoción atmosférica.
12,8A,4	7,2,1	7,3,2	7,4,3	7,5,4	Combinación de infrarrojos.
12,11,4	7,6,1	7,4,2	7,5,3	7,6,4	Permite destacar formaciones rocosas y áreas urbanas.
12,11,8A	7,6,2	7,4,3	7,5,4	7,6,5	Penetración Atmosférica/ no incorpora bandas del espectro visible, reduce las influencias atmosféricas
12,4,2	7,1,3	-	7,3,1	7,4,2	Geología/ Permite destacar elementos geológicos.
11,8A	6,2,3	-	5,4,1	6,5,2	Agricultura.
8A,11,2	2,6,3	-	4,5,1	5,6,2	Combinación útil para distinguir vegetación saludable.

## PREPROCESAMIENTO DE IMÁGENES

El primer paso del análisis multitemporal fue realizar la calibración radiométrica entre las imágenes que intervienen en el proceso. Este procedimiento resultó necesario, para asegurar que los valores de todas las imágenes a comparar sean equiparables, ya que los originales son dependientes del sensor y la fecha de adquisición (Chuvieco 2010). Se realizaron además correcciones radiométricas mediante el uso de los coeficientes de corrección (Verbesselt et al. 2010). Luego de la conversión a radiancia, cada imagen fue convertida a reflectancia superficial y luego se realizó la corrección atmosférica. Para reducir los efectos de la influencia atmosférica en el proceso de calibración (figura 4) se utilizó la información de la propia imagen (archivo MTL).



Figura 4. Selección del archivo MTL de imágenes satelitales por bandas (Paneque 2023)

## CÁLCULO DE LA CORRECCIÓN POR EL MÉTODO DOS1

Se aplicó el Dark Object Substrction o substracción de objeto oscuro es una familia de correcciones atmosféricas basadas en imagen (figura 5). Chávez (1996), explica que “la suposición básica es que en la imagen algunos píxeles están completamente en sombra, y sus radiancias recibidas en el satélite

se deben a la dispersión atmosférica (efecto bruma). Esta suposición es combinada con el hecho de que muy pocos elementos en la superficie de la Tierra tienen un color negro absoluto, por lo tanto, una reflectancia asumida de uno por ciento es mejor que un cero por ciento". Es importante mencionar que la exactitud de las técnicas basadas en imagen es generalmente menor que las correcciones basadas en medidas físicas, pero son muy útiles cuando no están disponibles mediciones atmosféricas que puedan mejorar la estimación de la reflectancia de la superficie terrestre. El efecto bruma es dado por (Sobрино 2019).

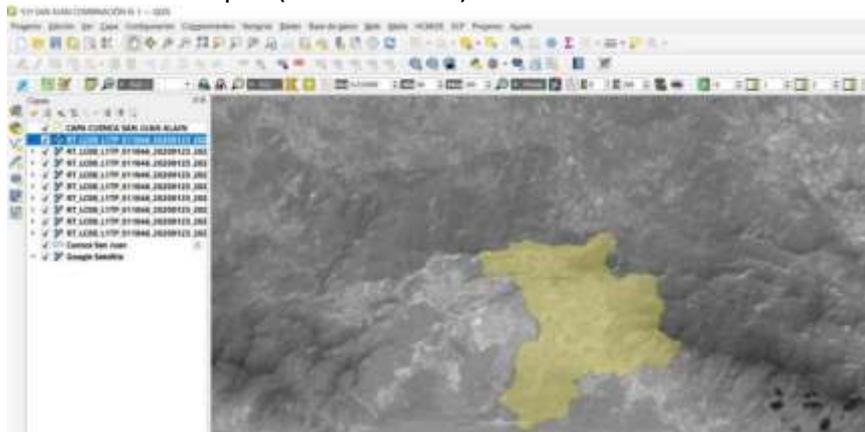


Figura 5. Resultado de la corrección atmosférica para imágenes del 2015 y 2023, DOS, QGIS (Paneque 2023)

## 04 CLASIFICACIÓN DE LAS COBERTURAS FORESTALES DENTRO DE LA CUENCA SAN JUAN

El procedimiento se realizó mediante el método de clasificación supervisada, utilizando el clasificador de máxima verosimilitud, el cual es uno de los algoritmos más comúnmente utilizados en percepción remota y considerado uno de los procedimientos de discriminación más eficientes (Hernández 2020).

Chuvienco, (2010) refiere que, en los estudios donde se utiliza este método cuando se conoce a profundidad el área objeto de estudio, se puede reducir el número de categorías para una mejor comprensión. Las coberturas forestales o boscosas fueron catalogadas conforme a cuatro categorías principales: área boscosa nativa, otra vegetación, cuerpos de agua y zona antrópica (figura 6). Para el análisis se elaboró, primeramente, una tabla de evolución y tasa de cambio anual de la superficie para cada categoría de cobertura y luego una tabla con la matriz de transición ocurrida, la cual es el resultado de cruzar dos mapas de diferentes fechas a través de la superposición de líneas vectoriales (Congedo 2021).

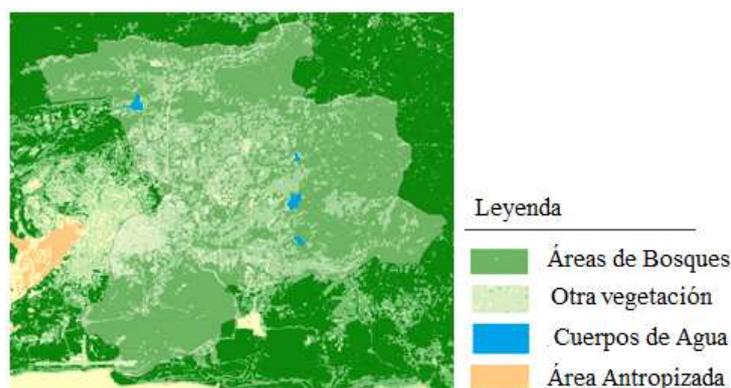


Figura 6. Clasificación de la cobertura boscosa en el área de estudio (Paneque 2023)

## SELECCIÓN DE LOS DATOS

Se utilizó el plugin de la Clasificación Semi-Automática (SCP, por sus siglas en inglés), ubicado en el entorno de QGIS. Se contrastó la cartografía temática propuesta por el MAE del 2016, con fines de exploración visual, tanto para la imagen del 2015 como para el 2023, se manejó la combinación de bandas espectrales (6,5 y 4), esta combinación se denomina como análisis de la vegetación (AV) dentro de la cuenca hidrográfica San Juan.

De acuerdo con Herold (2011), una composición de bandas es una imagen compuesta por la combinación de (3) bandas diferentes de un sensor, dispuestas cada una en los 3 canales de proyección en pantalla: Rojo (R), Verde (G) y Azul (B). La escena en resulta una imagen a color, las bandas de las imágenes satelitales Landsat, Sentinel, Aster y Modis pueden ser combinadas en composiciones de color. En QGIS mediante el complemento SCP podemos generar composiciones de color virtuales a partir de juegos de bandas o band sets. La composición falso color o infrarrojo color utiliza las bandas del espectro infrarrojo para realzar la vegetación y otras coberturas con una apariencia roja brillante (Herold 2011).

## CAMBIOS OBSERVADOS EN LA COBERTURA FORESTAL DE LA CUENCA DEL RIO SAN JUAN EN EL PERIODO 2015 AL 2023

En la figura 7 se representa la combinación de bandas espectrales (6,5 y 4) obtenidas en el QGIS. Al aplicar el módulo de clasificación presentado anteriormente, se obtuvieron los mapas correspondientes con la cobertura boscosa del área de manejo en los años 2015 y 2023. Se determinaron además las áreas para la clase cobertura boscosa nativa y la diferencia entre ellas de cada año, para poder evaluar el cambio del índice de boscosidad en el periodo (ver figura 8).

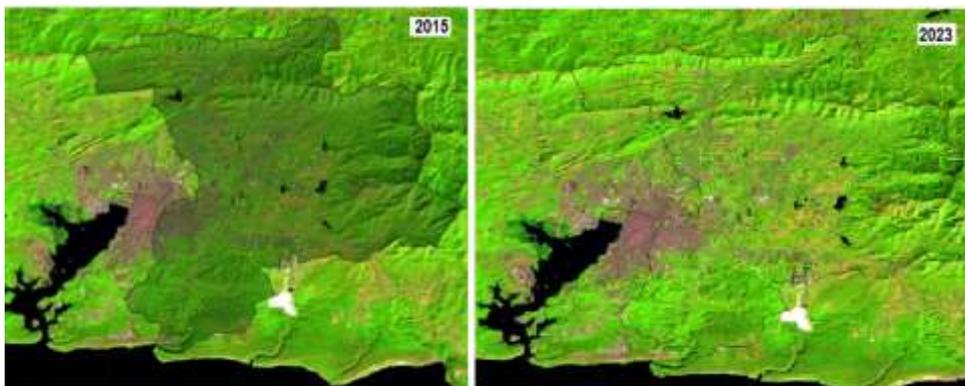


Figura 7. Combinación de bandas espectrales 6, 5 y 4 QGIS, (Paneque 2023)

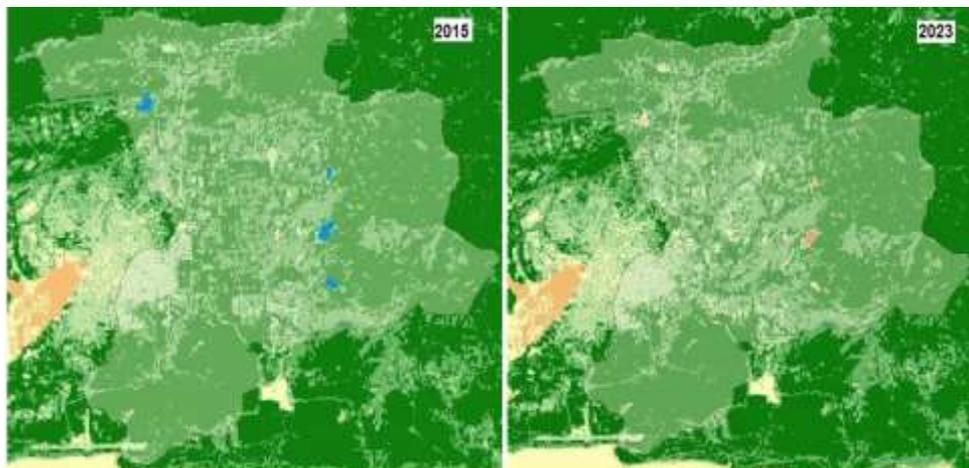


Figura 8. Cobertura boscosa año 2015 y 2023.

Además, se determinó la calidad de la cobertura boscosa para el año 2023 con el análisis de las imágenes satelitales Landsat 8, obtenidas, en la combinación de bandas (5, 4,3)- Infrarrojo color: (Chuvienco 2017). La vegetación saludable tiende a dar un rojo brillante, la mayor parte de la cuenca San Juan presenta vegetación boscosa nativa saludable (figura 9).



Figura 9. Resultado de combinación Bandas 5, 4,3)- Infrarrojo color (Paneque 2023)

## ANÁLISIS DE LA COBERTURA BOSCOSA Y CÁLCULO DEL ÍNDICE DE BOSCOCIDAD EN LA CUENCA SAN JUAN.

Para el cálculo actualizado del índice de boscosidad (ver tabla 3), se procedió a determinar el área o superficie geográfica real de la cuenca objeto de estudio y el área cubierta de superficie boscosa medidas en hectáreas. Este procedimiento matemático se realizó con las herramientas de ajuste y programación del QGIS versión 3.24 Tisler.

Según la visita técnica realizada y el diagnóstico en la cuenca hidrográfica San Juan, se estima que la disminución del índice de boscosidad y del área de cobertura boscosa nativa en la zona objeto de estudio está basada en una fuerte presión antrópica motivada por el crecimiento de asentamientos espontáneos en la parte media y baja de la cuenca además de otras actividades forestales que inciden directamente.

Tabla 3. Cálculo del Índice de boscosidad de la cuenca San Juan periodo (2015-2023)

Superficie Cuenca San Juan	Año 2015	Año 2023	Diferencia
Superficie Cubierta (ha)	2499	2317,4	-182
Superficie Geográfica (ha)	13800,0	13800,0	-
Índice de Boscosidad (%)	<b>18,10</b>	<b>16,78</b>	<b>-1,32</b>

Los resultados derivados del procesamiento de las imágenes satelitales para los años 2015 y 2023 en los cambios de la cobertura boscosa de la cuenca hidrográfica San Juan, demuestran que la parte baja de la cuenca presenta una mayor pérdida de la superficie boscosa. Sin embargo, la parte media orientada al este y es alta al noreste están mayormente forestada y con gran superficie arbórea. Lo anterior es beneficioso en una cuenca, ya que es en esta zona donde se genera la mayor parte del agua por ser el nacimiento de ríos y arroyos que alimentan el lecho acuífero. Este resultado coincide con el plan de acción preliminar para la protección del área de estudio formulado por (Durant 2021).

Se demuestra además que hay un cambio en la cobertura forestal significativo entre los años 2015 y 2023, (ver figura 8) donde la cubierta boscosa en el primer año fue de 2499 ha y para el inicio del año 2023 disminuyó a 2317.4 ha, con una pérdida en la categoría de 182 ha de bosques nativos que desaparecieron en el periodo, esta pérdida de cobertura se corrobora con el aumento de la población y su consiguiente grado de urbanización, actualmente el área urbanizada asciende a 4 145,35 ha, lo

que representa el 30% de la cuenca, ello se corresponde con la parte oeste de cuenca, este valor coincide con los informes anuales del ministerio de la agricultura en la provincia (Durant 2021).

El índice de boscosidad calculado para el año 2015 fue 18.10%, ya para el año 2023 el estudio arrojó un índice calculado de 16.78%, con una disminución de 1.32%. La calidad de la vegetación boscosa en la cuenca es favorable (ver figura 9). Coincidiendo con Borges et al. (2021) quien reportó resultados similares para esta zona en un estudio de riesgo jurídico en la tutela del potencial forestal.

Las alternativas de cambios visibles muestran que, en términos de persistencia de la categoría bosques, las formaciones concentradas en la parte media y alta de la cuenca orientadas al este son las más distintivas; lo cual resulta lógico al ser las más extensas dentro de esta área de manejo. De conjunto representan alrededor del 81 % de la masa boscosa que se mantuvo invariable; la formación de cobertura forestal presente en la parte baja de la cuenca disminuyó con respecto al año 2015, por lo que la incidencia del factor antrópico y/o fenómenos climáticos parecen haber tenido repercusión en esta zona.

Según informes de Durant (2021), existen seis tipos de suelos en la zona de estudio, con predominio de los pardos sin carbonatos (38,1 km<sup>2</sup>) y los esqueléticos, ambos distribuidos sobre la superficie de la cuenca media y alta, para estos valores la erosión es poca lo que concuerda con la investigación siendo la misma zona donde se detectaron pequeños cambios en la cobertura forestal.

Los cambios asociados a la dinámica de la cobertura vegetal en los años comprendidos entre 2015 y 2023 evidencian un incremento de la categoría bosques en la zona alta de la cuenca y una disminución considerable en la parte baja y el sector sur de la cuenca media. Lo que plantea nuevos desafíos para la gestión integrada de la misma.

## 05 CONCLUSIONES

Se realizó el análisis multitemporal y clasificación supervisada de imágenes satelitales Landsat 8, bandas 6-5-4 del sensor OLI-TRS, procesadas en el software profesional QGIS v-3.24.

Se evidencia que la calidad de la vegetación presente en la cobertura forestal en la parte media y alta de la cuenca objeto de estudio es buena para el periodo evaluado.

Los resultados obtenidos en el estudio determinan pérdidas en la cobertura boscosa de la cuenca San Juan en el orden de 182 ha entre los años 2015 y 2023.

El índice de boscosidad calculado para el año 2015 fue 18.10%, ya para el año 2023 el estudio arrojó un índice calculado de 16.78%, con una disminución de 1.32% por lo que la incidencia del factor antrópico y/o fenómenos climáticos parecen haber tenido repercusión en estos resultados.

## RECONOCIMIENTO

A los autores les complace reconocer el apoyo logístico ofrecido por el Proyecto de Investigación PN211LH012-018, "Monitoreo y Manejo Integrado de Ecosistemas Costeros ante el Cambio Climático en la Región Oriental de Cuba", coordinado por Universidad de Oriente en Santiago de Cuba y a la Dirección Provincial de Recursos Hidráulicos de la provincia de Santiago de Cuba.

## 06 REFERENCIAS

**Alarcón R.** (2019). Paradigmas jurídicos sobre gestión integrada de cuencas hidrográficas: desafíos a partir del caso del río san juan, Santiago de Cuba; Revista Voluntad Hidráulica. 2019, 129, 14-23. ISSN: 0505-9461.

- Chávez P.** (1996). Image-Based Atmospheric Corrections-Revisited and Improved. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* [en línea], vol. 62, no. 9, pp. 1025-1036. Disponible en: <https://www.semanticscholar.org/paper/ImageBased-Atmospheric-Corrections-Revisited-and-Chavez/45f12625ce130261c7d360d50e09c635355ca919>.
- Chuvioco J.** (2010). Teledetección ambiental: La observación de la tierra desde el espacio [en línea]. S.l.: Editorial Ariel. ISBN: 978- 4-344-3498-1. Available online: <https://www.casadellibro.com/librofundamentos-de-teledeteccion-espacial-3aa-edi>.
- CITMA** (2020). Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. Ministerio de Ciencia, Enfrentamiento al Cambio Climático en la República de Cuba Tarea Vida. La Habana
- Congedo L.** (2021). Semi-Automatic Classification Plugin Documentation Release 4.8.0.1. Available online: <https://bit.ly/3oUvIBh>. Doi: 10.3390/f10050457.
- Durán M. T.** (2021). La gestión de las cuencas hidrográficas en la región Sur Oriental de Cuba. INRH, Aprovechamiento Hidráulico. *Revista Ingeniería y Sociedad*, 13 (3), pp 211-221. ISSN: 2218-3620.
- FAO** (2006). FAOSTAT Database Results. Food Agricultural Organization, Disponible en: <hp://faostat.fao.org>. [Consulta: agosto 2021].
- Hall R. J., Skakun R. S., Arsenault E. J. and Case B. S.** (2006). Modeling forest stand structure attributes using Landsat ETM+ data: Application to mapping of aboveground biomass and stand volume. *Forest Ecology Management* 225: 378-390. Doi: 10.1016/j.foreco.2006.01.014.
- López P. M., Cárdenas D., Corral-Rivas J. J., Jiménez E., López Sánchez C. A. and Vega-Nieva D. J.** (2020). Modeling of aboveground biomass with Landsat 8 OLI and machine learning in temperate forests. *Forests* 11(1): 11. Doi:10.3390/f11010011.
- Milanés C.** (2011). Contribución al desarrollo sostenible de los municipios costeros en la provincia de Santiago de Cuba: de la caracterización al diagnóstico territorial. Monografía de excelencia. Universidad de Oriente, ISBN: 978-959-207-441-5, 110p.
- ONEI** (2022). Anuario Estadístico de Cuba. La Habana. Available online: <https://bit.ly/3B3tapb> (accessed on 14 noviembre 2022)
- Sobрино J., Llorens R., Fernández C., Fernández A. and Vega J.** (2019). Relationship between soil burn severity in forest fires measured in situ and through spectral indices of remote detection. *Forests* 10(5): 457. Doi:10.21829/myb.2020.2611884

### CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

### CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

**Alain Paneque Martínez**

<https://orcid.org/0000-0002-5320-8265>

Realizó contribuciones al diseño de la investigación, procesamiento de datos, la redacción y revisión del informe final.

**Ofelia Pérez Montero**

<http://orcid.org/0000-0002-3423-9744>

Realizó contribuciones a la conceptualización, diseño de la investigación, procesamiento de datos, la redacción y revisión del informe final.

**Celene Milanés Batista**

<http://orcid.org/0000-0003-2560-8859>

Realizó contribuciones en la investigación, procesamiento de datos y revisión del informe final.

**José Fernando Álvarez Vega**

<https://orcid.org/0000-0002-5762-8777>

Realizó contribuciones en la investigación, asesoría técnica, revisión de resultados computacionales y del informe final.

# Impactos potenciales de la producción de gas no convencional sobre la disponibilidad y la calidad del agua en Cuba

**José Antonio Díaz Duque**

E-MAIL: [jadduque@gmail.com](mailto:jadduque@gmail.com)

Departamento de Geociencias. Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría" (Cujae). La Habana, Cuba

**Linney Martínez Pérez**

E-MAIL: [linneym810@gmail.com](mailto:linneym810@gmail.com)

Empresa Geominera del Centro

**Orelvis Delgado López**

E-MAIL: [orelvis@ceinpet.cupet.cu](mailto:orelvis@ceinpet.cupet.cu)

Centro de Investigaciones del Petróleo (CEINPET)

## RESUMEN

En el trabajo se pone de relieve la necesidad de realizar una evaluación ambiental estratégica para la implementación de un potencial programa de fracturación hidráulica en Cuba, con énfasis en los recursos hídricos, por cuanto sus requerimientos y el riesgo de contaminación son altos. Para ello se identificaron las posibles afectaciones que se producirían a los recursos hídricos en cada una de las actividades operacionales de la tecnología para la obtención de gas no convencional, así como se identificaron los aspectos a evaluar en ellas. Por la naturaleza cualitativa de la investigación se realizó un profundo estudio de la experiencia internacional y se evaluaron las informaciones existentes sobre las áreas más probables a explotar en el territorio nacional, así como su cercanía a las principales cuencas hidrográficas de interés nacional.

**PALABRAS CLAVES:**

agua, Cuba, fraccionamiento hidráulico, gas no convencional, impacto ambiental.

Potential impacts of unconventional gas production about the readiness and the quality of the water in Cuba

## ABSTRACT

In the paper it puts on of relief the necessity to carry out an environmental strategic evaluation for the implementation of a potential program of hydraulic fracturing in Cuba, with emphasis in the water resources, since their requirements and the risk of contamination are high. For they were identified it the possible affectations that would take place to the water resources in each one of the operational activities of the technology for the obtaining of unconventional gas, as well as the aspects were identified to evaluate in them. For the qualitative nature of the investigation that was carried out a deep study of the international experience and the existent information were evaluated on the most probable areas to explode in the national territory, as well as their proximity to the main hydrographical basins of national interest.

**KEYWORDS:**

water, Cuba, hydraulic fracturing, unconventional gas, environmental impact.

## 01 INTRODUCCIÓN

Desde finales del pasado siglo XX se ha venido desarrollando la extracción del gas no convencional (GNC)<sup>1</sup> mediante el empleo de la tecnología de fracturación hidráulica (*hydraulic fracturing o fracking*), primero en los Estados Unidos de América y más tarde en otros países de Asia, Europa y América Latina, cobrando cada vez mayor interés por parte de las grandes compañías petroleras del mundo, al constituir una nueva fuente de recursos energéticos a precios competitivos.

La fracturación hidráulica consiste en la inyección en los estratos de rocas de un fluido a presión, compuesto por un 99% de agua y arena y alrededor de un 1% de aditivos químicos, con el objetivo de incrementar las fisuras y los poros ya existentes en las rocas, para liberar el gas natural atrapado en ellos, gracias al aumento de la permeabilidad.

De acuerdo con Marrero (2013), en el período 2002-2007 se realizaron en Cuba varios proyectos de investigación con el propósito de localizar escenarios favorables para la búsqueda de gas natural. Estos trabajos se focalizaron en la zona de los pozos profundos ubicados al noroeste de Pinar del Río, atendiendo a las características de los reservorios estudiados con anterioridad. Desde el año 2011 habían comenzado los estudios de exploración de GNC en la Franja Norte de Crudos Pesados (FNCP), siendo localizadas varias áreas perspectivas en el sector Martín Mesa, en rocas pertenecientes a la Unidad Tectonoestratigráfica (UTE) Sierra del Rosario, al Arco Volcánico Cretácico, las ofiolitas y los sedimentos postorogénicos que recubren el área en las zonas hundidas (Domínguez *et al.* 2017).

Para el país resulta de vital importancia localizar nuevas fuentes de gas natural con vistas a garantizar la generación eléctrica con alta eficiencia y baja contaminación atmosférica, así como para el suministro de gas a la población destinado a la cocción de los alimentos.

Los documentos rectores de la política económica y social de la nación para los próximos años, aprobados en el VIII Congreso del Partido Comunista de Cuba (PCC 2021), subrayan la importancia de elevar la producción de gas natural, acelerando los estudios geológicos dirigidos a localizar nuevos depósitos. Al mismo tiempo ratifican la atención prioritaria al impacto ambiental asociado a la industria del petróleo, mediante el fortalecimiento de los sistemas de evaluación y control.

En correspondencia con lo anterior, y considerando el contexto internacional, no se descarta que en Cuba se inicien, en un futuro próximo, determinados trabajos para la extracción de gas natural mediante las técnicas no convencionales de fracturación hidráulica, particularmente en las áreas perspectivas identificadas (figura 1), cercanas a las manifestaciones de gas natural, en zonas catalogadas como reservorios “malos” por sus características de baja porosidad y permeabilidad.

Ante la inminencia de los trabajos de extracción de gas no convencional en Cuba, se proyectó y ejecutó un trabajo de diploma para la obtención del título de Ingeniero Geofísico en el Departamento de Geociencias de la Universidad Tecnológica de La Habana (Martínez 2015) y se presentó una ponencia en el VI Congreso de Petróleo y Gas (Martínez *et al.* 2017) en los cuales se caracterizaron los impactos ambientales de las tecnologías de producción de gas no convencional en la República de Cuba, basándose en los daños provocados por la fracturación hidráulica a nivel mundial. En estos trabajos se destacan las negativas circunstancias relativas al deterioro de los recursos hídricos del país como consecuencia de la extracción y producción de gas no convencional, considerando la reducida disponibilidad de agua dulce en el archipiélago cubano.

---

<sup>1</sup> El término gas no convencional no responde a un nuevo tipo de gas natural, sino al empleo de una tecnología no convencional para extraer el gas natural retenido en reservorios de mala calidad, con baja porosidad y permeabilidad.

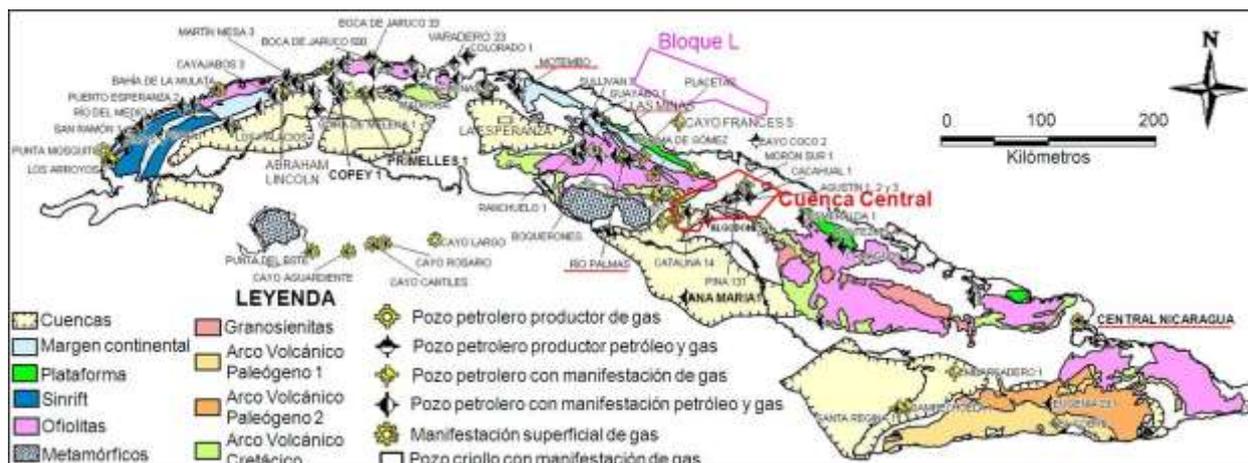


Figura 1. Áreas perspectivas para la búsqueda de gas no convencional en Cuba (Delgado et al. 2012)

Dando continuidad a estas investigaciones, en el presente artículo se aborda y profundiza esta temática con el objetivo de precisar con mayor alcance el agudo impacto que tendría para el país la introducción de la tecnología de la fracturación hidráulica, particularmente en el suministro de agua a la población y para la producción de alimentos, ambos aspectos con fuerte incidencia en la seguridad nacional. Se propone además un conjunto de aspectos a considerar por las autoridades regulatorias para valorar el impacto de la fracturación hidráulica sobre los recursos hídricos de Cuba y se precisan las áreas más favorables desde el punto de vista de la disponibilidad de los recursos hídricos, así como los factores de riesgos en ellas presentes.

## 02 DESARROLLO

### LA FRACTURACIÓN HIDRÁULICA A NIVEL MUNDIAL

Las primeras investigaciones realizadas en materia de extracción de gas no convencional tuvieron lugar en Estados Unidos de América desde finales del pasado siglo XX. Entre 1980 y 1990, la compañía Mitchell Energy and Development llevó a escala comercial la extracción del mal denominado gas de esquisto<sup>2</sup> en la cuenca de Barnett Shale, en Texas. Para el año 2005, con la participación de otras compañías ya se estaba produciendo solo en esta misma cuenca más de 152 billones de metros cúbicos (medio trillón de pies cúbicos) por año de gas, con lo cual se evidenciaba que el GNC constituía una verdadera alternativa rentable para la producción de gas natural como fuente energética (Rudnick *et al.* 2011).

El desarrollo de las tecnologías de perforación, en particular la perforación horizontal, posibilitó, de conjunto con la inyección de agua a presión acompañada de arena y determinados aditivos químicos, crear y expandir fisuras a lo largo de los estratos rocosos, aumentando con ello su permeabilidad, de manera que el gas natural atrapado en sus poros e intersticios, fluyera libremente. Formaciones geológicas, compuestas principalmente por lutitas, esquistos, pizarras y otras rocas, consideradas hasta ese momento como malos reservorios, se convirtieron súbitamente en prospectos favorables para la producción de gas natural. Como resultado de la innovación

<sup>2</sup> El término gas de esquisto es en realidad una traducción incorrecta al español de la palabra en inglés *shale*. En términos geológicos su equivalente preciso es lutita. El concepto de *shale gas* se refiere al gas generado y no expulsado por una roca madre, es decir, el gas en lutita (*shale gas*) es el gas residual que quedó en la zona de ventana de generación de gas.

tecnológica, nació de esta manera la tecnología de la fracturación hidráulica (*fracking*) y con ella la denominación de gas no convencional (GNC).

Paulatinamente la producción de GNC fue creciendo a partir de la incorporación de esta tecnología por las medianas e incluso pequeñas compañías petroleras, lo que conllevó a una disminución sustancial de los precios del gas natural, permitiéndoles así asumir los costos de las medidas ambientales requeridas por las autoridades para su extracción sin afectar sus utilidades. Ello ha despertado el interés de numerosos países que históricamente han sido típicos importadores de gas natural, principalmente en Europa, y que aprecian una oportunidad para reducir su dependencia energética. De igual forma, otro grupo de países puede ver multiplicadas sus reservas de gas natural e incrementar su producción e incluso potenciar sus exportaciones, esencialmente en Norte y Suramérica. En la actualidad existen grandes volúmenes recuperables de GNC en países de Latinoamérica, particularmente México, Argentina, Colombia, Brasil, Chile y Bolivia, cuyos gobiernos han abierto las puertas al *fracking* mediante reformas energéticas, normas regulatorias, licitaciones o acuerdos de cooperación.

Los recursos de gas natural son geográfica y geológicamente diversos. Tecnologías, como la perforación horizontal y la fracturación hidráulica, han revelado vastos recursos no convencionales, que han modificado drásticamente el panorama de suministro de gas natural en la década anterior, particularmente para Norteamérica. El gas no convencional continuará desempeñando un papel significativo, contribuyendo en más de la mitad del crecimiento en el suministro de gas natural hacia 2040 (ExxonMobil 2018). Esta situación desvía a la comunidad internacional del urgente objetivo estratégico de disminuir la emisión de los gases de efecto invernadero, a la vez que posterga las inversiones en el desarrollo de las energías renovables.

Simultáneamente con la introducción de las tecnologías para la extracción del GNC comenzaron los desvelos ambientales debido a sus significativos impactos sobre el medio, destacándose entre ellos la afectación a los recursos hídricos y la contaminación atmosférica (Martínez 2015). Los órganos regulatorios ambientales de diversos países, incluso algunos parlamentos, se han pronunciado desde entonces mediante la promulgación e implementación de disposiciones precautorias o restrictivas con vistas a resguardar el medio ambiente. Numerosas organizaciones ecologistas se han opuesto a la fracturación hidráulica y han exigido a los gobiernos transparencia en las informaciones, así como la participación y consulta previa de los ciudadanos y las comunidades antes del inicio de las operaciones.

## LA EXTRACCIÓN DE GAS NO CONVENCIONAL Y EL AGUA

Una de las preocupaciones ambientales más significativas vinculadas al aprovechamiento del GNC ha sido la afectación a los recursos hídricos. En primer lugar por el uso intensivo del agua en cada uno de los pozos de extracción y en segundo lugar por la contaminación del manto freático y los acuíferos cercanos a la zona de explotación.

La propia naturaleza de la tecnología empleada para la extracción del GNC, basada en la fracturación hidráulica, es decir, el empleo de grandes volúmenes de agua que se inyectan a alta presión (de 350 a 690 atmósferas) hacia los estratos rocosos en la profundidad, acompañados con otros componentes que facilitan el incremento y la estabilidad de la permeabilidad, la convierten en una actividad intensamente agresiva con la disponibilidad de los recursos hídricos de la región que es objeto de la explotación. Los estudios realizados en Estados Unidos de América por la Agencia de Protección Ambiental (EPA 2012) señalan que entre 10 y 30 mil m<sup>3</sup> de agua son empleados en cada uno de los pozos para la extracción del gas, en dependencia del tipo de formación geológica, la

profundidad y el desplazamiento horizontal del pozo, las propiedades del fluido de fracturación y el diseño de la fractura. Este volumen generalmente se desvía del suministro de agua a la población o del abasto para la producción de alimentos, lo cual podría ocasionar problemas con la sostenibilidad de los recursos hídricos disponibles y acentuar la vulnerabilidad alimentaria en ciertas regiones o incluso países.

El otro aspecto de sensibilidad ambiental en materia de los recursos hídricos y el GNC radica en la contaminación de los cuerpos superficiales de agua, el manto freático e incluso los acuíferos que se encuentran en la zona de influencia de los pozos de extracción y las plataformas de explotación en general. El agua que se inyecta a elevada presión en los estratos de lutitas tiene el objetivo de incrementar la permeabilidad en la formación rocosa y en consecuencia facilitar el flujo de gas hacia el pozo, por lo que se acompaña de cientos de sustancias químicas, así como de un agente sostén o apuntalante (proppant), generalmente arena y en menor medida cerámica o bauxita, con vistas a mantener abiertas las nuevas fisuras o fracturas producidas por el fraccionamiento hidráulico. La mayoría de estas fracturas tienen una longitud de hasta 100 m, sin embargo, se han reportado fracturas que han alcanzado los 600 m de extensión vertical. La proporción de los tres componentes que integran el fluido para el fraccionamiento es: agua – 90%, arena – 8-9% y aditivos químicos – 1-2%.

Los aditivos químicos comúnmente empleados en el fraccionamiento hidráulico son: metanol, isopropanol, sílice cristalina, etilenglicol monobutil éter, etilenglicol, destilados de petróleo ligeros hidrotratados e hidróxido de sodio. Las funciones que desempeñan en el fluido son como surfactante, apuntalante, anticorrosivo, inhibidor de precipitaciones, reductor de fricción y ajustador de pH. Entre los componentes de los aditivos químicos se encuentran benzenos, xilenos o cianuros, hasta llegar a unas 500 sustancias químicas, varias de ellas cancerígenas, mutagénicas, alergénicas y con otras propiedades altamente preocupantes. El tipo de aditivo y su composición se elige en correspondencia con el contexto geológico del emplazamiento y la tecnología a emplear. Muchas compañías rehúsan declarar la relación de las sustancias que integran su aditivo químico, aludiendo que se trata de un secreto comercial.

Una parte del fluido que se inyecta a la fractura, de un 15% a un 80%, vuelve a la superficie como agua o flujo de retorno, y el resto se queda bajo tierra, conteniendo aditivos de la fractura y sus productos de transformación. Entre las sustancias disueltas a partir de la formación rocosa, donde está el gas durante el proceso de fractura, se encuentran metales pesados, hidrocarburos, sales y elementos naturales radiactivos además del agua de formación, todo lo cual regresa a la superficie junto al agua inyectada de retorno. La manipulación y disposición de estas aguas residuales puede ocasionar la contaminación de los acuíferos y los cuerpos superficiales de agua por la presencia de sustancias peligrosas y su elevada salinidad. En la actualidad no existe un tratamiento totalmente efectivo para las aguas de retorno del fraccionamiento hidráulico, dejándolas inutilizables para otros usos y colocándolas fuera del ciclo hidrológico.

## EL AGUA EN CUBA Y EL FRACCIONAMIENTO HIDRÁULICO

Los recursos hídricos disponibles en Cuba son limitados y están heterogéneamente distribuidos. La media nacional de 1 220 m<sup>3</sup> de agua por persona al año sitúa al país en un nivel de estrés hídrico moderado. Diversos son los problemas relacionados con la gestión sostenible del agua en Cuba: el bajo volumen de agua disponible por habitante al año, el bajo índice de reposición anual de los recursos hídricos con el 13,7%, la baja eficiencia en el uso del agua y las pérdidas en las redes de distribución y consumo, entre otros. En consecuencia, el agua constituye para Cuba el principal desafío ambiental para garantizar su sostenibilidad en el desarrollo, así como su seguridad nacional,

en particular en las dimensiones ambiental y alimentaria. El cambio climático agudiza este reto. Por otra parte, el predominio de las rocas calizas y de sus manifestaciones cársticas en Cuba eleva el riesgo potencial por contaminación de las aguas subterráneas (Díaz-Duque 2018).

La acción humana sobre los recursos hídricos del país ha tenido y tiene una enorme incidencia sobre su vulnerabilidad actual y futura, introduciendo determinada incertidumbre acerca de la calidad y disponibilidad del agua tanto en el presente como para los años venideros, especialmente por los impactos del cambio climático. Las principales manifestaciones de esta acción de origen antrópico son la contaminación, el despilfarro, el uso irracional, el incremento de la demanda para todos los usos, principalmente el agropecuario, el turístico y más recientemente el de los servicios gastronómicos y comerciales del sector privado.

Todo lo anterior crea un escenario muy desfavorable para la introducción en el país del fraccionamiento hidráulico con vistas a la extracción del gas no convencional: baja disponibilidad de agua, amplia presencia de los procesos cársticos en casi todo el país, distribución espacial no uniforme de los recursos hídricos, desarrollo de los procesos de intrusión marina en los acuíferos costeros, creciente demanda del empleo del agua por la agricultura, la industria y el turismo, baja eficiencia en el uso del agua en los procesos productivos, tendencia al incremento de la contaminación de origen orgánico en los cuerpos de agua.

Los impactos potenciales a los recursos hídricos del país por la implementación de la fracturación hidráulica con vistas a la extracción del GNC se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 1. Afectaciones a los recursos hídricos de Cuba a causa de la potencial aplicación de la extracción de gas no convencional (GNC)

Actividad operacional	Impacto potencial a las aguas
Extracción de agua para el fraccionamiento hidráulico.	Elevado consumo de agua por cada pozo que se realiza con su correspondiente impacto en la demanda social y productiva; descenso del nivel freático; disminución del caudal en manantiales, ríos y arroyos.
Empleo de aditivos químicos en la perforación.	Contaminación de las aguas subterráneas por la incorporación de sustancias químicas a la formación rocosa e incluso la contaminación de las aguas superficiales debido a fugas o derrames en el manejo de esas sustancias.
Inyección del fluido de fracturación.	Contaminación de los acuíferos por el desplazamiento del fluido por las fracturas; liberación no controlada del agua de formación.
Recuperación del flujo de retorno.	Contaminación de cuerpos superficiales de agua por los aditivos químicos y por la incorporación de sustancias disueltas a partir de la formación rocosa.
Extracción del GNC.	Contaminación del agua por benceno y metano.
Tratamiento y disposición final del agua residual	Contaminación por tratamientos insuficientes e inadecuada disposición final.

## CONTRAPUNTEO ENTRE ECONOMÍA Y NATURALEZA

No existe duda alguna que la extracción del GNC en Cuba producirá importantes beneficios económicos e incluso sociales. La economía cubana es muy dependiente de la importación de portadores energéticos, que muestran una tendencia al alza de los precios y que provienen de mercados con cierta incertidumbre e inestabilidad. De tal manera, asegurar un importante volumen de extracción de GNC garantizaría un necesario y positivo impacto económico directo, traducido en la elevación del Producto Interno Bruto (PIB), la generación de nuevos empleos, el incremento del flujo de recursos económicos y el saneamiento de la balanza comercial del país. Por otra parte, se crearían condiciones satisfactorias en otros procesos productivos encadenados con la actividad

petrolera, y en consecuencia se induciría una elevación del consumo por parte de la población, a partir de la nueva riqueza creada.

En la dimensión ambiental se registraría un probable resultado positivo por la reducción de las emisiones de los gases de efecto invernadero (GEI) producto de la sustitución de una parte importante del crudo que se emplea en la generación eléctrica por su equivalente en gas natural, aunque habría que valorar la reducción neta de las emisiones de los GEI calculando además el volumen de fuga de gas metano a la atmósfera por las ineficiencias propias de la extracción del GNC, pues algunos estudios señalan que puede alcanzar hasta el 30% del volumen total extraído. A ello hay que agregar las emisiones por la elevada cantidad de camiones a emplear durante la fracturación hidráulica dado el volumen de agua, apuntalantes y aditivos químicos que requieren del empleo de más de 250 vehículos especializados de carga.

La delicada situación actual de los recursos hídricos del país, la que continuará agudizándose como consecuencia de los impactos del cambio climático, constituye el principal obstáculo para la implementación de la extracción de GNC en Cuba. El correcto abordaje de esta realidad objetiva y la evaluación oportuna y rigurosa de todos los riesgos generados y asociados a la tecnología de la fracturación hidráulica, permitirá adoptar decisiones responsables y certeras con un enfoque de sostenibilidad. Es pertinente considerar, en estas circunstancias, la aplicación del principio precautorio y posponer en el tiempo la extracción de este recurso energético no convencional hasta que los conocimientos científicos del momento encuentren tecnologías más adecuadas ambientalmente, con un consumo mínimo de agua y con muy baja probabilidad de contaminación de los acuíferos y las aguas superficiales.

En cualquier circunstancia, las autoridades regulatorias nacionales deberán profundizar, con respecto a la evaluación del impacto de la fracturación hidráulica para la extracción del GNC en los recursos hídricos, en los aspectos que se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Aspectos a considerar para valorar el impacto de la fracturación hidráulica sobre los recursos hídricos de Cuba

ACTIVIDADES OPERACIONALES	ASPECTOS A EVALUAR
Extracción y suministro de agua	Volumen y características del agua a emplear. Disponibilidad de agua en el área de trabajo. Potenciales fuentes de agua para el suministro. Afectaciones sociales, ambientales y económicas que produce.
Empleo de los aditivos químicos	Composición y porcentaje de los aditivos químicos Efectos tóxicos de sus componentes. Impactos en los recursos hídricos de la zona.
Inyección del fluido de fracturación	Impactos del proceso de fracturación en los recursos hídricos subterráneos. Calidad de la construcción del pozo (integridad) para contener los gases y líquidos en las operaciones. Vías y conductos para el transporte de contaminantes. Controles para evitar la pérdida de fluidos. Procesos físicos, químicos y biológicos de los aditivos en el medio geológico. Sustancias naturales que se incorporan al fluido y sus posibles impactos.
Recuperación del flujo de retorno y extracción del GNC	Composición del flujo de retorno (agua residual + agua de formación). Efectos tóxicos de los componentes del agua residual. Impactos del agua residual sobre los recursos hídricos.

	Factores condicionantes de la contaminación de los recursos hídricos.
Tratamiento y disposición final del flujo de retorno	Características del tratamiento de las aguas residuales. Efectividad del método de tratamiento a emplear. Exigencias para el reciclaje y reutilización del agua de fracturación. Ubicación y características del sitio para la disposición final; posibles impactos.

## EXIGENCIAS HÍDRICAS EN LA DETERMINACIÓN DE LAS ÁREAS PERSPECTIVAS PARA LA EXTRACCIÓN DE GNC EN CUBA

Según Delgado *et al.* (2012), en Cuba solo debe existir GNC del tipo gas compacto (*tight gas*) en reservorios como las ofiolitas y los volcánicos, y gas en lutitas (*shale gas*). Para el primer caso, el escenario más favorable se sitúa en la mitad norte de Cuba, a profundidades superiores a los 6 km, en rocas asociadas a los sedimentos del margen continental de aguas profundas y el *sinrift*, en reservorios de baja calidad, con expresiones satisfactorias en el noroeste de Pinar del Río, la Cuenca Central, la costa norte de Cuba Central, reservorios no convencionales de ofiolitas (centro y oriente del país) y en las rocas de la Formación Vega Alta, que constituye el sello regional para todos los mantos de la UTE Placetas en la Franja Norte de Crudos Pesados.

Para el segundo caso, gas en lutitas, los mismos autores señalan como áreas perspectivas para la búsqueda de GNC de origen biogénico<sup>3</sup> las cuencas del sur del país: Los Palacios, Vegas, Mercedes, Ana María y Cauto (figura 1), en las que existe un gran espesor de sedimentos jóvenes, en tanto para el GNC de origen termogénico<sup>4</sup>, las referidas áreas estarían en la mitad norte de Cuba, dentro de las rocas madre a profundidades que oscilan entre 4 620 y 6 635 metros, donde hayan alcanzado la ventana de generación de gas, en la Franja Norte de Crudos Pesados.

Una dificultad que encuentra la explotación de GNC en muchas de las áreas mencionadas es la profundidad a la que se estima se encuentre el gas natural, pues hasta la fecha no existen referentes internacionales al respecto; también incide la baja resolución sísmica para la solución de algunas de las tareas de cartografía sísmo estratigráfica y estructural. De esta manera, el escenario más favorable e inmediato para la búsqueda de GNC se encuentra en los sedimentos terciarios de las cuencas del sur de Cuba, situados a profundidades tecnológicamente explotables por la fracturación hidráulica y además por contar con información sísmica de alta calidad.

En las cuencas Los Palacios, Vegas, Mercedes, Ana María y Cauto se conocen manifestaciones de gas natural, tanto en pozos como superficiales, indicando la existencia de rocas madre que generaron gas y que están saturadas del gas no expulsado (Delgado et al. 2012). Estas cuencas poseen un gran espesor de sedimentos jóvenes siendo perspectivas para la presencia de gas de origen biogénico.

Por otra parte, las principales reservas de aguas subterráneas en el país (28,8% del total de los recursos hídricos), se asocian a las rocas del Mioceno, pues presentan una elevada capacidad acuífera y en muchas ocasiones coinciden con rocas carbonatadas, generalmente carstificadas y con un alto grado de acuosidad; en un menor grado, se asocian a los complejos de rocas vulcanógenas y ultrabásicas. Uno de los principales factores de carácter natural que incide en la baja disponibilidad

<sup>3</sup> Gas biogénico: Se forma a poca profundidad y bajas temperaturas por la descomposición de la materia orgánica contenida en los sedimentos por la acción de las bacterias anaeróbicas.

<sup>4</sup> Gas termogénico: Se forma a grandes profundidades y elevadas temperaturas en una etapa en que ocurre el craqueo térmico de la materia orgánica.

de agua en Cuba es precisamente la limitada superficie de sus cuencas hidrográficas, con menos de 200 km<sup>2</sup> en más del 85% de los casos. Adicionalmente, la ubicación de los principales acuíferos cubanos en la zona costera condiciona la permanente amenaza de la ocurrencia del fenómeno de intrusión marina, que puede provocar la elevación del tenor de salinidad por encima de un gramo por litro de sales solubles totales, quedando inservibles para el consumo y el riego agrícola, y ocasionando serias alteraciones ecológicas en los ecosistemas asociados.

En el país existen 652 cuencas superficiales, solo diez son cerradas, el resto se encuentra en contacto con las zonas costeras, con una ligera mayor incidencia hacia el sur, pues 327 de ellas vierten sus aguas en el Mar Caribe. Atendiendo a su importancia económica, social y ambiental, el grado de afectación a sus recursos naturales, además de su extensión y los valores locales, el gobierno cubano dispuso concentrar su atención en diez de estas cuencas hidrográficas, denominadas cuencas de interés nacional (Figura 2), para lo cual se constituyeron los consejos de cuencas correspondientes, en tanto más de medio centenar de cuencas quedaron bajo la supervisión de los gobiernos provinciales, 25 de las cuales se desarrollan en la vertiente sur.

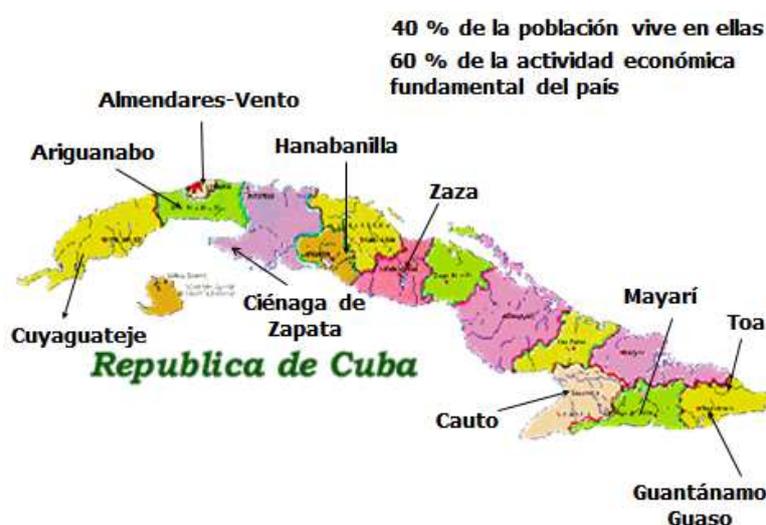


Figura 2. Cuencas hidrográficas de interés nacional

Todo lo anterior conduce al análisis de la disyuntiva entre la introducción de la tecnología de fracturación hidráulica en las cuencas del sur del país y la disponibilidad de los recursos hídricos para efectuarla, tomando en consideración los factores limitantes expuestos. En la opinión de los autores resulta imprescindible llevar a cabo una evaluación ambiental estratégica con todo rigor para un posible programa de esta índole en el país, tal y como se contempla en la legislación ambiental vigente.

### 03 CONCLUSIONES

El Modelo de Desarrollo Económico y Social Cubano de Desarrollo Socialista tiene como Visión de la Nación alcanzar una sociedad soberana, independiente, socialista, democrática, próspera y sostenible. Para ello hay que compatibilizar y armonizar adecuadamente las dimensiones económica, social y ambiental de la sostenibilidad, y en el caso que se aborda, lo relativo a la implementación de la tecnología de la fracturación hidráulica versus la disponibilidad y la calidad de los recursos hídricos del país, que constituyen de por sí el principal desafío ambiental de Cuba para alcanzar los objetivos contemplados en el Plan Nacional de Desarrollo Económico y Social hasta el 2030.

Esta articulación ha de basarse en la realización de una evaluación ambiental estratégica que

coloque el énfasis en la disponibilidad y calidad de los recursos hídricos del país, considerando las afectaciones identificadas para cada una de las actividades operacionales del fraccionamiento hidráulico, así como los aspectos que han de evaluarse en ellas.

## 04 REFERENCIAS

- Delgado O., López O., Tenreiro R. y López J. G.** (2012). "Gas no convencional, estado y perspectivas para su exploración en Cuba". Revista Cubana de Ingeniería. Vol. III, No. 3, septiembre - diciembre, 2012, p. 29 - 39, ISSN 2223 -1781.
- Díaz-Duque J.A.** (2018). "El agua en Cuba: un desafío a la sostenibilidad". Revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental. Vol. XXXIX, No. 2, May-Ago 2018, p. 46-59. ISSN 1680 – 0338.
- Domínguez Z., Delgado O., Rifá M., Prol J., Mustelier S., Pérez A. y Contreras R.** (2017). "Exploración para gas no convencional en el área de Martin Mesa". VI Congreso de Petróleo y Gas. VII Convención de Ciencias de la Tierra. 3 al 7 abril de 2017. Palacio de Convenciones, La Habana, Cuba. CD-ROM, p. 251-260. Editado por la Sociedad Cubana de Geología. ISSN 2307-499X.
- Environmental Protection Agency (EPA).** (2012). "Study the Potential Impacts of Hydraulic Fracturing on Drinking Water Resources, Progress Report", extraído de: <http://www2.epa.gov/hfstudy/>, en abril 2018.
- ExxonMobil** (2018). "Outlook for Energy: A View to 2040", extraído de: <http://www.exxonmobil.org/.pdf>, en abril 2018.
- Marrero M.** (2013). "Gas No Convencional ¿Revolución Energética?". Conferencia magistral impartida en la V Convención de Ciencias de la Tierra. La Habana, abril de 2013.
- Martínez L.** (2015). "Impacto ambiental de las tecnologías de producción de gas no convencional en la República de Cuba". Trabajo presentado en opción al título de Ingeniero Geofísico. Departamento de Geociencias. Universidad Tecnológica de La Habana. Junio de 2015. 74 pp.
- Martínez L., Díaz-Duque J.A. y Delgado O.** (2017). "Impacto ambiental de las tecnologías de producción de gas no convencional en la República de Cuba". VI Congreso de Petróleo y Gas. VII Convención de Ciencias de la Tierra. 3 al 7 abril de 2017. Palacio de Convenciones, La Habana, Cuba. CD-ROM, p. 581-591. Editado por la Sociedad Cubana de Geología. ISSN 2307-499X.
- PCC (Partido Comunista de Cuba)** (2021). "Conceptualización del Modelo Económico y Social Cubano de Desarrollo Socialista. Lineamientos de la Política Económica y Social del Partido y la Revolución para el Período 2021-2026". Comité Central del PCC, junio 2021, 86 pp.
- Rudnick H., Cortés V., Salamunic L. y Dattas M.** (2011). "La revolución del shale gas". Pontificia Universidad Católica de Chile. Escuela de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Eléctrica. 55 pp.

### CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses

## CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

**José Antonio Díaz Duque** <https://orcid.org/0000-0003-0032-4681>

Investigador principal del trabajo, elaboró las bases del marco teórico, dirigió la investigación bibliográfica y coordinó la redacción final.

**Linney Martínez Pérez** <https://orcid.org/0009-0009-2384-7849>

Participó en el diseño de la investigación, la investigación bibliográfica y la elaboración de las conclusiones. Contribuyó a la redacción final del trabajo.

**Orelvis Delgado López** <https://orcid.org/0000-0003-2499-1550>

Elaboró el marco histórico de la investigación, intervino en la investigación bibliográfica y participó en la redacción del trabajo.

## Formación Continua en Agua y Saneamiento en La Habana: impacto en la transformación del ambiente social sostenible

**Edelsy Ramos Guilarte**

E-MAIL: edelsy@emarocho.ays.cu

Empresa de Mantenimiento y Rehabilitación de Obras Hidráulicas de Occidente (EMAROHO)

**Mailén Virgen Gutierrez Herrera**

E-MAIL: mailen@civil.cujae.edu.cu

Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH). Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", Cujae.

**Tania Herrera Achon**

E-MAIL: taniah@civil.cujae.edu.cu

Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH). Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", Cujae.

### RESUMEN

El objetivo fue develar mediante una muestra "no probabilística típicas o intensivas" del total de ECE defendidos en las dos primeras graduaciones del técnico superior en agua y saneamiento, el impacto de la formación de este profesional, en la solución de problemas de mediana complejidad que se presentan en la sociedad, relacionado con los sistemas de agua limpia y saneamiento en La Habana, sustentada en una formación política, económica, ciudadana y ambiental acorde con la función laboral que desempeñan los graduados, para la transformación del ambiente social sostenible. La información se analizó a través del análisis de documentos, la observación participante de las autoras, anotaciones personales, y el analítico-sintético. Los nuevos estilos de vida y prácticas de consumo, en favor de la integridad del medio ambiente, hacen que la formación continua se convierta en una prioridad para el logro de soluciones profesionales que permitan un desarrollo sostenible, próspero e inclusivo.

**PALABRAS CLAVES:**

agua y saneamiento; formación continua; impacto; transformación social sostenible.

Continuous Training in Water and Sanitation in Havana: impact on the transformation of the sustainable social environment

### ABSTRACT

The objective was to reveal, through a "typical or intensive non-probabilistic" sample of the total number of ECE defended in the first two graduations of the higher technician in water and sanitation, the impact of the training of this professional, in the solution of problems of medium complexity that arise in society, related to clean water and sanitation systems in Havana, supported by a political, economic, civic and environmental training in accordance with the labor function that graduates perform, for the transformation of the sustainable social environment. The information was analyzed through document analysis, participant observation of the authors, personal notes, and analytical-synthetic. The new lifestyles and consumption practices, in favor of the integrity of the environment, make continuous training become a priority for the achievement of professional solutions that allow a sustainable, prosperous and inclusive development.

**KEYWORDS:**

water and sanitation; continuous training; impact; Sustainable social transformation

## 01 INTRODUCCIÓN

La formación de los profesionales constituye un proceso fundamental en el desarrollo de toda sociedad. La globalización y la digitalización producen cambios en el mundo laboral, afrontando constantemente nuevos retos. Poseer conocimientos técnicos, así como, la capacidad de adaptación rápida y de gestionar soluciones inmediatas, son una de las habilidades más solicitadas (entre otras).

Específicamente, la formación continua, se ha convertido en una de las principales estrategias para el perfeccionamiento de las potencialidades del ser humano. La velocidad de las transformaciones hace que los conocimientos queden desfasados rápidamente; lo antes expuesto obliga a pensar en las mejoras del entorno laboral con un enfoque sistémico que permita responder integralmente a las necesidades de transformación del ambiente físico y social sostenible, fenómeno que se acrecienta por el impacto de la tecnología en los procesos de generación de conocimientos.

En la mayor de las Antillas, es evidente la necesidad de formación profesional del sector hidráulico, la que se hace imprescindible ante la nueva reestructuración de la economía del país y los lineamientos de la Política Económica y Social del Partido y la Revolución para el Periodo 2021-2026; en los referidos a la Esfera Empresarial y a la Educación, como alternativa que pueda favorecer el vínculo Universidad-Empresa, y como sustento en las transformaciones educativas, a partir de la preparación de profesionales más competentes y comprometidos socialmente con el desarrollo del país.

En los últimos años a partir del incremento en la frecuencia e intensidad de los períodos de sequía, así como, del deterioro del estado técnico de la infraestructura de abasto y saneamiento, y el agravamiento de las condiciones higiénico-sanitarias en varias zonas del país, se han diseñado estrategias nacionales dirigidas en lo fundamental a mitigar los efectos de la sequía y de otros eventos extremos del clima, y a mejorar la deteriorada situación de los servicios de abasto y de saneamiento.

Sin embargo, la fuerza laboral calificada para estas tareas a finales de 2019, no estaba lo suficientemente preparada para enfrentar lo antes expuesto y así se dio a conocer por parte del Presidente de la Organización Superior de Dirección Empresarial Agua y Saneamiento (OSDE A y S), en la reunión inicial efectuada en la Universidad de Ciego de Ávila “Máximo Gómez Báez” (UNICA), cuando se iniciaban los primeros pasos del diseño curricular del Programa del Técnico Superior en Agua y Saneamiento (en lo adelante Programa). En este sentido, se aprueba en Cuba, en el año 2020 dicho programa y tiene como Centro Rector a la (UNICA). En noviembre del 2021 comienzan los estudios de la primera edición de manera presencial en La Habana (Gutierrez, 2023).

A tres años de iniciado dicho Programa en La Habana, para este estudio, la población (como unidad de análisis) se encuentra en el propio Programa antes mencionado y en las 34 propuestas de solución presentada por los estudiantes (hasta julio de 2024, con dos graduaciones) a las problemáticas identificadas en el banco de problemas de las empresas donde pertenecen los graduados de técnico superior en agua y saneamiento, y que ha sido su defensa del Ejercicio de Culminación de Estudio (ECE), último requisito indispensable que lo hacen acreedor de esta titulación. Aunque la formación se realiza en La Habana, debe desatacarse que se han formado profesionales que residen en las provincias de Mayabeque y/o Artemisa.

La heterogeneidad de temas para el trabajo con esta población, unida a la riqueza de información, demandó para este análisis la selección de una muestra “no probabilística típicas o intensivas” (Hernández-Sampieri y Mendoza, 2018, p.431) de siete (7) problemas profesionales en seis entidades, por ser estos, casos de perfil similar, considerados representativos de la población (como unidad de análisis), no en sentido estadístico, sino de prototipo, en este caso la gestión integral de

sistema de agua limpia y saneamiento, evidenciándose cambios en el desarrollo económico y social correspondiente al sector hidráulico. Además, formó parte de la muestra el modelo del profesional de este Programa y el Plan de Estado para el enfrentamiento al Cambio Climático (Tarea Vida).

El objetivo trazado por las autoras de esta investigación es develar mediante una muestra “no probabilística típicas o intensivas” del total de ECE defendidos en las dos primeras graduaciones del técnico superior en agua y saneamiento, el impacto de la formación de este profesional, en la solución de problemas de mediana complejidad que se presentan en la sociedad, relacionado con los sistemas de agua limpia y saneamiento en La Habana, sustentada en una formación política, económica, ciudadana y ambiental acorde con la función laboral que desempeñan los graduados, para la transformación del ambiente social sostenible.

## 02 MÉTODOS

En este estudio se especifica la necesidad de formación profesional del sector hidráulico y su formación continua. Se recolectan datos relacionados con la solución de problemas profesionales resueltos por los graduados del técnico superior en agua y saneamiento (dos primeras graduaciones), como su ECE para la obtención del título que los acredita para este fin; se constató la relación de sus soluciones con lo expresado en el modelo del profesional, y el documento Plan de Estado para el enfrentamiento al Cambio Climático (Tarea Vida); cuestión que evidencia el alcance descriptivo de dicho estudio en combinación con elementos de alcance explicativo que proporciona un mayor sentido de entendimiento de la temática abordada .

Como métodos empíricos fundamentales se utilizó el análisis de documentos, la observación participante de las autoras durante la formación de este profesional, y el analítico-sintético. En lo metodológico la población estuvo constituida por su Programa de Estudio y los 34 problemas profesionales gestionados por los graduados; se tuvo en cuenta una muestra “no probabilística típicas o intensivas” del ECE, de siete problemas profesionales en seis entidades, el modelo del profesional de este Programa de Estudio y el Plan de Estado para el enfrentamiento al Cambio Climático (Tarea Vida).

### LA FORMACIÓN CONTINUA EN HIDRÁULICA

Las instituciones de educación superior, actualmente enfrentan el reto de ampliar su capacidad de respuestas a las exigencias sociales, y a las demandas crecientes que enfrentan los profesionales en formación, para que logren insertarse en los procesos sociales, productivos y científicos en un contexto caracterizado por los vertiginosos cambios tecnológicos y la diversidad sociocultural; lo antes expuesto conduce al debate relacionado con las características de la formación profesional para alcanzar los fines encargados por la sociedad.

El debate científico sobre la formación continua, desde disímiles miradas, constituye un tema que aún se encuentra abierto a la discusión. Los aportes teóricos de diferentes investigadores brindan elementos esenciales para un acercamiento a su definición. Para la búsqueda bibliográfica, se tuvo en cuenta diferentes terminologías que se identifican como sinónimo de la formación continua, tal es el caso de: aprendizaje para toda la vida; formación permanente; formación profesional para el empleo; educación continua; y formación de adultos (entre otras).

Del análisis de diversos conceptos expuestos por diferentes autores, se hace énfasis en delimitar el de formación continua y el término formación permanente; la primera la enmarcan solo durante el período laboral, y la segunda, es considerada como una formación que excede los límites de la vida escolar y laboral.

Dentro de la heterogeneidad de criterios, Baumgarten (2022) define la formación profesional continua, como cualquier forma de aprendizaje organizado relacionado con el trabajo, que profundiza, amplía o repasa conocimientos, destrezas y habilidades; que suele concluir con un certificado o una certificación, tras la finalización de una fase inicial de educación, con diversa duración.

A partir del análisis de documentos se estudiaron 106 definiciones de formación continua en 98 fuentes; se identificaron las características homogéneas entre ellas y se decide realizar el análisis con una definición operacional: es un proceso sistemático y continuo, que actualiza conocimiento, habilidades valores y modos de actuación profesional adquiridos previamente tomándose en cuenta los cambios de la ciencia y la tecnología; tiene como finalidad el mejoramiento humano y el desempeño profesional en el puesto de trabajo; se considera como un proceso de enseñanza-aprendizaje de manera continua, tomándose en cuenta las demandas y necesidades de la sociedad o compromiso social, orientándose dicho proceso, a la mejora del entorno laboral.

Constituye una preocupación de todos los tiempos, la formación de profesionales acorde con las necesidades del entorno en que vive y se desenvuelve, para que respondan a las exigencias del desarrollo contemporáneo; que en el vínculo universidad-empresa, se genera el desarrollo de la sociedad desde el conocimiento, para fomentar la innovación empresarial y asegurar el aporte de la universidad al desarrollo local de los territorios.

Sucintamente, en el estudio realizado, se aprecia que en países como Reino Unido, España, China, México, Costa Rica y Perú, donde prevalece la formación en Ingeniería Hidráulica, desde la carrera de Ingeniería Civil, existe la especialización en temas relacionados con: el manejo de cuencas; optimización de obras hidráulicas; gestión de la infraestructura hidráulica; modelación numérica y física en hidráulica e hidrología; así como, técnicas y herramientas relacionadas con diseño, construcción y conservación de proyectos de aprovechamiento hidráulico; todo esto como continuidad de lo aprendido previamente durante su formación.

En Cuba, se estudia la carrera de Ingeniería Hidráulica independiente de la Ingeniería Civil, por lo que la formación continua se hace necesaria para la profundización de conocimientos, habilidades y valores adquiridos en el pregrado, así como, para ampliar conocimientos en otras disciplinas, relacionadas con las funciones en el puesto de trabajo.

Como resultado del análisis de los documentos, del expediente docente de los estudiantes que han matriculado en el Programa del Técnico Superior en Agua y Saneamiento en la Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” Cujae, se evidencia que, la mayoría ostentan el título de técnico medio en hidráulica, lo que devela su interés por la actualización constante de los conocimientos, habilidades y valores adquiridos previamente.

### TRANSFORMACIÓN SOCIAL SOSTENIBLE. ¿RUPTURA O CONTINUIDAD DE ESTUDIO DEL TÉCNICO SUPERIOR EN AGUA Y SANEAMIENTO?

Para entender la dicotomía entre el objeto de estudio de los profesionales del sector hidráulico en los diferentes niveles de enseñanza en Cuba y su accionar en el ambiente social sostenible, a partir de su formación continua, se hace necesario argumentar al respecto (del técnico medio en hidráulica, del técnico superior en agua y saneamiento y del ingeniero hidráulico).

El técnico medio en hidráulica tiene como objeto de trabajo al proceso constructivo y de conservación de presas, obras hidrotécnicas, acueductos, alcantarillados e instalaciones hidráulicas y sanitarias en edificaciones; trabaja, bajo la dirección de especialistas, arquitectos e ingenieros, en

las tareas y ocupaciones establecidas en los calificadores de cargos técnicos del proceso constructivo del objeto de obra que le corresponda, de pequeña o mediana complejidad (Minjus, 2009).

El objeto de trabajo del técnico superior en agua y saneamiento es: los sistemas de agua limpia y saneamiento; se solucionan problemas de mediana complejidad que se presentan en la sociedad relacionados con el abastecimiento, la evacuación y tratamiento de aguas residuales. Trabajan de manera independiente y creativa (MES, 2020).

El ingeniero hidráulico tiene como objeto de estudio y transformación a: los recursos hídricos (terrestres y marítimos, es decir, desde los océanos hasta los ríos incluyendo los lagos, los arroyos y las lagunas, presas, humedales); deben resolver los problemas más generales y frecuentes que se presentan en el eslabón de base, relacionados con la educación, gestión, diseño, planeamiento, construcción, y rehabilitación de una obra de ingeniería hidráulica de pequeña y mediana complejidad, con el empleo de tecnologías actuales de uso común en la profesión (CC. Cujae, 2018).

En opinión de las autoras, el técnico superior en agua y saneamiento se encuentra como entre dos aguas. En términos filosófico diríamos que todo cambio cualitativo se produce en forma de salto, al ser este una forma de desarrollo más rápida que la del desarrollo continuo, el periodo de desenvolvimiento más intenso, cuando lo viejo se transforma desbrozando el terreno a peldaños nuevos. Cada etapa del desarrollo de la sociedad tiene como principal una contradicción que determina la esencia de dicha etapa.

Si bien el técnico medio en hidráulica resuelve problemas teórico-práctico necesarios para la sociedad, es limitado su accionar ya que dependerá de la consideración de un especialista de mayor nivel escolar, ya sea un ingeniero o arquitecto. No así el técnico superior en agua y saneamiento, que posee autonomía en su desarrollo profesional, pero posee otras limitantes que lo coloca en desventaja ante el ingeniero hidráulico; este último está facultado para realizar diseños de proyectos de forma general y con un mayor radio de acción frente a los dos profesionales que le anteceden en su formación.

En síntesis, el técnico superior en agua y saneamiento es continuidad y al unísono ruptura con el técnico medio en hidráulica, pues es inevitable que lo integran elementos propios de ambos niveles de enseñanza. Como aspectos coincidentes de estos tres niveles de estudio, se puede aseverar que estos profesionales esencialmente coinciden en: tener una educación sustentada en valores y contribuyen al desarrollo de la infraestructura hidráulica, el ahorro de recursos y la protección y conservación del medio ambiente.

## IMPACTO EN LA TRANSFORMACIÓN DEL AMBIENTE SOCIAL SOSTENIBLE

En la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, que incluye 17 Objetivos y 169 metas, se presenta una visión ambiciosa del desarrollo sostenible e integra sus dimensiones económica, social y ambiental. Esta nueva Agenda es la expresión de los deseos, aspiraciones y prioridades de la comunidad internacional para los próximos 15 años. Es una agenda transformadora, que pone a la igualdad y dignidad de las personas en el centro y llama a cambiar el estilo de desarrollo, respetando el medio ambiente (Naciones Unidas, 2018). Específicamente en el objetivo número seis (6), se enuncia: “Garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos” (Naciones Unidas, 2018, p.35).

El desarrollo sostenible, tiene una connotación política, social, económica y ecológica que establece la interacción de estos, de manera tal que dicha interacción se dé equilibradamente. Los principios básicos del desarrollo sostenible apelan a la distribución justa de aquellos recursos naturales que son finitos, con el propósito de reducir el impacto que la escasez supone.

Con la nueva reestructuración de la economía en Cuba, la universidad debe asumir la transformación como una verdadera institución de educación continua a través de la superación de profesionales más competentes y comprometidos.

Desde el triunfo revolucionario la temática medioambiental ha tenido un carácter constitucional y legal. Lo anterior se evidencia, entre otros documentos, en La Ley No.150 de 2023, del Sistema de los Recursos Naturales y el Medio Ambiente; por otra parte, es necesario destacar que el Plan de Estado para el Enfrentamiento al Cambio Climático (Tarea Vida), tiene un alcance superior, actualiza e incluye la dimensión territorial lo cual requiere concebir y ejecutar un programa de inversiones progresivas a corto, mediano, largo y muy largo plazos. En su estructura está conformado por cinco acciones estratégicas y 11 tareas, lo que constituye una propuesta integral, que puede ser enriquecida durante su desarrollo e implementación (Citma, 2017).

La Tarea Vida está sustentada sobre una base científica multidisciplinaria, que da prioridad a 73 de los 168 municipios cubanos, 63 de ellos en zonas costeras y otros 10 en el interior del territorio (Citma, 2017).

En la misma se plasman (en síntesis) la identificación y el cumplimiento de acciones y medidas de adaptación al cambio climático para la reducción de la vulnerabilidad existente en zonas priorizadas (tarea 1). Implementación de normas jurídicas que contribuya con la reducción de la vulnerabilidad del patrimonio construido con prioridad en los asentamientos costeros amenazados (tarea 2). La conservación, mantenimiento, y recuperación de playas (tarea 3). La disponibilidad y uso eficiente del preciado líquido, como parte del enfrentamiento a la sequía (tarea 4). La dirección de la reforestación hacia la máxima protección de los suelos y las aguas en cantidad y calidad; priorizar los embalses, canales y franjas hidrorreguladoras de las cuencas tributarias de las principales bahías y de las costas de la plataforma insular (tarea 5). La tarea 6 se refiere a la detección del deterioro, rehabilitación y conservación de los arrecifes de coral en todo el archipiélago (Citma, 2017).

De igual manera, es considerada la inclusión en los planes de ordenamiento territorial y urbano de los resultados científicos del Macroproyecto sobre Peligros y Vulnerabilidad de la zona costera (2050-2100); así como, los Estudios de Peligro, Vulnerabilidad y Riesgo en el ciclo de reducción de desastres (tarea 7). La tarea 8 relata lo relacionado con la implementación y el control de las medidas de adaptación al cambio climático derivado de las políticas sectoriales, vinculado con la seguridad alimentaria, la energía renovable, la eficiencia energética, el ordenamiento territorial y urbano, la actividad agropecuaria, la salud, el turismo, la construcción, el transporte, la industria y el manejo integral de los bosques (Citma, 2017).

La tarea 9 está dirigida a los sistemas de monitoreo, vigilancia y alerta temprana para la evaluación del estado de la zona costera, el bosque, la salud humana, animal y vegetal. Por otra parte, la tarea 10 refiere (sucintamente) la elevación de la percepción del riesgo, el grado de participación de la población, y el fomento de una cultura para el ahorro del agua. Por último, y no menos importante, en la tarea 11 se aboga por la gestión y utilización de los recursos financieros internacionales disponible para la ejecución de inversiones, proyectos y acciones que se derivan de cada una de las Tareas de este Plan de Estado (Citma, 2017).

Debe reconocerse que las universidades constituyen actores clave del sistema de Ciencia Tecnología e Innovación (CTI). Durante mucho tiempo existió una insuficiente conexión de las universidades con el sector productivo y con el desarrollo territorial, aunque en ambos terrenos es posible encontrar ejemplos favorables (Díaz-Canel, 2021). Es precisamente éste el ejemplo que se argumenta, a raíz de la creación del Programa antes mencionado, y el impacto en la transformación

del ambiente social sostenible, de las soluciones propuestas y/o implementadas por los egresados como parte de su ECE.

Los autores Bravo, Fernández y Mainegra (2017) consideran el impacto como la intensidad de las diferencias (positiva o negativa, previstas o no, esperada o inesperada, cualitativa y/o cuantitativa) de los resultados generados por acciones cuyos efectos se aprecian en la transformación de las nuevas cualidades del proceso sobre el cual se ha incidido.

En este sentido, las autoras develan, mediante la selección de una muestra “no probabilística típicas o intensivas”, el impacto de la formación del técnico superior en agua y saneamiento, en la solución de problemáticas de mediana complejidad identificadas en el banco de problemas de las empresas donde pertenecen los graduados, relacionado con los sistemas de agua limpia y saneamiento en La Habana y que ha sido su defensa del ECE, último requisito indispensable que lo hacen acreedor de esta titulación.

Hasta el momento (julio/2024) se han formado 46 de estos profesionales en La Habana (29 en la primera graduación y 17 en la segunda); todos de empresas de subordinación de la OSDE A y S. Con el total de graduados, se ha gestionado la solución de 34 problemas profesionales de mediana complejidad (con las dos graduaciones), potenciándose así el vínculo universidad-empresa, evidenciándose cambios en el desarrollo económico y social correspondiente al sector hidráulico.

Como resultado del análisis de documentos, la observación participante de las autoras y sus anotaciones personales se devela (como parte de la población de estudio) que 21 de estas gestiones estuvieron dirigidas al abasto de agua y 13 al saneamiento básico (34 problemas profesionales resueltos). Las propuestas de solución a los problemas profesionales esencialmente estuvieron encaminadas en su mayoría a: la gestión de sistema de abasto, tratamiento y saneamiento del agua en el medio ambiente (19); rehabilitación (5); conducción del agua (3); construcción (3); el manejo y mantenimiento de la infraestructura de acueducto y alcantarillado (3); y a la instalación (1).

Ha sido un requisito en el informe final del ECE de cada graduado, la inclusión de un aval de la entidad laboral donde pertenece este profesional, en el que aparezca el criterio del director general o director técnico de la entidad laboral con su respectiva firma y cuño en el que se debe la necesidad de la producción y los servicios identificada dentro del banco de problema de la empresa; así como, la aplicación de la introducción del resultado con el efecto económico, social y medioambiental (puede ser un resultado que ya está aplicado y en este caso hay que declarar el tiempo, o puede ser a aplicar de inmediato a partir de la propuesta).

Las autoras consideran oportuno aclarar que en el momento de las exposiciones del ECE de los ya graduados, algunas de las propuestas se encontraban implementadas y/o en el proceso de implementación, por lo que mediante la selección de una muestra “no probabilística típicas o intensivas”, de siete casos en seis entidades, se argumenta la solución de siete problemas de mediana complejidad que se presentaron en la sociedad, relacionado con los sistemas de agua limpia y saneamiento en La Habana, sustentada en una formación política, económica, ciudadana y ambiental acorde con la función laboral que desempeñan los graduados, para la transformación del ambiente social sostenible.

Estas soluciones profesionales fueron:

- Drenaje pluvial urbano en las avenidas Carlos Manuel de Céspedes y Paseo en el municipio Plaza de la Revolución en La Habana, por la Empresa Aguas de La Habana: se realizó la ejecución de obras de construcción y/o mantenimiento, con el fin de evitar desbordes en el sistema de drenaje que se produce por la escorrentía superficial.

- Instalación de flujómetro con el método proporcional para agua potable. Fuente Cuatro Caminos: se realizó un análisis para la adquisición e instalación de los medidores de caudales, ya que poseen un alto costo en el mercado internacional, que permitió una mejor adquisición, para el acceso a los datos sobre la medición de los volúmenes de extracción de la fuente de abasto, en este caso del Pozo 1 de Cuatro Caminos en el Cotorro, y evitar la sobreexplotación de la misma, debido al aumento de la demanda de agua para el consumo y la disminución de la disponibilidad del preciado líquido; por la Empresa Aguas de La Habana.
- Plan de acción para minimizar el impacto ambiental en la Zona Especial de Desarrollo Mariel (ZEDM): se llevó a cabo un análisis del efluente en la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), con tecnología de reactor biológico de lecho móvil (MBBR por sus siglas en Inglés: Moving Bed Biofilm Reactor) del sector A4 de la ZEDM, para las propuestas de acciones ante indisciplinas ocurridas, que minimicen el impacto ambiental al cuerpo receptor; constituyó esto un desafío técnico y operativo, que demandó de una gestión cuidadosa y un monitoreo constante en aras de profundizar en el conocimiento y la protección del medio ambiente, y el manejo sostenible de los recursos hidráulicos y naturales; retos a los que está llamada a responder la educación ambiental como importante proyecto del país por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado Aguas Mariel (EAA Aguas Mariel).
- Procedimiento para la elaboración de ficha de costo de maquinarias para construcciones hidráulicas: se elaboró un procedimiento que posibilita la confección de una ficha de costo para la Retropala modelo JCB 3DX PLUS, y evite las pérdidas económicas relacionadas con el costo horario de los equipos de construcción, mediante una búsqueda de información de los precios actuales en el mercado sobre las piezas y lubricantes necesarios para la sostenibilidad del equipo. Se utilizó el modelo aprobado por el Ministerio de la Construcción (MICONS) como organismo rector y se les atribuyó responsabilidades a las direcciones de la empresa involucradas en el procedimiento, además, de establecerse la frecuencia para la actualización de la ficha de costo, por la Empresa de Mantenimiento y Rehabilitación de Obras Hidráulicas de Occidente (EMAROHO).
- Estudio para la propuesta del cambio de bomba convencional por bomba sumergible con panel solar: se efectuó un estudio del consumo energético, con el uso de fuentes renovables de energía que implica el bombeo de agua en un edificio multifamiliar (Argentina sito en avenida 31 y avenida 25 en el municipio Marianao), en aras de la disminución de los costos y gastos financieros y de mantenimiento, con el empleo racional de los recursos disponibles y las tecnologías novedosas, por la Empresa de Mantenimiento y Reparación de Obras Hidráulicas (EMROH).
- Propuesta de mejora para la reducción de los gastos por consumo de energía eléctrica para el abasto de agua: elaboración de una propuesta de mejora para la reducción de los gastos por consumo de energía eléctrica, que centrado en el análisis del maestro de facturación, evite pérdidas económicas y contribuya al perfeccionamiento de los procesos administrativos en la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Mayabeque (EAA Mayabeque); realizado por la Dirección General de Inversiones, Mantenimiento, Logística, Mecanización y Portadores Energéticos (DGIMLMPe) de la propia OSDE A y S. Sistema de acciones para el cobro del agua: se llevó a cabo un sistema de acciones que proporciona mejoras del índice de cobro del agua servida, evita pérdidas económicas en la Empresa de

Acueducto y Alcantarillado (EAA) de Artemisa (contempla 11 municipios) y contribuya al perfeccionamiento de los procesos administrativos.

Lo anterior conlleva a enunciar "...los resultados generados por las acciones cuyos efectos se aprecian en la transformación de cada nueva cualidad del proceso sobre el cual se ha incidido" (Bravo, Fernández y Mainegra, 2017, p.48).

Como resultado del trabajo realizado (en la muestra seleccionada), se devela, principalmente: mayor integración paisajística; mitigación de los efectos adversos que la escorrentía urbana provoca al medio ambiente; disminución del encharcamiento por largos períodos; mejora de la imagen urbana; mejora la infraestructura peatonal y vial; reducción de riesgos viales; mayor control de las inundaciones y se evitan enfermedades; se minimiza el impacto por inundaciones en las estructuras urbanas; menos afectación al espacio público; reducción del impacto de la acción del agua, sobre los ecosistemas; mayor compatibilidad con el contexto urbano; mejores condiciones de vida para los ciudadanos residentes en las zonas de estudio y transeúntes.

La instalación del flujómetro proporcional mencionado responde a las exigencias impuestas por las condiciones del sistema de abasto, dígase la introducción de las menores pérdidas posibles. Mediante el uso de esta técnica, quedó demostrado, que la medición de caudales es más económica y se logran errores menores del 1%. Se logra un ahorro por unidad instalada de este tipo de medición proporcional. Estos valores llevados a la necesidad creciente de contabilizar el recurso hidráulico a nivel macro en el país, representa un costo elevado.

Otra transformación relacionada con el impacto ambiental en la ZEDM, se manifiesta con el incremento del control sistematizado de la calidad del agua enviada al mar para la protección de la fauna marina; se contribuyó con la disminución de la erosión del suelo; mejor monitoreo del vertimiento; mayor conservación de la biodiversidad; mejor conservación y uso sostenible de la zona costera y su zona de protección, el lecho y subsuelo marítimo; el adecuado tratamiento de los residuales, así como, de la operación y mantenimiento de estos sistemas, ya que reducen la generación de residuales líquidos y su correcta disposición final; se contribuyó con la prevención de enfermedades de origen hídrico.

Con la elaboración del procedimiento para la confección de ficha de costo de la Retropala modelo JCB 3DX PLUS se evidenció un impacto positivo ya que, se evitaban pérdidas económicas en la EMAROH; se logra actualizar sistemáticamente la ficha de costo de la Retropala modelo JCB 3DX PLUS teniendo en cuenta los precios del mercado. Se evidencia organización con relación al trabajo de las distintas direcciones de la empresa que intervienen en el procedimiento para la elaboración de la ficha de costo de la Retropala modelo JCB 3DX PLUS.

En otro orden de impactos se puede mencionar que, con el uso de la energía solar fotovoltaica (una de las soluciones propuestas) se evidencia una opción rentable, factible, ecológica y sostenible, además se ahorra combustible y se ofrece un mejor servicio a la población ya que mejora sus condiciones y calidad de vida. Los costos de adquisición de estas bombas son mucho más caros que las bombas convencionales, pero su importación y futuro uso en los edificios reflejaría cero consumos de energía, y muchos menos mantenimientos al ser bombas con características especiales, en cuanto a resistencia a la corrosión y al desgaste, al ser totalmente inoxidables y venir equipadas con protecciones eléctricas a bajo nivel sobre corriente, sobre voltaje y al ser monofásicas, no tiene problemas de inversión ni caída de fases, permite la disminución de importaciones de combustibles (petróleo) al país y de los costos de reparación y mantenimiento.

Como resultado de la aplicación de un plan de mejoras para el análisis del maestro de facturación mensualmente, se logra la detección de las desviaciones en las facturaciones aplicadas por la empresa eléctrica a la EAA Aguas Mariel, lo que permite develar que el impacto, esencialmente es de carácter económico.

Por otra parte, con lo realizado por la EAA de Artemisa, se mejoraron considerablemente los ingresos, lo que posibilitó un aumento en la eficiencia en el sector residencial de un 45% a un 67%; se mejoró el estado de ánimo de los trabajadores y se evidenció un trabajo como sistema, al involucrar a varios factores comunitarios para la solución del problema.

El desarrollo sostenible tiene una connotación política, social, económica y ecológica que establece la interacción entre los mismos, de manera equilibrada. Con él, debe satisfacerse las necesidades sociales, de diversidad cultural y de un medio ambiente sano de la actual generación, sin arriesgar la satisfacción de estas a las generaciones futuras.

Para el análisis realizado las autoras consideraron oportuno, además, develar la correspondencia de las tareas contentivas en el documento Tare Vida con los 34 problemas profesionales gestionados mediante el ECE de los graduados del técnico superior en agua y saneamiento, y que constituyen (los 34 problemas profesionales) parte de la población como unidad de análisis.

En este sentido, la mayor representatividad estuvo en la tarea No.4 (con 17 soluciones de las 34) relacionada con el aseguramiento y la disponibilidad y uso eficiente del agua como parte del enfrentamiento a la sequía, a partir de la aplicación de tecnologías para el ahorro y la satisfacción de las demandas locales. Se elevó la infraestructura hidráulica y el mantenimiento, así como, la introducción de acciones para la medición de la eficiencia y productividad del agua.

De igual manera cinco soluciones estuvieron dirigidas a la identificación y ejecución de acciones y proyectos de adaptación al cambio climático, de carácter integral y progresivos, necesarios para reducir la vulnerabilidad existente en zonas identificadas como priorizadas, tributando así a lo planteado en la tarea No.1 correspondiente a dicho Plan de Estado.

La tarea No. 2 y la No.9 tuvo (cada una) proyección en tres soluciones, orientadas a la reducción de la vulnerabilidad del patrimonio construido; y al fortalecimiento de los sistemas de monitoreo, vigilancia y alerta temprana para evaluar sistemáticamente el estado y calidad del agua, la sequía, la salud humana, animal y vegetal, respectivamente.

De igual forma se implementaron medidas de mitigación al cambio climático derivadas de proyectos vinculados a la eficiencia energética para la solución de dos problemas profesionales, lo que tributa a la tarea No.8 con esta misma cifra, la tarea No.10 relacionada con el nivel de conocimiento y participación de la población para el ahorro del agua, tuvo su representatividad.

Por último, se solucionó un problema profesional relacionado con la tarea No.3 y otro con la No.11; se dirigieron acciones que facilitan la reducción de la vulnerabilidad estructural del patrimonio construido y la gestión de los recursos financieros internacionales disponibles, para ejecutar las inversiones, proyectos y acciones que se derivan de cada una de las Tareas de este Plan de Estado.

Es significativo señalar que en las tareas 5, 6, y 7 no se visualiza proyección en las soluciones de las problemáticas identificadas por los estudiantes, valorando las autoras como principal causal que, la esencia de estas tareas se encuentra algo distante del objeto de estudio del técnico superior en agua y saneamiento, en este caso la gestión integral de los sistemas de agua limpia y saneamiento.

De forma general, y como resultado de los métodos empleados, se puede afirmar que, desde el ECE, la mayoría de las tareas previstas en el Plan de Estado para el Enfrentamiento al Cambio

Climático tienen proyección en las soluciones de los problemas de mediana complejidad que se presentan en la sociedad relacionado con los sistemas de agua limpia y saneamiento para la transformación del ambiente social sostenible, valorándose la transformación ocurrida (el impacto) de manera positiva.

### 03 CONCLUSIONES

Mediante la muestra seleccionada se devela el impacto que ha tenido la formación del técnico superior en agua y saneamiento, en la solución de los problemas profesionales de la empresa donde pertenece el estudiante y que están relacionado con los sistemas de agua limpia y saneamiento.

Los nuevos estilos de vida y prácticas de consumo, en favor de la integridad del medio ambiente, compatible con el desarrollo sostenible, hacen que la formación continua de todo profesional se convierta en una prioridad para el logro de soluciones profesionales que permitan un desarrollo sostenible, próspero e inclusivo.

Al valorar el impacto de la formación del técnico superior en agua y saneamiento en La Habana para la transformación del ambiente social sostenible, se observa que como efecto se aprecia la existencia de una intervención para el desarrollo, de manera intencional. Como resultado, es percibida la magnitud cuantitativa y cualitativa del cambio; y como cambio, el mejoramiento profesional del graduado y el beneficio a la población.

### 06 REFERENCIAS

- Baumgarten C.** (2022). "Formación profesional dual y formación continua Panorama de las posibilidades de cualificación profesional en Alemania". GOVET en el Instituto Federal de Formación Profesional (BIBB). 2ª edición revisada y completada.
- Bravo B., Fernández C. y Mainegra D.** (2017). "La evaluación de impacto del proceso de formación de profesores", Revista Mendive, vol.15, no.1, pp.41-56, ISSN 1815-7696. Extraído de: <http://mendive.upr.edu.cu/index.php/MendiveUPR/article/view/1002> en enero 2020.
- Colectivo de Carrera de Ingeniería Hidráulica de la Cujae (CC.Cujae).** (2018). "Plan de Estudio E Ingeniería Hidráulica". La Habana.
- CITMA** (2017). "Enfrentamiento al Cambio Climático en la República de Cuba. Tarea Vida". Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. Disponible en: <http://www.contraloria.gob.cu/documentos/noticias/FOLLETO%20TAREA%20VIDA.PDF> en enero de 2020.
- Díaz-Canel M.** (2021). "Sistema de gestión del gobierno basado en ciencia e innovación para el desarrollo sostenible en Cuba". Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, Santa Clara.
- Gutierrez M.V.** (2023). "El inicio de los estudios del Técnico Superior en Agua y Saneamiento en La Habana". Ingeniería Hidráulica y Ambiental, vol. XLIV, No.02, pp.12-21, ISSN 2788-6050, Universidad Tecnológica de La Habana (Cujae), La Habana.
- Hernández-Sampieri R. y Mendoza CH. P.** (2018). "Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta", 1era. Edición, Editorial McGraw Hill Education, ISBN 978-1-4562-6096-5, México.
- MES** (2020). "Plan de estudio, Nivel de Educación Superior de Ciclo Corto Agua y Saneamiento". Plan del Proceso Docente, Curso por Encuentro. Ministerio de Educación Superior. La Habana.

**Ministerio de Justicia [Minjus].** (2009). Resolución No.109/09 del Ministerio de Educación. Estructuras de especialidades de la Educación Técnica y Profesional de nivel medio. Edición Ordinaria. Gaceta oficial; (36): 1057-1277.

**Naciones Unidas** (2018). La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible una oportunidad para América Latina y el Caribe (LC/G.2681-P/Rev.3). Santiago. Chile.

#### CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

#### CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

**Edelsy Ramos Guilarte** <https://orcid.org/0009-0009-8087-5205>

Realizó el diseño metodológico de la investigación. Recopilación y análisis de la bibliografía.  
Procesamiento de los datos y redacción del informe final.

**Mailén Virgen Gutierrez Herrera** <https://orcid.org/0000-0002-9319-653>

Trabajó en la concepción teórico-metodológica de la investigación. Selección de las técnicas y los métodos científicos a utilizar. Procesamiento de los datos y redacción del informe final.

**Tania Herrera Achon** <https://orcid.org/0000-0003-1483-9221>

Trabajó en el análisis de la bibliografía. Selección de las técnicas y los métodos científicos a utilizar.  
Procesamiento de los datos y redacción del informe final.

## Soluciones para un desarrollo sostenible en acuicultura mediante el tratamiento del agua

**YUDEIMYS YMAS DÁVILA**

E-MAIL: ymastorres79@gmail.com

Instituto de Investigaciones Fundamentales en Agricultura Tropical "Alejandro de Humboldt" (INIFAT)

**DARLÉN GOIBURO CORDERO**

E-MAIL: darlengoiburo811@gmail.com

Compañía Contratista de Obras para la Aviación (CCOA)

**RONNIE TORRES HUGUES**

E-MAIL: torresymas79@gmail.com

Compañía Contratista de Obras para la Aviación (CCOA)

**BASILIO DEL VALLIN MARCHECO**

E-MAIL: basiliodelvallin@gmail.com

Compañía Contratista de Obras para la Aviación (CCOA)

### RESUMEN

En el trabajo se hace una revisión bibliográfica en la que se relacionan los recursos hidráulicos con la acuicultura. Inicialmente, se exponen los sistemas tradicionales y, a partir de la necesidad de un desarrollo sostenible para esta actividad, se explican las principales soluciones que actualmente se están empleando para garantizar el ahorro del agua. Finalmente, se describe la situación cubana y se establece la necesidad de adoptar estas teniendo en cuenta varios factores como la repercusión en la economía nacional y la tendencia a la disminución de los recursos hídricos potenciales.

**PALABRAS CLAVES:** acuicultura sostenible, sector pesquero cubano, sistemas de recirculación, tratamiento del agua.

Solutions for a sustainable development in aquaculture through water treatment

### ABSTRACT

In this work, a bibliographic review is made in which hydraulic resources are related to aquaculture. Initially, traditional systems are presented and, based on the need for sustainable development for this activity, the main solutions that are currently being used to guarantee water savings are explained. Finally, the Cuban situation is described and the need to adopt these is established, taking into account several factors such as the impact on the national economy and the trend towards a decrease in potential water resources.

**KEYWORDS:** sustainable aquaculture, cuban fishing sector, recirculation systems, waste water treatment.

## 01 INTRODUCCIÓN

La población mundial se encuentra en constante crecimiento, la ONU señaló que pasó de 7 millones a 8 mil millones de personas (2022) en 12 años (Figura 1), y, por tanto, también la demanda de alimentos.

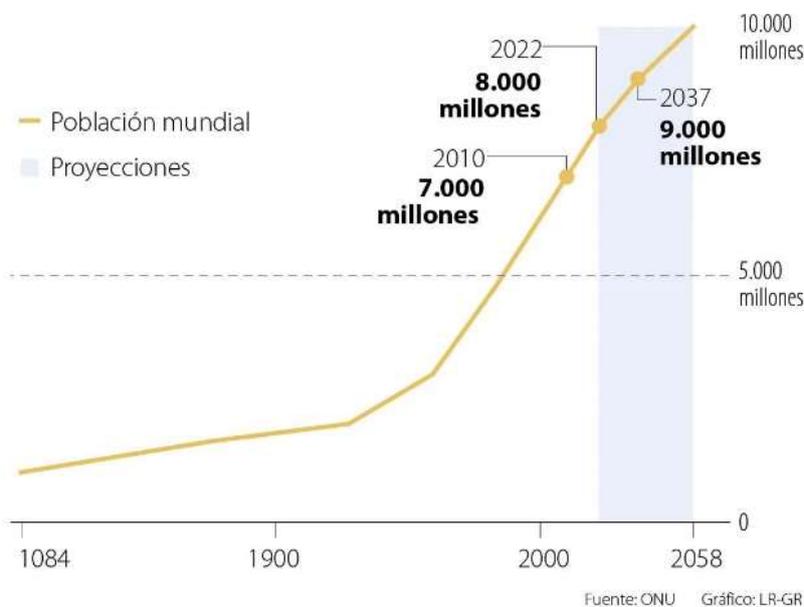


Figura 1. Crecimiento de la población mundial (Obtenido de <https://www.un.org/es/global-issues/population>)

Una de las prácticas más comunes para superar este desafío mundial ha sido la crianza controlada de cualquier organismo acuático, desde peces hasta moluscos y algas a partir de la acuicultura. Según plantea la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) en 2022, la producción pesquera y acuícola alcanzó un nuevo récord histórico de 223,2 millones de toneladas, de los cuales el 59% proviene de esta última vía. En torno a 139,7 millones de toneladas se cultivaron en aguas continentales y 83,5 millones de toneladas procedían de la acuicultura marina y costera (FAO,2024).

En términos globales, en 2022 el consumo de alimentos acuáticos era de 20,7 kg per cápita, lo que representa más del doble del ritmo de hace 50 años. Además, de este tipo de alimentos proviene el 15 % de la proteína de origen animal que se ingiere (FAO,2024).

La FAO, como organización mundial que rige las políticas y las actividades encaminadas a erradicar el hambre, ha establecido desde 2022 una estrategia visionaria llamada Transformación Azul. Con la misma se pretende potenciar la función de los sistemas alimentarios acuáticos mediante políticas y prácticas respetuosas con el clima y el medio ambiente, así como las innovaciones tecnológicas, para que tanto la pesca como la acuicultura crezcan de manera sostenible.

Los recursos hídricos son esenciales para esta solución tanto para la supervivencia y crecimiento de las especies acuáticas como para mantener un medio ambiente saludable y sostenible. Los sistemas de acuicultura requieren tener la cantidad de oxígeno, los nutrientes y la temperatura adecuados. Por lo tanto, la gestión sostenible del agua es clave en estas prácticas para evitar la sobreexplotación y la contaminación de los recursos hídricos (Oberdleck and Verreth, 2009).

A partir de lo antes mencionado es que se plantea como objetivo de este trabajo describir los principales avances tecnológicos relacionados con los recursos hidráulicos que se han implementado en la acuicultura, así como el estado de esta actividad en Cuba.

## 02 LA ACUICULTURA Y LOS RECURSOS HIDRÁULICOS

La acuicultura se lleva a cabo en ambientes controlados como ríos y lagos, océanos y estanques en los que se realizan diversas actividades, entre las que destacan: la crianza y reproducción, cosecha, mejoramiento genético, investigación y desarrollo y conservación y restauración de las especies acuáticas (FAO,2024) con la finalidad de que sea para consumo humano, repoblación u ornamentación.

Desde el proceso de concepción hasta la explotación de los sistemas acuícolas deben realizarse bajo los criterios de la sostenibilidad para lograr la Transformación Azul convocada por la FAO. En este orden, se puede tomar como punto de partida el proyecto de investigación conocido como *UE SustainAqua* cofinanciado por la Unión Europea, en el que se han evaluado varios casos de estudio en Europa Central y Oriental (Oberdleck and Verreth, 2009). En este proceso de investigación se presentan los indicadores a tener en cuenta a partir de las dimensiones (ambiental, económica, social) de este concepto (ver tabla 1). Estos ofrecen una idea fiable de medida o grado.

Tabla 1 - Indicadores de sostenibilidad para los estudios de casos SustainAqua. Tomado de (Oberdleck and Verreth, 2009).

Dimensión ambiental			
	Objetivo específico o criterio	Indicador	Unidad
Energía	Eficiencia energética: Reducir la entrada de energía tanto como sea posible	Entrada de energía por salida de producto (peces, biomasa)	KWh/kWh salida
Agua	Abastecimiento de agua: Reducir la cantidad de agua dulce externa al sistema (Reutilizar el agua en la medida de lo posible)	Abastecimiento de agua por producto (peces, biomasa)	L/kg producto
	Salida de agua: Reducir el agua de vertido hasta casi cero (para ver los aspectos de calidad Nutrientes/salida)	Vertido por producto (peces, biomasa) (sin evapotranspiración y filtración - puede ser positivo o negativo-pero incluyendo las precipitaciones)	L/kg producto
Nutrientes	Eficacia de utilización: Utilizar la entrada de nutrientes con la mayor eficacia posible. Producir a partir de una cierta unidad de entrada de nutrientes mayor cantidad de productos comercializables con un alto nivel de calidad	Eficiencia en la retención de nutrientes (NRE) (retención de nutrientes en productos por Kg de entrada de nutrientes al sistema, en general peces, biomasa).	Kg nutrientes (N,P, COD) retenidos en producto/kg entrada de nutrientes (%). TOD calculado a partir de COD y N
	Salida (véase también agua): Reducir la cantidad de vertidos residuales (pérdidas de nutrientes, minerales y materia orgánica) a casi cero	Cantidad de nutrientes/ calidad del vertido	N,P,COD, conductividad eléctrica liberada por Kg producido

	Re-utilización de nutrientes para productos de valor añadido: Producir bienes de valor añadido dentro de la piscifactoría	Retención de nutrientes de re-utilización N/P para productos de valor añadido	Kg nutrientes retenidos en productos de valor añadido por Kg salida de nutrientes en el sistema en general (%)
<b>Dimensión económica</b>			
Costes de Prod.	Incremento de la productividad por unidad de trabajo	Uso del tiempo de trabajo por cada producto producido en las explotaciones (modelo basado en hipótesis)	h / Kg de producto
AFM	Mejorar la seguridad de los productos y la salud de los peces: reducir los brotes de enfermedades	Número de tratamientos / ciclo de producción	Número de tratamientos / ciclo producción

\*AFM: Amortiguación de las fluctuaciones de mercado

La dimensión social incluye las oportunidades de empleo, las condiciones de los trabajadores (higiene, seguridad, formación) y el ocio para el público en espacios recreacionales, entre otras.

Esta actividad tiene muchas implicaciones con los recursos hidráulicos: el control de la calidad del agua para asegurar la salud y el crecimiento de los organismos acuáticos, la reducción de la cantidad de agua dulce externa al sistema reutilizando el agua en la medida de lo posible para un manejo eficiente del recurso, la oxigenación del agua para los organismos acuáticos y la gestión de los residuos generados (Oberdleck and Verreth, 2009).

Los principales parámetros que se regulan para la calidad del agua son: temperatura, salinidad, pH, oxígeno disuelto, turbidez, conductividad eléctrica, presencia de ciertos químicos o microorganismos y niveles de nutrientes. Si estos se encuentran con valores inadecuados pueden causar estrés, enfermedades y hasta la muerte de los seres acuáticos.

Por su parte, los desechos producidos por los organismos cultivados, tales como los excrementos de peces y alimentos no consumidos, liberan sustancias tóxicas y nutrientes (nitrógeno y fósforo) en el agua que pueden conducir a la eutrofización (Figura 2).



Figura 2. Eutrofización en un estanque.

Además, la introducción de especies no nativas, los medicamentos y los productos químicos utilizados para tratar enfermedades también pueden alterar los ecosistemas acuáticos y la calidad del agua (Ovando, 2013).

## SISTEMAS TRADICIONALES DE ACUICULTURA

Los sistemas de acuicultura son infraestructuras que requieren de armonizar muchos variables, siendo una de las más importantes el agua. Así sea en agua dulce o salada el empleo de tanques o estanques es una solución muy común en la acuicultura (Figura 3). Estos pueden ser naturales o artificiales y normalmente se llenan de agua procedente de ríos, arroyos, manantiales, embalses o agua subterránea. Las especies de peces criadas en estas estructuras pueden ser carpas, tilapias, bagres, truchas, salmón, lubinas, langosta y camarón, entre otras.

Hay dos tipos de tanques que son comúnmente utilizados en la piscicultura: los tanques redondos y los rectangulares. Como regla general, es recomendable que tenga al menos 60 cm de profundidad en su punto más profundo para permitir a los peces y plantas sobrevivir durante el invierno (Sánchez, 2023).



Figura 3. Vista parcial de los estanques de la estación de “Pavón”, provincia de Villa Clara.

Los tanques redondos se utilizan a menudo cuando se necesita una buena circulación y calidad del agua. Son adecuados para la cría de una gran cantidad de peces debido a su gran capacidad volumétrica y permiten una circulación óptima del agua, lo que ayuda a mantener la calidad del agua y a reducir la acumulación de desechos.

Por otro lado, los tanques rectangulares se utilizan principalmente para la cría de peces en etapas más avanzadas de crecimiento o para especies que necesitan más espacio para nadar. Este tipo de tanque permite una mayor densidad de población de peces y una producción intensiva.

Construir un estanque requiere consideración cuidadosa de varios factores: el suministro constante y confiable de agua limpia y fresca; el espacio disponible no solo para los estanques sino también para el resto de las instalaciones de apoyo (almacenes, oficinas, sistemas de filtración, etc.); la ubicación del estanque considerando una topografía que permita un fácil flujo de agua y otros elementos operativos; que el tipo de suelo tenga un alto contenido de arcilla para que retenga eficientemente el agua; el diseño (dimensiones, estructura y forma, etc.) del estanque, que dependerán de la cantidad de peces que se planea manejar; el presupuesto; entre otros. De no concebir el proyecto correcto se puede afectar al ciclo natural del agua.

En cuanto al material del estanque los de fibra de vidrio, materiales locales y los de hormigón son los más populares, pero cada uno tiene sus propias ventajas y desventajas. Los tanques de fibra de

vidrio son ligeros, duraderos y fáciles de limpiar, mientras que los tanques de hormigón son robustos y pueden soportar gran cantidad de peso, pero requieren de mayor mantenimiento (Oberdleck and Verreth, 2009) (Sánchez, 2023). Por su parte, los de tierra son de bajo costo y la arcilla ayuda a filtrar el agua, sin embargo, su vida útil es limitada y pueden experimentar una mayor pérdida.

Además del uso de estanques se han implementado diseños que incorporan jaulas flotantes, corrales y canales (*raceway* en inglés) (Figura 4), que varían en función del organismo cultivado, las condiciones ambientales, la inversión requerida, así como otros factores (Beveridge,1986). La diferencia entre las jaulas y los corrales radica en que la primera está cerrada por todos los lados con paños de red o rejillas y en los corrales es el fondo mismo del lago o del mar el que delimita la parte inferior (Beveridge,1986).



Figura 4. Izq: Jaulas y corrales. Der: Canales (*raceway*).

En este se utilizan jaulas o redes en las que los peces están contenidos pero el agua fluye libremente, proporcionando nutrientes y oxígeno. El salmón y la lubina son comúnmente criados en este tipo de sistema (Beveridge,1986). En los cultivos en carreras, también conocidos como sistemas de flujo constante, se utilizan ríos o corrientes para proporcionar un flujo continuo de agua. Normalmente, las carreras son canales largos y estrechos donde los peces se cultivan en alta densidad (Oberdleck and Verreth, 2009) (Ovando, 2013).

Las actividades de acuicultura generan inevitablemente aguas residuales cargadas de nutrientes, productos químicos y compuestos orgánicos. La disminución de la concentración de esta carga contaminante se realiza mediante una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que ayudan a mejorar la calidad del agua antes de su devolución al medio ambiente (Figura 5) (Murray et al. 2013) (López,2023).



Figura 5. Planta de tratamiento de aguas residuales. (Tomado de <https://institutodelagua.es/acuicultura/tanques-de-acuicultura-tipo-mesaacuicultura.>)

En la tabla 2 se relacionan los procesos antes mencionados con las distintas etapas del tratamiento.

Tabla 2. Procesos de una planta de tratamiento de aguas residuales.

Proceso	Etapa del tratamiento	Objetivo
Filtración	Pre-tratamiento	Remover los desechos sólidos más grandes.
Sedimentación	Tratamiento primario	Separar los sólidos suspendidos y la materia orgánica.
Procesos biológicos	Tratamiento secundario	Consumir los residuos y compuestos orgánicos.
Desinfección	Tratamiento terciario	Eliminar los nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, así como bacterias o virus restante.

Dentro de estos procesos se ha trabajado intensamente en el primero, entre los que destacan los filtros mecánicos con medios filtrantes como espuma, tela o arena; los biológicos con bacterias benéficas y ciertas especies como las ostras y los mejillones que convierten los desechos tóxicos en sustancias menos perjudiciales y los químicos con carbón activado o resinas de intercambio iónico. (Sánchez, 2023) (López, 2023).

De manera general la acuicultura tradicional se enfrenta a desafíos como la sobreexplotación de recursos, la contaminación ambiental y la seguridad alimentaria. Diseñar los sistemas de acuicultura mediante nuevos enfoques se hace imprescindible (FAO, 2024).

## SISTEMAS MODERNOS PARA LA ACUICULTURA

La investigación en el campo de la Biología para criar nuevas especies marinas es imprescindible para la sostenibilidad, sin embargo, la adopción de nuevas técnicas y tecnologías constructivas y operativas referentes al agua es determinante para mejorar la eficiencia de esta actividad. En la actualidad se han experimentado cambios dirigidos a la forma de los tanques, a la recirculación del agua y al tratamiento de esta.

El uso de estas novedosas soluciones permite que se mejoren las técnicas de control sobre las condiciones ambientales, la alimentación y la cosecha pudiendo adoptar sistemas intensivos, en los cuales la densidad de población es alta y se requiere un suministro constante de agua limpia y oxigenada (FAO, 2024) (Oberdleck and Verreth, 2009), aunque generan un aumento en el consumo de agua y la contaminación del agua, pudiendo desequilibrar el ciclo hídrico local (Ovando, 2013).

El diseño con tanques de poca altura, ver figura 6 izq, se caracteriza por tener una profundidad máxima de 1 metro, lo que facilita el manejo de la especie cultivada y reduce el riesgo de escapes. Al ser de poca profundidad, la renovación del agua puede llevarse a cabo de manera más rápida y continua, lo cual permite mantener la calidad del agua para la vida de los peces. Estos deben proyectarse y operarse correctamente para evitar concentraciones altas de contaminantes y desechos, la proliferación de enfermedades, una inadecuada distribución de oxígeno, fundamentalmente a mayor profundidad, y de temperatura y el estrés de los organismos acuáticos y reducir la tasa de supervivencia.

Los de tipo mesa (Figura 6 der), son reconocidos por su forma cilíndrica y su fondo cónico. Su diseño permite el control sobre los factores como la temperatura, la calidad del agua, la dieta y la densidad de siembra. También facilita tanto el seguimiento como la recolección de los organismos cultivados, reduciendo la necesidad de instrumentos de pesca costosos y mano de obra intensiva.



Figura 6. Izq.: Tanques de poca altura. Der.: Tanques tipo mesa. (Tomado de <https://institutodelagua.es/acuicultura/tanques-de-acuicultura-tipo-mesaacuicultura>.)

En cuanto al ahorro de agua, se destaca la perspectiva de los sistemas de recirculación de agua en acuicultura (SRA), los cuales fueron desarrollados en 1950 en Japón y la primera vez que se propuso para la producción comercial de peces fue en Dinamarca en los años 70 del siglo pasado. Sus principales componentes se muestran en la figura 7 izq. Sin embargo, en los últimos 20 años han experimentado un crecimiento exponencial en cuanto a su diseño, construcción y operación. Han sido concebidos para criar peces en lugares donde las condiciones biofísicas son inadecuadas y existe escasez de agua, mala calidad del agua y un ambiente desfavorable (Murray et al. 2013).

En términos generales, el proceso comienza con la eliminación de los desechos sólidos. Posteriormente, el agua pasa por una etapa de filtración biológica donde las bacterias convierten los desechos de los peces en compuestos menos tóxicos. Seguidamente, el líquido se somete a un tratamiento de desinfección para eliminar patógenos antes de ser bombeada de regreso a los tanques de cultivo (Figura 7 der). De esta manera se reduce la dependencia del agua de fuentes externas y minimiza el impacto ambiental de la acuicultura (Sánchez, 2023).

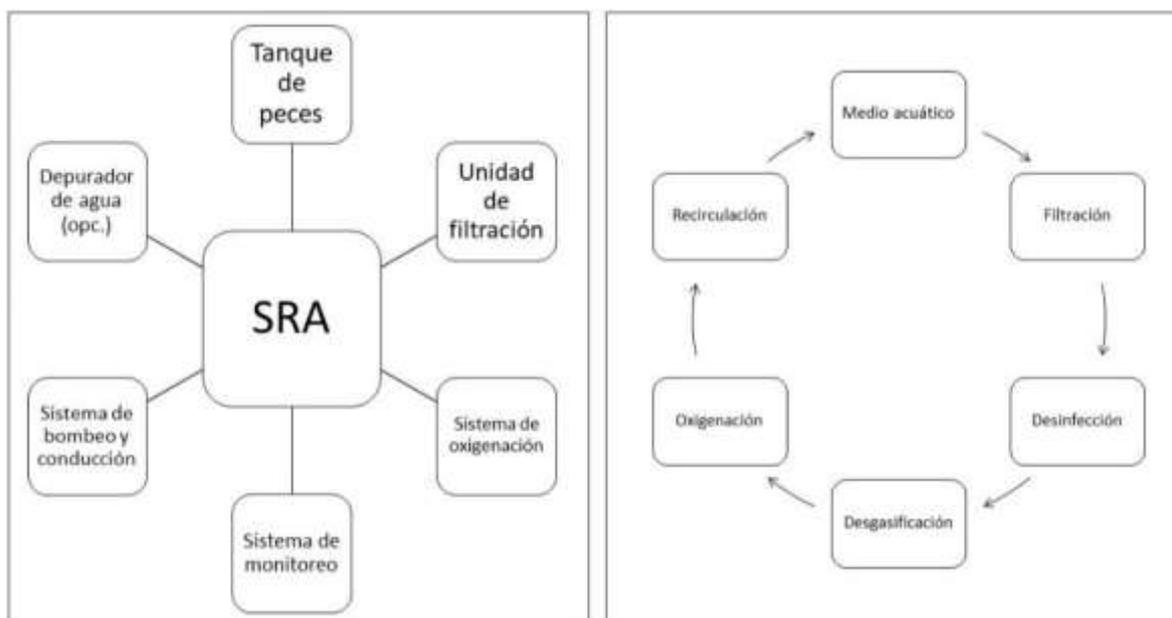


Figura 7. Izq.: Componentes. Der.: Proceso. Tomado de (Sánchez, 2023).

De manera general, se logra reutilizar hasta un 90 % total del agua, pues sólo se tienen pérdidas por evaporación y por la extracción de lodos sedimentados (Sánchez, 2023). Además, permiten un mayor control de las condiciones del agua y reducir la contaminación, por tanto, son favorables para lugares con escasez de agua o donde el agua es costosa. En cuanto a las desventajas, requiere un costo inicial

alto, requiere habilidades técnicas para su manejo y requieren una fuente constante de energía para su funcionamiento, lo que puede incrementar los costos operativos.

En cuanto al tratamiento del agua residual apareció en 1999 el sistema Biofloc, del inglés «floc», que significa 'grumo'. Este transforma los residuos en recursos deteniendo la proliferación de los productos de desechos y mejorando la calidad del agua. Los compuestos nitrogenados, el alimento no consumido y las heces de los peces se convierten en una fuente de alimento para una variedad de microorganismos (bacterias, algas, zooplancton) que forman los conglomerados conocidos como Biofloc. Estos son ricos en proteínas y otros nutrientes y pueden ser consumidos por los animales acuáticos, proporcionándoles una fuente adicional de alimento (Sánchez, 2023).

Por lo tanto, contribuye a la sostenibilidad de la acuicultura disminuyendo el riesgo de eutrofización y reduciendo la necesidad de intercambios frecuentes de agua, donde a menudo se requieren grandes volúmenes de agua minimizando así el riesgo de enfermedades y optimizando los costos operativos (López, 2023).

En este sentido y causando el mismo efecto, se han implementado soluciones en las que se pueden cultivar peces, moluscos y algas juntos, de manera que los residuos de una especie se convierten en alimento o fertilizante para otras. Estos sistemas son conocidos como Acuicultura Multitrófica Integrada. Dado sus beneficios ambientales y económicos y su relativa facilidad de implementación se pueden usar tanto en estanques como en jaulas, así como estar asociados a los SRA.

Respecto a los filtros, más recientemente, se han incorporado los biorreactores de membrana y los de micronización que son utilizados para eliminar partículas muy pequeñas en el agua, generalmente en un rango de 0,5 a 50 micras, los filtros que emplean luz ultravioleta para matar bacterias, virus y otros microorganismos y la ozonización.

Por otra parte, la sostenibilidad de esta actividad también se puede buscar en la integración con otras industrias, creando sistemas circulares que maximizan el uso de los recursos y minimizan los desechos. Cabe resaltar experiencias en el territorio cubano sobre la disminución del potencial contaminante de las aguas residuales de una empresa pesquera de la provincia de Granma mediante un sistema de tratamiento utilizando microalgas *Chlorella* sp. Los subproductos generados son de alto valor para la alimentación animal, la industria farmacéutica y del cosmético (Romero y Suárez, 2022).

## LA PRÁCTICA DE LA ACUICULTURA EN CUBA

En la actualidad el Grupo Empresarial de la Industria Pesquera (GEIP), perteneciente al Ministerio de la Industria Alimentaria (MINAL), con 32 empresas, es el encargado de la captura, industrialización y comercialización de recursos marinos y de estanques, cultivo de especies dulceacuícolas y de otros organismos acuáticos. De estas 21 tienen como misión la pesca extractiva y la acuicultura. En la figura 8 se muestra un gráfico de la distribución por provincias. Las mismas, a su vez, manejan unas 56 UEB, lo que demuestra que existe una distribución espacial a lo largo de todo el territorio.

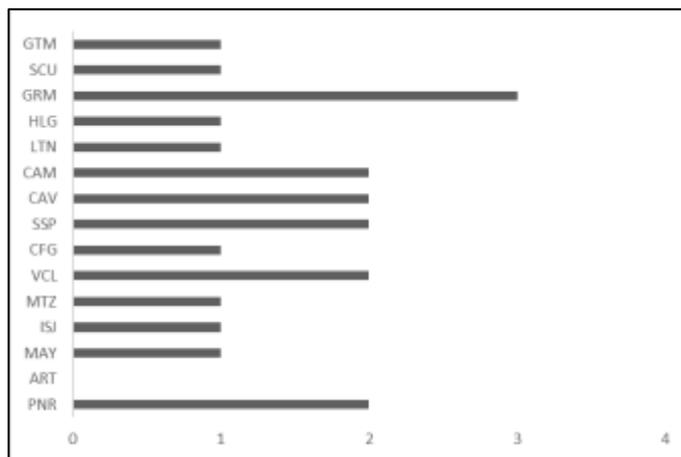


Figura 8. Distribución de las empresas pesqueras por provincias.

Desde el punto de vista económico, según datos del Anuario Estadístico de Cuba 2022 (ONEI,2022), elaborado por la Oficina Nacional de Estadística e Información (ONEI), la actividad pesquera representó aproximadamente un 6% en las exportaciones en el periodo 2016-2022, lo que equivale a más de 50 millones de dólares anuales (Figura 9).

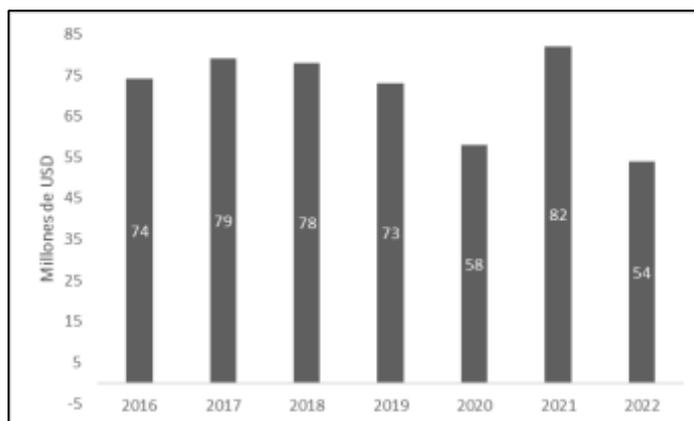


Figura 9. Exportación de la pesca en el periodo 2016-2022.

Un desglose de esta actividad arroja que la mayor parte de esta actividad productiva recae sobre la acuicultura respecto a la pesca de plataforma. Si bien la captura de peces y mariscos por ambas modalidades muestra una tendencia descendente (Figura 10) se manejan valores promedio del orden de las 37 900 toneladas por año (ONEI,2022).

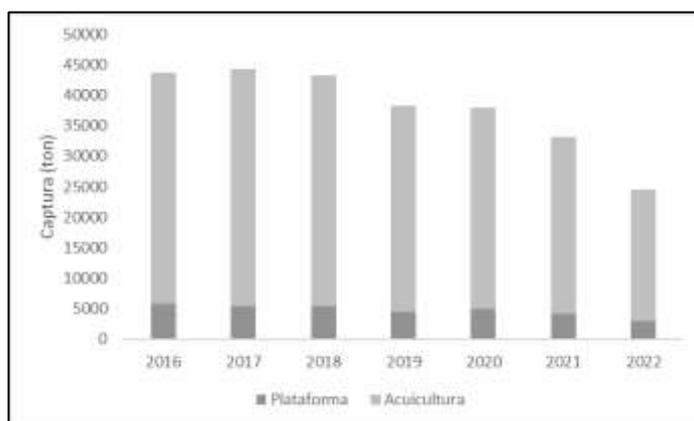


Figura 10. Captura de recursos pesqueros en el periodo 2016-2022.

Históricamente, la producción acuícola tomó mayor impulso desde el año 1968. Una experiencia de gran valor científico es narrada por el ingeniero hidráulico M.Sc. Basilio del Vallín Marcheco, uno de los autores de este artículo, cuando en el año 1989 se desempeñó como Jefe de Departamento de Obras Hidrotécnicas de la Empresa de Hidroeconomía de La Habana, sita en Humboldt y P.

Este describe la implementación de sistemas de acuicultura aguas abajo de la presa Mampostón mediante la colaboración internacional con Israel. Por la parte cubana participó la empresa CENPALAB, el Ministerio de la Pesca y el INRH como entidad proyectista. Antes de su construcción se realizó un modelo para evaluar el rendimiento de los estanques de acrílico con forma circulares y rectangulares. Las producciones alcanzadas a nivel de laboratorio no se correspondieron con los resultados reales debido, fundamentalmente, a la calidad del agua del embalse, la cual respondía al riego para la agricultura en el municipio Güira de Melena, a la vez que la fluctuación de los niveles de agua fue un factor modificador. Por su parte, el agua empleada en el estudio de laboratorio tenía un alto nivel de potabilidad.

Como alternativa de solución se implementaron variantes destacando la inyección de oxígeno líquido, la colocación de aireadores en zonas específicas del estanque alejadas de los peces. Esta última fue la que prevaleció y permitió incrementar la producción de alevinaje. A partir de la mejora la estación sirvió como fuente de abasto de alevines a otras empresas que se iniciaron en esta actividad. Las provincias más destacadas por aquel entonces fueron Pinar del Río, Granma y la Isla de la Juventud.

Para el año 2000 el país contaba con 1 538 embalses dedicados al cultivo y pesca de especies de agua dulce y desde 1984 se exportan los productos provenientes de esta. Desde el punto de vista legal, la norma jurídica que se impone es la LEY No. 129 “Ley de pesca”, aprobada el 13 de julio de 2019. En la misma se promueve la acuicultura sostenible como una actividad viable para contribuir a alcanzar la soberanía alimentaria de la nación.

En el primer Resuelvo se declaran los 51 embalses de interés para la pesca comercial estatal y de autoconsumo acuícola (ANPP,2019) (Figura 11) y en la figura 12 se muestra la relación por provincias.

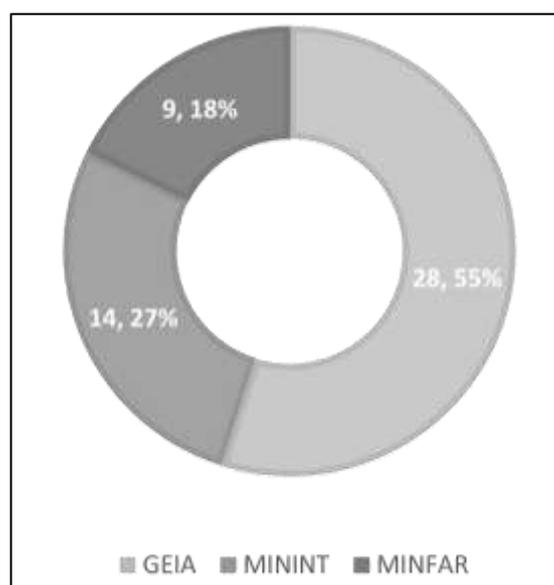


Figura 11. Cantidad de embalses por entidades autorizadas.

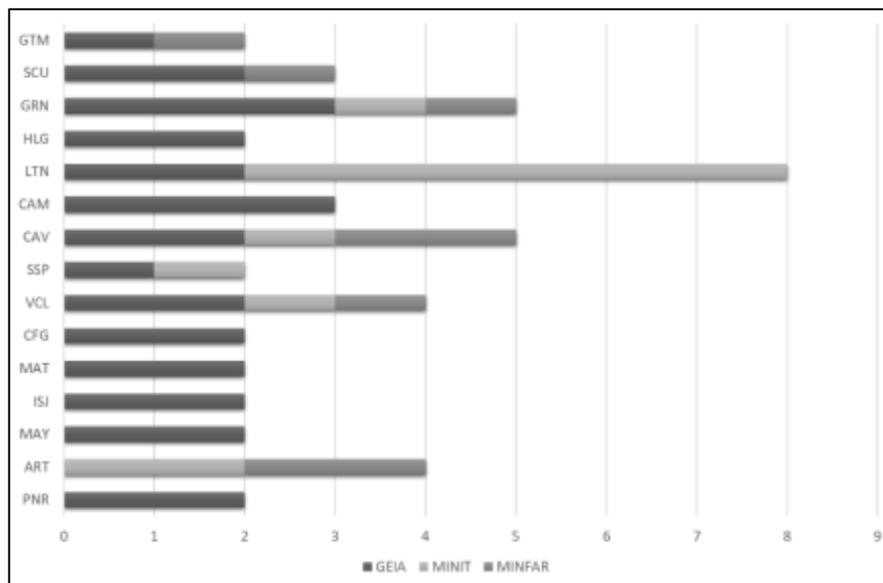


Figura 12. Cantidad de embalses destinados a la acuicultura por provincias y por organismos.

En la búsqueda bibliográfica realizada para este trabajo no se encontró ningún material que tratara con profundidad el desarrollo tecnológico de los sistemas de tratamiento de las aguas residuales en los sistemas de acuicultura. El punto central de la gran mayoría consiste en relacionar la acuicultura sostenible a través del manejo de las especies de peces cultivadas. Por lo que establecer el estado actual del tratamiento de las aguas residuales y la posible implementación de las nuevas tecnologías se hace una tarea compleja por la falta de información para consulta pública.

Por su parte, en 2021 un grupo de especialistas de Camagüey y La Habana realizaron un estudio de las tendencias para el sector pesquero para cinco provincias: Pinar del Río, Sancti Spíritus, Camagüey, Las Tunas y Granma (Puentes et al. 2021), en las que se encuentran ubicadas 10 de las 21 empresas de pesca. En el mismo se identificaron cuatro tendencias a ser consideradas para la caracterización de las empresas: los SRA, la producción ecológica acuícola, los cultivos acuapónicos y la aplicación de Biofloc. Como se puede apreciar, existe una total correspondencia con los aspectos tratados anteriormente y que existe el potencial para la implementación dentro del territorio nacional.

La necesidad de implementar la sostenibilidad de esta actividad también desde los recursos hídricos queda demostrada a partir del estudio de Eduardo Planos sobre la disponibilidad de los mismos para el 2030 (Planos, 2022). En este trabajo se evidencia una tendencia incremental a la reducción de los recursos hídricos potenciales en todo el país, lo cual afectará también a la acuicultura, que demanda gran cantidad de agua de no extenderse y masificarse el uso de las tecnologías antes mencionadas para garantizar la sostenibilidad o encontrar otros mecanismos como la captación de agua de lluvia para el abasto de agua.

### 03 CONCLUSIONES

Dado que la acuicultura es un sector importante para la seguridad alimentaria, la economía, la conservación de especies y la salud de los ecosistemas acuáticos aplicar técnicas científicas relacionadas con la recirculación y el tratamiento de las aguas es un factor clave para la sostenibilidad de la operación acuícola a partir de hacer un uso responsable de los recursos hidráulicos y minimizar el impacto ambiental.

En Cuba la producción acuícola encargada de aportar el 6% de las exportaciones y más de 50 millones de dólares anuales se verá seriamente afectada en los próximos años, poniendo en riesgo la

sostenibilidad de la actividad, debido a la reducción de los recursos hídricos potenciales de no implementarse las tecnologías modernas en los procesos de tratamiento de agua que permiten un sustancial ahorro de este recurso.

## 04 REFERENCIAS

- FAO** (2024) "El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2024. La transformación azul en acción". Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma. 249 p. 2024. ISBN 978-92-5-138817-4 [Citado: 16 de octubre de 2024] Disponible en <https://doi.org/10.4060/cd0683es>
- Oberdleck A. and Verreth J.** (2009) "Sustain Aqua—Integrated approach for a sustainable and healthy freshwater aquaculture". Informe de Proyecto Científico. Organización Productores Piscicultores, España. [Consultado el: 15 de octubre de 2024]. Disponible en: <https://it.scribd.com/document/349965335/SustainAqua-handbook-EN-pdf>
- Ovando M.** (2013) "La acuicultura y sus efectos en el medio ambiente". Espacio I+D Innovación más Desarrollo 2013, 2 (3), p. 61-80. ISSN 2007-6703. [Revisado: 20 de octubre de 2024] Disponible en: <https://doi.org/10.31644/IMASD.3.2013.a04>
- Murray F., Bostock J. and Fletcher D.** (2014) "Review of Recirculation Aquaculture System Technologies and Their Commercial Application". Informe final de proyecto. Stirling Aquaculture. Stirling, UK. 2014. [Consultado el: 15 de octubre de 2024]. Disponible en: <https://dspace.stir.ac.uk/handle/1893/21109>
- Sánchez M.** (2023) "Tecnologías para optimizar el agua en la acuicultura". Revista Nthe 2023, 41(1), pp. 19-26 ISSN: 2007-9079. [Revisado: 14 de octubre de 2024] Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/370466719>
- Beveridge M.C.M.** (1986) "Piscicultura en jaulas y corrales. Modelos para calcular la capacidad de carga y las repercusiones en el ambiente". Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. College of Fisheries, University of the Philippines, Filipinas, 100 p. 1986. ISBN: 92-5-302163-2 [Citado: 14 de octubre de 2024] Disponible en: <https://www.fao.org/4/AD021S/AD021S00.htm#TOC>
- López C.** (2023) "Caracterización de bioflocs en sistemas de acuicultura, bajo diferentes parámetros nutricionales, para la producción sostenible de langostinos". Tesis de Máster en Bioeconomía Circular y Sostenibilidad Área de Microbiología. Universidad de Córdoba, Argentina. 2023. [Consultado el: 20 de octubre de 2024] Disp en: <https://repositorio.ual.es/bitstream/handle/10835/16751/LOPEZ%20ORTEGA%2C%20CELIA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Romero T. y Suarez G.** (2022) "Uso sostenible del agua residual de la pesca a partir del cultivo de microalgas. Caso de estudio EPIGRAN". Revista Ingeniería Hidráulica Ambiental 2022, XLIII(2), p. 17-28 ISSN 2788-6050. [Revisado: 15 de octubre de 2024] Disponible en: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1680-03382022000200017](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382022000200017)
- ONEI** (2022) Anuario estadístico de Cuba. Oficina Nacional de Estadística e Información. Cuba. 2022. [Consultado el 10 de octubre de 2024]. Disponible en: <https://www.onei.gob.cu/anuario-estadistico-de-cuba-2022>
- ANPP** (2019) Ley No. 129/2019 "Ley de Pesca". Asamblea Nacional del Poder Popular. Cuba. 2020. [Consultado el 10 de octubre de 2024]. Disponible en:

<https://www.parlamentocubano.gob.cu/sites/default/files/documento/2022-01/Ley%20de%20Pesca.pdf>

**Puentes L., Loredo N.A. y Garrigó L.** (2021) “Estudio de tendencias para el sector pesquero en Cuba”. Revista Retos de la Dirección 2021, 15(suplemento), p. 147-165 ISSN 2306-9155 [Revisado: 18 de octubre de 2024] Disponible en: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2306-91552021000300147](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2306-91552021000300147)

**Planos E.** (2022) “Aproximación a los recursos hídricos potenciales en 2030”. Revista Ingeniería Hidráulica Ambiental 2022, XLIII (1), p. 48-62 ISSN 2788-6050. [Revisado: 17 de octubre de 2024] Disponible en: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1680-03382022000100048](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382022000100048)

### CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

### CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

**Yudeimys Ymas Dávila** <https://orcid.org/0000-0002-0899-3241>

Realizó contribuciones en la búsqueda de información sobre la acuicultura y alimentación a nivel internacional, indicadores de sostenibilidad y el estado actual de la acuicultura en Cuba. También realizó aporte en la revisión del documento.

**Darlén Goiburo Cordero** <https://orcid.org/000-0001-9386-6038>

Realizó contribuciones en la búsqueda de información sobre los sistemas tradicionales de acuicultura y los recursos hidráulicos.

**Ronnie Torres Hugues** <https://orcid.org/0000-0002-7206-6346>

Realizó contribuciones en la búsqueda de información y redacción del documento final.

**Basilio del Vallín Marcheco** <https://orcid.org/0009-0003-1589-6743>

Realizó contribuciones relacionadas con los sistemas tradicionales de acuicultura y experiencias en la construcción de estanques para acuicultura. También realizó aporte en la revisión del documento.

## Llenado y/o vaciado de depósitos en sistemas fuentes por bombeo. Parte II.

**Yaset Martínez Valdés**

E-MAIL: yaset1977@gmail.com

Profesional independiente

**David Ernesto Marón Domínguez**

E-MAIL: dmaron@cemat.cujae.edu.cu

Centro de Estudios de Matemáticas (CEMAT), Instituto de Ciencias Básicas (ICB),  
Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", Cujae, La Habana.

### RESUMEN

En el presente trabajo se propone una metodología de cálculo para determinar los tiempos de llenado y/o vaciado de los depósitos en los sistemas fuente por bombeo. La misma, se centra en la resolución de un modelo analítico que tiene en cuenta las principales variables hidráulicas que caracterizan tres tipologías de diseño y operación en dichos sistemas. El mismo, se implementa en la plataforma de programación y cálculo numérico MATLAB versión R2015a para los tres casos de diseño descritos. El procedimiento analítico se emplea en la resolución de dos ejemplos prácticos reportados en la literatura comprobando la validez del mismo.

### PALABRAS CLAVES:

Llenado, vaciado, depósitos, sistemas fuentes, bombeo

## Filling and/or emptying of tanks in pump source systems. Part II.

### ABSTRACT

This paper proposes a calculation methodology to determine the filling and/or emptying times of reservoirs in pumped source systems. It focuses on the resolution of an analytical model that takes into account the main hydraulic variables that characterize three types of design and operation in these systems. It is implemented in the programming and numerical calculation platform MATLAB version R2015a for the three design cases described. The analytical procedure is used in the resolution of two practical examples reported in the literature, verifying its validity.

**KEYWORDS:** Filling, emptying, tanks, source systems, pumping

## 01 INTRODUCCION

Una de las características fundamentales de los modelos de análisis de redes hidráulicas es la presencia de la variable temporal. Así, el objetivo de un modelo no es únicamente obtener los valores de las variables significativas (como las presiones en nudos, velocidades y caudales en las tuberías) sino que se busca la obtención de la variación a lo largo del tiempo de éstas. Así, atendiendo a la presencia o no de la variable temporal, los modelos de análisis se pueden clasificar en: modelos de análisis estático también denominados modelos de análisis en régimen permanente; y los modelos de análisis dinámico, comúnmente designados como modelos de análisis en régimen transitorio (De Eça Guimaraes et al. 2012).

La determinación de los tiempos de llenado y/o vaciado de los depósitos en los sistemas fuente por bombeo es uno de los aspectos que amerita ser estudiado por varios enfoques. Martínez y Marón (2023) abordan este problema mediante la propuesta de una metodología de cálculo para determinar los tiempos de llenado y/o vaciado de los depósitos en los sistemas fuente por bombeo. La misma, se centra en la resolución de un modelo de cálculo discreto que tiene en cuenta las principales variables hidráulicas que caracterizan tres esquemas o casos de diseño y operación en dichos sistemas. Se presentan dos modelos de cálculo de enfoque discreto en función de la altura y el tiempo, los cuales se implementan en el sistema de cómputo numérico MATLAB versión R2015a para la comparación de diferentes variantes de los esquemas de diseño descritos. Ambos procedimientos analíticos se emplean en la resolución de un ejemplo práctico donde se ilustran los tres casos de operación para distintas variantes y alternativas de cálculo.

En el presente trabajo se propone una metodología de cálculo para determinar los tiempos de llenado y/o vaciado de los depósitos en los sistemas fuente por bombeo, en este caso, basada en la resolución de un modelo de cálculo analítico. La misma, tiene en cuenta las principales variables hidráulicas que caracterizan tres casos de diseño y operación con amplia presencia en la práctica de los sistemas fuentes por bombeo. Estos pueden ser descritos a partir de un esquema de diseño típico (esquemático según la dirección del flujo): fuente de abasto (depósito de succión de sección regular uniforme) → tubería(s) de succión (válvulas, accesorios, etc. se incluyen mediante su longitud equivalente característica) → estaciones de bombeo (bomba(s) de iguales o diferentes características hidráulicas) → tubería(s) de impulsión (válvulas, accesorios, etc. se incluyen mediante su longitud equivalente característica) → depósito de descarga (regulación o de compensación de sección regular uniforme con entrada libre y/o forzada con cota de entrega fija) (Martínez 2011).

El modelo de cálculo de enfoque analítico se implementa en la plataforma de programación y cálculo numérico MATLAB versión R2015a para la comparación de diferentes variantes de los esquemas descritos. La metodología se emplea en los tres casos de operación a partir de distintas variantes y alternativas de cálculo que reflejan datos reales de las instalaciones de los esquemas descritos. Debido a que este tema no ha sido abordado con profundidad en la literatura, y debido al gran interés que presenta en el análisis y simulación de los sistemas fuente por bombeo, es que se ha decidido abordar esta temática en el presente trabajo.

## 02 DESARROLLO

A partir de un esquema típico de diseño definido, se pueden describir cuatro casos de estudio, los cuales mantienen la misma tipología de diseño, variando solamente las condiciones hidráulicas y de operación de dichas instalaciones. Para los objetivos que se pretenden exponer en este trabajo, el desarrollo de la metodología de cálculo se realiza solamente para los casos 2, 3 y 4, ya que el caso 1,

al mantenerse constante el gasto de bombeo en el tiempo, este puede obtenerse mediante la ecuación de aforo volumétrico. Los cuatro casos de estudio son los siguientes (Martínez y Marón 2023):

**Caso 1:** La entrada de agua al depósito de descarga es por la parte superior de este (entrega libre con cota fija), donde se succiona de un depósito en el cual se considera que el nivel de agua se considera fija (nivel en la succión no varía en el tiempo) (véase figura 1). En términos de operación, este es el único caso en el cual se mantiene constante el gasto de bombeo a lo largo del tiempo

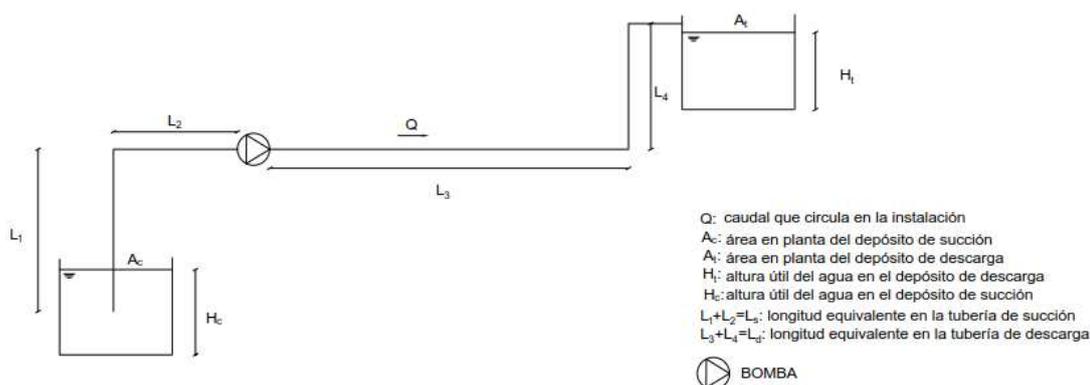


Figura 1. Esquema de diseño y operación de los Casos 1 y 3 (Fuente: Martínez y Marón 2023)

**Caso 2:** La entrada de agua al depósito de descarga es por la parte inferior de este (entrega forzada con cota fija) y el nivel del agua en el depósito de succión no varía en el tiempo. Este esquema de operación afecta en el gasto que entrega la bomba durante todo el intervalo de llenado del depósito de descarga (véase figura 2). Para este caso, el objetivo es calcular el tiempo de llenado del depósito de descarga,  $t_{ll}$

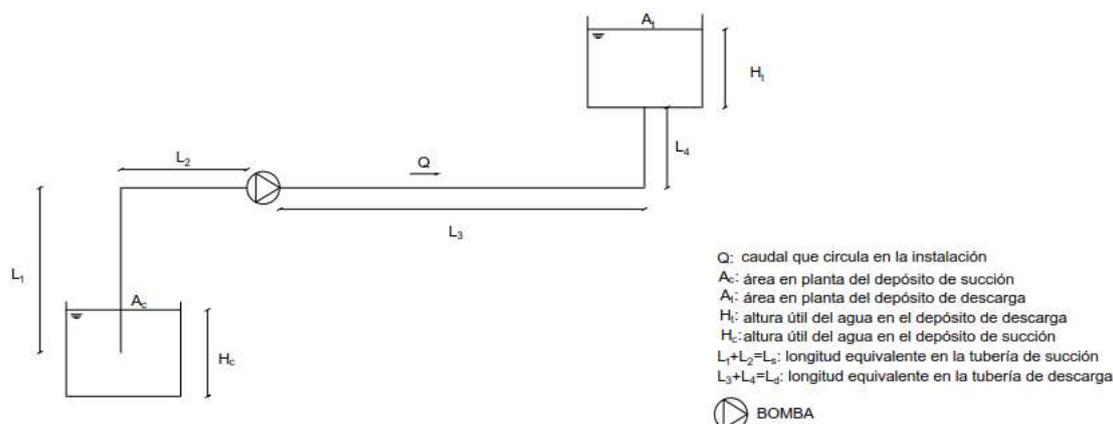


Figura 2. Esquema de diseño y operación de los Casos 2 y 4 (Fuente: Martínez y Marón 2023)

**Caso 3:** La entrada de agua al depósito de descarga es por la parte superior (entrega libre con cota fija) a la vez que disminuye el nivel en el depósito de succión producto del bombeo. Este esquema de operación afecta en el gasto que entrega la bomba durante todo el intervalo de vaciado del depósito de succión (véase figura 1). Para este caso, el objetivo es calcular el tiempo de vaciado del depósito de succión,  $t_v$

**Caso 4:** La entrada de agua al depósito de descarga es por la parte inferior (entrega forzada con cota fija) a la vez que varía el nivel en el depósito de succión. Este esquema de operación implica que, a medida que se llena el depósito de descarga se vacía el de succión, lo cual repercute en el gasto que entrega la bomba, el cual se reduce en el tiempo, en este caso, por el “doble efecto” de la entrada

forzada al depósito de descarga y la disminución gradual en el tiempo del nivel del agua en el depósito de succión (véase figura 2). Para este caso es evidente que el tiempo de llenado y vaciado de ambos depósitos es el mismo, por lo cual basta con solo calcular uno de ellos,  $t_{ll}$  o  $t_v$ .

## METODOLOGÍAS DE CÁLCULO PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS TIEMPOS DE LLENADO Y/O VACIADO DE LOS DEPÓSITOS EN LOS SISTEMAS FUENTE POR BOMBEO

Cómo se ha apuntado, este es un tema que no cuenta con mucha divulgación en la literatura. Por ese motivo, Martínez y Marón (2023) consideraron conveniente abordarlo desde la óptica de dos modelos discretos de solución que arrojan el mismo resultado práctico, dependiendo del objetivo que se plantee. El objetivo del trabajo se centró en la elaboración de dos algoritmos para el cálculo de los tiempos de llenado y/o vaciado de los depósitos en los sistemas fuente por bombeo, basados en dos modelos discretos en función de las variables altura y tiempo, los cuales son implementados mediante la herramienta MATLAB versión R2013b. Como antecedente a este trabajo, Arias (2015), utilizando el método discreto en función de la altura, logra proponer un algoritmo de cálculo para determinar el tiempo de llenado de un tanque de compensación con entrada sumergida.

Una variante de cálculo más próxima a la que se propondrá en este trabajo, es la planteada por Hernández et al. (2016), los cuales proponen una ecuación para determinar el tiempo de llenado de un depósito en un sistema de bombeo sencillo. El esquema de diseño se puede apreciar en la figura 3. Como hipótesis para la deducción de la ecuación de resolución, se plantean: depósito de descarga vacío para  $t = 0$ ; este depósito y el de succión tienen sección regular y constante en planta (área rectangular) y ambos están abiertos a la atmósfera; la superficie libre del agua en el cárcamo de bombeo está al mismo nivel que el fondo del depósito que se llena; y se considera que la entrega al tanque de descarga es por la parte inferior del mismo (Caso 2). En dependencia a estos datos, se determina el tiempo de llenado de este depósito para una altura del tanque  $h$ , utilizando una ecuación en un modelo analítico propuesto por los autores.

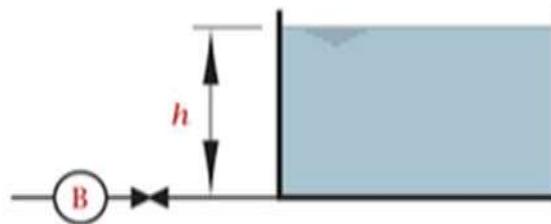


Figura 3. Esquema de la instalación del tanque y la bomba (Fuente: Hernández et al. 2016)

Por su parte, Gómez y Hernández (2016), trabajan con una instalación un poco más compleja, pero que, a efectos del cálculo del tiempo de llenado del depósito de descarga, es idéntico al caso anterior, con las mismas hipótesis de cálculo. En este ejemplo, trabajan dos bombas rotodinámicas idénticas dispuestas en paralelo, lo cual se deduce para los cálculos como una bomba equivalente a ambas bombas. Se conocen, además, que las tuberías tienen el mismo diámetro y la misma rugosidad relativa.

En la figura 4 se muestran los valores de las longitudes de las tuberías y los coeficientes de pérdidas de carga en las válvulas (cuando están totalmente abiertas). Para este esquema de diseño se determina el tiempo de llenado de este depósito para una altura del tanque  $h$ , utilizando una ecuación en un modelo analítico propuesto por los autores. Sobre ambos ejemplos y la ecuación analítica que proponen y sus hipótesis de cálculo volveremos más adelante.

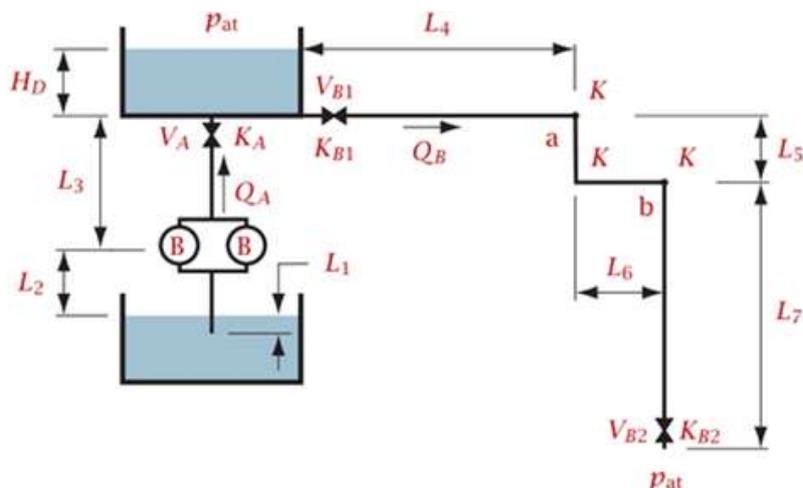


Figura 4. Esquema de la instalación del tanque y la bomba en paralelo (Fuente: Gómez y Hernández 2016)

## ALGORITMO DEL MODELO ANALÍTICO PARA LOS TRES CASOS DE ESTUDIO

El modelo analítico consiste en, a partir de la ecuación de Continuidad, obtener mediante integraciones el tiempo de llenado y/o vaciado de los depósitos en diferentes casos de estudio. Este método, al contrario del discreto, proporciona una solución directa sin iteraciones. El desarrollo de estos algoritmos se realiza para los casos de estudio 2, 3 y 4, ya que el Caso 1, como se ha apuntado, al tener fija la cota de entrega de la tubería en el depósito de descarga, el tiempo de llenado se calcula de forma sencilla por aforo volumétrico (Ballart 2018).

### Caso 2

Para el planteamiento del Caso 2, haciendo alusión a la figura 1, se tiene que el depósito elevado, de área en planta  $A_t$  ( $m^2$ ), se llena con una bomba con características hidráulicas conocidas (para el tema a tratar, será suficiente con conocer el polinomio representativo de la curva  $Hvs.Q$ ) que toma agua desde un depósito de succión de área en planta  $A_c$ . La conducción tiene un diámetro  $D_c$  y una longitud equivalente  $L_c$ . En este caso, el nivel del cárcamo de bombeo no varía con el tiempo, es decir, se considera constante la cota de succión  $Z_s$ . Se trata para esta variante, de calcular el tiempo de llenado,  $t_{II}$  del tanque de descarga, en alcanzar una determinada altura,  $h$ .

Como es conocido, la variación del nivel en un depósito viene dada por la representación en el formato de ecuación diferencial ordinaria de la ecuación de Continuidad (principio de conservación de la masa) (Fuertes et al. 2007) (Martínez y Marón, 2023):

$$Qdt = A_t dh_t \quad (1)$$

Donde:  $Q$ : caudal entrante o saliente al/del depósito (caudal que impulsa la(s) bomba(s)), ( $m^3/s$ );  $dh_t$ : diferencial con respecto al tiempo de llenado o vaciado del depósito, (s);  $A_t$ : sección en planta del depósito, ( $m^2$ ) y  $dh_t$ : diferencial respecto al nivel del agua en el depósito, (m).

A continuación, se aplica la ecuación de Bernoulli (principio de conservación de la energía), sustituyendo en esta el polinomio representativo de la curva característica  $Hvs.Q$  de la bomba, obteniéndose:

$$Z_s + H_B = Z_t + hf_c = Z_s + A + BQ + CQ^2 = Z_t + KQ^2 \quad (2)$$

Donde:  $Z_s$ : cota de nivel del agua en el depósito de succión, (m);  $H_B$ : carga de la bomba, (m);  $Z_t$ : cota de nivel del agua en el depósito de descarga, (m);  $hf_c$ : pérdidas de carga en la conducción, (m);  $K$ : coeficiente característico de la conducción para un instante,  $t$ , ( $s^2/m^5$ );  $A$ : coeficiente del polinomio representativo de la curva  $Hvs.Q$  que define el valor de la carga que desarrolla la bomba para caudal cero, (m);  $B$ : coeficiente del polinomio característico de la curva  $Hvs.Q$  que depende de la geometría del diseño de la bomba, ( $s/m^2$ ), y  $C$ : coeficiente del polinomio específico de la curva  $Hvs.Q$  que está en función de las pérdidas de carga en el interior de la bomba, ( $s^2/m^5$ ).

Arreglando los términos de la ecuación (2) e igualando a cero, se obtiene:

$$(C-K)Q^2 + BQ + Z_s + A - Z_t = 0 \quad (3)$$

Introduciendo la sustitución del valor de la cota del agua en el tanque de descarga,  $Z_t$  como la suma:  $Z_{t0} + h_t$ , se obtiene el gasto por el teorema de Cardano-Vieta (se toma la solución positiva obviamente):

$$Q = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4(C-K)(Z_s + A - Z_{t0} - h_t)}}{2(C-K)} \quad (4)$$

Donde:  $Z_{t0}$ : cota del nivel del agua en el depósito de descarga para  $t = 0$ , (coincidiría con el nivel de la solera del tanque si este se encontrara vacío) (m), y  $h_t$ : altura del agua en el depósito de descarga para un tiempo  $t$ , (m).

El valor del coeficiente característico de la conducción se calculará por la expresión:

$$K = 0,0826f \frac{L_{eq}}{D^5} \quad (5)$$

Donde:  $K$ : coeficiente característico de la conducción para un instante  $t$ , ( $s^2/m^5$ );  $f$ : coeficiente de fricción de la tubería determinado por la fórmula de Swamee-Jain para un instante  $t$ , (adim.), (adim.);  $L_{eq}$ : longitud equivalente del sistema, (m) y  $D$ : diámetro interior de la tubería, (m).

Como se apuntó, el coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach se determinará por la ecuación de Swamee-Jain:

$$f = \frac{0,25}{\left[ \log \left( \frac{\epsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{N_R^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (6)$$

Donde:  $f$ : coeficiente de fricción de la tubería, (adim.);  $\epsilon$ : rugosidad absoluta asociada al material de la tubería, (m);  $D$ : diámetro interior de la tubería, (m) y  $N_R$ : número de Reynolds que caracteriza el flujo en la conducción, (adim.).

$$N_R = \frac{vD}{\nu} = \frac{4Q}{\pi D \nu} \quad (7)$$

Donde:  $N_R$ : número de Reynolds que caracteriza el flujo en la conducción para un instante  $t$ , (adim.);  $v$ : velocidad media de circulación en la tubería para un instante  $t$ , (m/s);  $D$ : diámetro interior de la tubería, (m);  $\nu$ : viscosidad cinemática del fluido (se considera que no cambie con el tiempo), ( $m^2/s$ ) y  $Q$ : caudal de circulación en la conducción para un instante  $t$ , ( $m^3/s$ ).

Para cualquier instante  $t$  y altura del nivel del agua en el depósito de descarga,  $ht$  o succión,  $hs$ , según sea el caso, se puede determinar el gasto a través de la ecuación (4) siguiendo un proceso iterativo en función de  $f$  (Martínez y Marón 2023):

1. Suponer un valor inicial de  $f_s$
2. Calcular  $K$  a través de la expresión (5)
3. Calcular  $Q$  por la ecuación (4)
4. Calcular el nuevo valor de  $f_c$  a partir de  $Q$  obtenido en el paso anterior
5. Comparar el valor de  $f_c$  con el valor supuesto en el primer paso,  $f_s$ , teniendo en cuenta un error relativo de parada,  $\xi_r \leq 1\%$ . Si esta condición no se cumple debe repetirse la rutina de cálculo hasta garantizar su consecución.

Sustituyendo la ecuación (4) en la ecuación (1) se obtiene:

$$\frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4(C-K)(Z_s + A - Z_{t0} - h_t)}}{2(C-K)} dt = A_t dh_t \quad (8)$$

Integrando con respecto al tiempo se obtiene:

$$t = 2(C-K) A_t \int \frac{dh_t}{\sqrt{B^2 - 4(C-K)(A - Z_{t0} + Z_s - h_t) - B}} \quad (9)$$

Para integrar el miembro derecho de la ecuación (9) con más comodidad, se ajustan términos para concentrarlos en dos variables auxiliares, quedando:

$$a = B^2 - 4(C-K)(A - Z_{t0} + Z_s) \text{ y } b = 4(C-K) \quad (10)$$

Acoplando ambos términos en la ecuación (9) se consigue:

$$t = 2(C-K) A_t \int \frac{dh_t}{\sqrt{a + b h_t - B}} \quad (11)$$

Realizando la operación matemática de cambio de variable:

$$a + b h_t = u^2 \quad (12)$$

Por lo tanto:

$$b dh_t = 2u du \rightarrow dh_t = \frac{2u}{b} du \quad (13)$$

Se obtiene la ecuación (11) con un nuevo formato:

$$t = 2(C-K) A_t \int \frac{(2u/b) du}{u - B} = \frac{4}{b} (C-K) A_t \int \left( \frac{u - B + B}{u - B} \right) du \quad (14)$$

Se divide la integral por partes e integrando, queda la expresión:

$$t = \frac{4}{b} (C-K) A_t \left[ \int du + B \int \frac{du}{u - B} \right] = \frac{4}{b} (C-K) A_t [u + B \ln |u - B|] + C_i \quad (15)$$

Donde:  $C_i$ : es la constante de integración, (s).

Volviendo a introducir las ecuaciones agrupadas en (10), en la expresión (15), se obtiene:

$$t = \frac{4}{b} (C-K) A_t \left[ \sqrt{a + b h_t} + B \ln \left| \sqrt{a + b h_t} - B \right| \right] + C_i \quad (16)$$

Para calcular la expresión que constituye la constante de integración, se sustituyen en la ecuación (16) valores conocidos de las variables, para este caso, se toman los datos iniciales:  $t = 0$ ;  $h_t = 0$ ;  $Z_t = Z_{t0}$  y  $K = K_0$  (para el caso cuando el depósito de descarga está vacío para  $t = 0$ ).

$$C_i = -A_t [\sqrt{a_0} + B \ln |\sqrt{a_0} - B|] \quad (17)$$

Finalmente, sustituyendo las variables auxiliares y la constante  $C_i$ , se obtiene como resultado la ecuación (18) para calcular el tiempo de llenado,  $t_{ll}$  del depósito de descarga para el Caso 2:

$$t_{ll} = A_t ([\sqrt{a + bh_t} + B \ln |\sqrt{a + bh_t} - B|] - [\sqrt{a_0} + B \ln |\sqrt{a_0} - B|]) \quad (18)$$

Como caso particular, se tiene la situación de que el coeficiente característico  $B$ , de la curva carga-capacidad, toma un valor cero. Esto sucede para bombas rotodinámicas con una velocidad específica,  $N_q$  entre 53 a 57 (Martínez 2011). Se debe deducir que la resolución será más sencilla que la solución general, pero por lo importante de la comparación que se realizará más adelante, se realiza su desarrollo analítico. Asumiendo  $B = 0$ , la ecuación (3) quedaría como:

$$Z_s + A + CQ^2 = Z_t + KQ^2 \quad (19)$$

Despejando  $Q$  y se obtiene directamente:

$$Q = \sqrt{\frac{Z_s - A + Z_t}{C - K}} = \frac{\sqrt{Z_s + A - (Z_{t0} + h_t)}}{\sqrt{K - C}} \quad (20)$$

Haciendo uso de la ecuación (1) despejada en  $t$  queda:

$$t = A_t \int \frac{1}{Q} dh_t = A_t \sqrt{K - C} \int \frac{1}{\sqrt{Z_s + A - Z_t}} dh_t = A_t \sqrt{K - C} \int \frac{1}{\sqrt{A - Z_{t0} + Z_s - h_t}} dh_t \quad (21)$$

Integrando se obtiene:

$$t = -2A_t \sqrt{K - C} \sqrt{A - Z_{t0} + Z_s - h_t} + C_i \quad (22)$$

Para encontrar la expresión de la constante de integración,  $C_i$  se trabajan con los datos iniciales:  $t = 0$ ;  $h_t = 0$  y  $K = K_0$ :

$$C_i = 2A_t \sqrt{K_0 - C} \sqrt{A - Z_{t0} + Z_s} \quad (23)$$

El resultado de la constante de integración,  $C_i$  se introduce en la ecuación (22):

$$t = 2A_t (\sqrt{K_0 - C} \sqrt{A - Z_{t0} + Z_s} - \sqrt{K - C} \sqrt{A - Z_{t0} + Z_s - h_t}) \quad (24)$$

### Caso 3

El funcionamiento del Caso 3 se corresponde con la figura 2, donde para este caso, el nivel de la descarga en el depósito de descarga,  $Z_t$ , será constante a medida que, el nivel de agua de la cisterna o depósito de succión,  $Z_s$  baja a medida que pasa el tiempo por la extracción de agua. Para este caso, lo que se pretende calcular es el tiempo en cual se vacía el cárcamo de bombeo,  $t_v$ , independientemente de que nivel de llenado alcance el depósito de descarga. Matemáticamente, esta variante de operación es análoga al Caso 2.

De esta forma se puede llegar a la ecuación (25) repitiendo los pasos de las ecuaciones (1) a la (8) del Caso 2, obteniéndose:

$$t = 2(C + K)A_c \int \frac{dh_c}{\sqrt{B^2 - 4(C - K)(A - Z_t + Z_{s0} - h_c) - B}} \quad (25)$$

Adoptando nuevas variables complementarias para este caso:

$$d = B^2 - 4(C - K)(A - Z_t + Z_{s0}) \text{ y } e = 4(C - K) \quad (26)$$

La ecuación (25) queda:

$$t = 2(C - K) A_t \int \frac{dht}{\sqrt{d + e ht - B}} \quad (27)$$

Se encamina todo el procedimiento igual al que se hizo en el Caso 2 obteniéndose:

$$t = A_c \left[ \sqrt{d + eh_c} + B \ln \left| \frac{\sqrt{d + eh_c} - B}{\sqrt{d_0} - B} \right| \right] + C_i \quad (28)$$

La constante de integración para este caso se calcula tomando las condiciones de partida:  $t = 0$ ;  $h_c = 0$  y  $Z_s = Z_{s0}$ . De esta forma se obtiene:

$$C_i = -A_c \left[ \sqrt{d_0} + B \ln \left| \frac{\sqrt{d_0} - B}{\sqrt{d_0} - B} \right| \right] \quad (29)$$

Donde:  $d_0 = B^2 - 4(C - K_0)(A - Z_t + Z_{s0}) \quad (30)$

De esta forma la expresión general para determinar el tiempo de vaciado,  $t_v$ , quedaría como:

$$t_v = A_c \left( \left[ \sqrt{d + eh_c} + B \ln \left| \frac{\sqrt{d + eh_c} - B}{\sqrt{d_0} - B} \right| \right] - \left[ \sqrt{d_0} + B \ln \left| \frac{\sqrt{d_0} - B}{\sqrt{d_0} - B} \right| \right] \right) \quad (31)$$

Para el caso particular de cuando el coeficiente  $B$  es cero, se procede de igual forma que para el caso 2, obteniéndose la ecuación:

$$t_v = 2A_c \left( \sqrt{K_0 - C} \sqrt{A - Z_t + Z_{s0}} - \sqrt{K - C} \sqrt{A - Z_t + Z_{s0} - h_c} \right) \quad (32)$$

#### Caso 4

El funcionamiento hidráulico-matemático de este caso son la conjunción de los casos 2 y 3 que se puede apreciar en la figura 2. En este caso, a medida que se llena el depósito de descarga, se va vaciando el de succión. A partir de esta definición, se plantea la igualdad:  $V_t = V_c$ , donde el volumen extraído de la cisterna termina bombeado hacia el tanque de descarga, lo cual conduce a:  $A_c h_c = A_t h_t$ . A partir de esta igualdad de conservación de la masa en el tiempo, se pueden obtener dos expresiones, las cuales, pueden ser usadas indistintamente en este caso, en función de lo que se pretenda calcular:

$$h_c = \frac{A_t}{A_c} h_t = f h_t \text{ ó } h_t = \frac{A_c}{A_t} h_c = g h_c \quad (33)$$

Siguiendo los pasos de las ecuaciones (1) a la (8) del Caso 2, y trabajando con la ecuación (33) en función de  $h_t$  se obtiene:

$$t = 2(C - K)A_t \int \frac{dh_t}{\sqrt{B^2 - 4(C - K)(A - Z_{t0} + Z_{s0} - h_t(1 + f)) - B}} \quad (34)$$

Repitiendo los pasos del algoritmo establecidos para los casos anteriores, y declarando la variable  $M = 1 + f$ ; evaluando la constante de integración,  $C_i$  para los datos iniciales:  $t = 0$ ,  $h_t = 0$ ,  $h_c = 0$ ,  $Z_t = Z_{t0}$  y  $Z_s = Z_{s0}$ , se obtiene el tiempo de llenado del depósito de descarga:

$$t_{II} = \frac{A_t}{M} \left( \left[ \sqrt{a + bMh_t} + B \ln \left| \sqrt{a + bMh_t} - B \right| \right] - \left[ \sqrt{a_0} + B \ln \left| \sqrt{a_0} - B \right| \right] \right) \quad (35)$$

Siendo en este caso las variables auxiliares definidas como:  $a = B^2 - 4(C - K)(A - Z_{t0} + Z_{s0})$ ;  $b = 4(C - K)$  y  $a_0 = B^2 - 4(C - K_0)(A - Z_{t0} + Z_{s0})$ .

Para la variante particular de  $B = 0$ , la expresión resultante es:

$$t_{II} = \left( \frac{2A_t}{M} \right) \left( \sqrt{K_0 - C} \sqrt{A - Z_{t0} + Z_{s0}} - \sqrt{K - C} \sqrt{A - Z_{t0} + Z_{s0} - Mh_t} \right) \quad (36)$$

Como se puede observar, las ecuaciones resultantes para calcular los tiempos de bombeo: tiempo de llenado,  $t_{II}$  (ecuaciones (17) y (24) para el Caso 2), tiempo de vaciado,  $t_v$  (ecuaciones (31) y (32) para el Caso 3) y tiempo de llenado o vaciado según el enfoque (ecuaciones (35) y (36) para el Caso 4) tienen un formato similar. Para ilustrar el desarrollo de la metodología de cálculo se realizará la validación de los algoritmos desarrollados, a partir de dos problemas resueltos en la literatura reportados por Hernández et al. (2016) y Gómez y Hernández (2016) que corresponden, ajustándolos a los algoritmos planteados anteriormente, a un modelo analítico para el Caso 2. Se ha procurado mostrar un ejemplo práctico sencillo para garantizar una mejor comprensión del procedimiento analítico. Para la resolución del mismo se ha empleado el software MATLAB versión R2015a.

## CÁLCULO DEL TIEMPO DE LLENADO DE UN DEPÓSITO EN UN SISTEMA FUENTE POR BOMBEO.

Para la resolución del primer problema, descrito anteriormente y cuyo esquema se ilustra en la figura 3 se tienen los siguientes datos y condiciones que modelan la solución. La bomba deberá llenar un depósito que se encuentra inicialmente vacío, con una sección horizontal en planta de área  $A$ . Se conoce además que la tubería de aspiración toma el agua desde un depósito abierto a la atmósfera, en el que la superficie libre del agua en el depósito de succión está al mismo nivel que el fondo del depósito que se llena, se conoce que la entrada del agua es por la parte inferior del mismo (Caso 2).

De las características de dicha instalación se determina el tiempo necesario para que el líquido alcance en el depósito una altura  $h$  (m), conocidos los datos:  $H_0 = 36,00$  m,  $Q_0 = 0,30$  m<sup>3</sup>/s,  $C = 500,00$  s<sup>2</sup>/m<sup>5</sup>,  $A = 1,00$  m<sup>2</sup> y  $h = 20,00$  m. En el ejemplo, estas magnitudes se consideran constantes. La bomba rotodinámica utilizada para llenar el depósito tiene la particularidad de que el coeficiente característico  $B$ , de la curva característica de carga-capacidad es igual a cero, siendo su expresión para una determinada velocidad de trabajo:

$$H = H_0 [1 - (Q/Q_0)^2] \quad (37)$$

La ecuación para el cálculo de las pérdidas de carga en la instalación viene dada por:

$$H\phi = CQ^2 \quad (38)$$

En este momento se hace necesario realizar algunas aclaraciones: primero, se supone que el coeficiente  $C$ , coeficiente característico de la conducción,  $K$ , es constante, algo que no es cierto; segundo, debe entenderse a  $H\phi$  como  $hf$ ; tercero, el coeficiente  $B$  se asume como cero sin brindar información alguna sobre la bomba en cuanto a sus características hidráulica de diseño, especialmente, su velocidad específica,  $N_q$ ; y cuarto, y último, debe entenderse que en la ecuación (37), la relación  $H_0/(Q_0^2)$  vendría siendo el coeficiente  $C$  característico de la curva  $H$  vs.  $Q$ .

A partir de esta información y sustituyendo las ecuaciones (37) y (38) en la ecuación de Continuidad (1), e integrando la expresión resultante desde  $h = 0$  hasta un valor genérico  $h$ , resulta:

$$t^* = 2 K \left[ 1 - (1 - h^*)^{1/2} \right] \quad (39)$$

Con las siguientes expresiones complementarias que forman parte de la ecuación (39):

$$t^* = \frac{Q_0}{H_0 A} t; \quad h^* = \frac{h}{H_0}; \quad K = \left( 1 + C \frac{Q_0^2}{H_0} \right)^{1/2} \quad (40)$$

Sustituyendo los valores del enunciado, para  $h = h_t = 20,00$  m, se obtiene  $t^* = 1$  y  $t = t_{II} = 120$  s.

Luego se procede a realizar la corrida en la herramienta de MATLAB versión R2015a según el modelo analítico del Caso 2, para el caso particular de  $B = 0$ , si bien puede realizarse con la ayuda de una hoja Excel o bien manualmente. Para el trabajo con la ecuación (24) se debe tener en cuenta que, para este ejemplo,  $Z_{t0} = Z_s$ , por lo cual, esta quedaría reducida a la forma de la ecuación (41):

$$t_{II} = 2A_t \left( \sqrt{K_{0,0} - C\sqrt{A}} - \sqrt{K_{t,h_t} - C\sqrt{A - h_t}} \right) = 2A_t \left( \sqrt{K_{0,0} - C\sqrt{A}} - \sqrt{K_{t_{II},20} - C\sqrt{A - h_t}} \right) \quad (41)$$

Donde:  $K_{0,0}$ : coeficiente característico de la conducción para las condiciones:  $t = 0$  y  $h_t = 0$  (tanque vacío en este caso), ( $s^2/m^5$ ) y  $K_{t,h_t}$ : coeficiente característico de la conducción para las condiciones:  $t = t_{II}$  y  $h_t = 20,00$  m (tanque lleno en este caso), ( $s^2/m^5$ ).

Como resultado se obtiene que el  $t_{II} = 2$  min. = 0,0333  $h = 120$  s, validando el método analítico propuesto. Además, aunque es válida la comparación de ambos modelos analíticos, se comprueba también con el modelo discreto planteado Martínez y Marón (2023), obteniéndose el mismo resultado como se puede apreciar en la figura 5.

Para el ejemplo propuesto por Gómez y Hernández (2016), se trabaja con una instalación en la cual se encuentra un depósito superior de sección transversal de área  $A = 4,00$  m<sup>2</sup>, (ver figura 4), que se llena mediante dos bombas rotodinámicas idénticas dispuestas en paralelo que toman agua desde el depósito inferior a la vez que el tanque de descarga se vacía a través de una tubería. Los datos son los siguientes: todas las tuberías tienen el mismo diámetro interior  $D_{int.} = 10,00$  cm y la misma rugosidad absoluta  $\varepsilon = 0,10$  mm; ambos depósitos están abiertos a la atmósfera; se asume el valor de la densidad del agua como la nominal para temperatura y presión estándar; y los valores de las longitudes de las tuberías y los coeficientes de pérdidas de carga en las válvulas (cuando están totalmente abiertas), así como otras pérdidas locales indicadas en la figura 4 son los siguientes:  $L_1 = 0,50$  m,  $L_2 = 2,00$  m,  $L_3 = 8,00$  m,  $L_4 = 30,00$  m,  $L_5 = 4,00$  m,  $L_6 = 5,00$  m,  $L_7 = 18,00$  m,  $K = 0,50$  m,  $K_A = 5,00$ ,  $K_{B1} = 4,00$ .

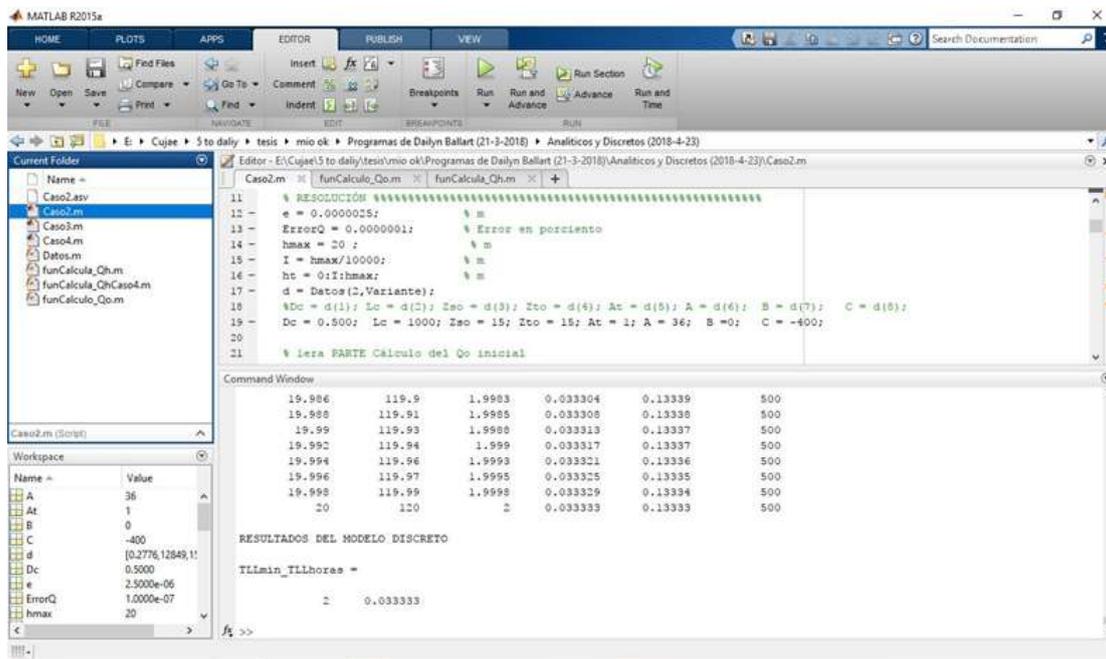


Figura 5. Código de programación del software MATLAB versión R2015a para el modelo de solución del Caso 2 para el caso particular de B = 0 (discretización por altura).

Del problema propuesto por los autores, nos centraremos en resolver el inciso dedicado a calcular el tiempo de llenado del depósito de descarga, por lo cual la válvula  $V_{B1}$  se mantiene cerrada y la  $V_A$  completamente abierta. La curva característica de la combinación de las bombas en paralelo para una velocidad de giro  $n$  se expresa por la ecuación:

$$H = 30[1 - (Q/0,08)^2] = 30 - 4687,5Q^2 \quad (42)$$

Por otro lado, la ecuación de la curva del sistema se determina como:

$$H_{sist} = 2 + 8 + 5 + \left(0,02 \frac{(0,5 + 2 + 8)}{0,1} + 5 + 1\right) \frac{8Q^2}{\pi^2(9,81)(0,1)^4} = 15 + 6692,8 Q^2 \quad (43)$$

Igualando las ecuaciones (42) y (43) se consigue la expresión en función de la altura  $h_t$ :

$$Q = A_t \frac{dh_t}{dt} = \frac{\sqrt{20 - h_t}}{106,7} \quad (44)$$

Integrando la ecuación (44), y trabajando con las expresiones complementarias de igual forma que en el problema anterior, se obtiene el tiempo de llenado del tanque superior para una  $h_t = 5,00$  m:  $t_{II} = 8.5222$  min. =  $0,14204$  h =  $511,3$  s.

En la figura 6 se presenta el código de programación del software MATLAB versión R2015a del modelo de solución discreto del Caso 2 para el caso particular de B = 0 (ecuación 24), empleado para este problema con los ajustes hechos para este caso. Se puede apreciar que se obtiene el mismo resultado.

```

10
11 % RESOLUCIÓN
12 e = 0.0000025;
13 ErrorQ = 0.0000001;
14 hmax = 5;
15 I = hmax/10000;
16 ht = 0:I:hmax;
17 d = Datos(2, Variante);
18 %Dc = d(1); Lc = d(2); Zco = d(3); Ztc = d(4); At = d(5); A = d(6); B = d(7); C = d(8);
19 %Dc = 0.500; Lc = 1000; Zco = 15; Ztc = 15; At = 1; A = 36; B = 0; C = -400;
20 Dc = 0.100; Lc = 10; Zco = 15; Ztc = 25; At = 4; A = 30; B = 0; C = -4687.5;

```

Time (s)	Height (m)	Flow (m³/s)	Flow (m³/s)	Flow (m³/s)	Flow (m³/s)
4.9965	510.95	0.5158	0.14193	0.036309	6692.0
4.997	511	0.5167	0.14195	0.036309	6692.0
4.9975	511.06	0.5176	0.14196	0.036308	6692.0
4.998	511.11	0.5186	0.14198	0.036308	6692.0
4.9985	511.17	0.5195	0.14199	0.036307	6692.0
4.999	511.22	0.5204	0.14201	0.036306	6692.0
4.9995	511.28	0.5213	0.14202	0.036306	6692.0
5	511.33	0.5222	0.14204	0.036305	6692.0

```

RESULTADOS DEL MODELO DISCRETO

TLLmin_TLLhoras =
    8.5222    0.14204

```

Figura 6. Código de programación del software MATLAB versión R2015a para el modelo de solución del Caso 2 para el caso particular de  $B = 0$  (discretización por altura).

### 03 CONCLUSIONES

Como se ha apuntado anteriormente, este es un tema poco abordado en la literatura científica, lo cual lo hace un área temática aún abierta a investigaciones. En este sentido, los autores han publicado un primer trabajo donde se aborda esta problemática desde la mirada de un modelo discreto en función de la altura y el tiempo. Se demostró que ambos arrojan iguales resultados, por lo cual pueden ser utilizados en función de la respuesta que se pretende alcanzar. El objetivo de este trabajo, al igual que su predecesor, se centró en la elaboración de un algoritmo para el cálculo de los tiempos de llenado y/o vaciado de los depósitos en los sistemas fuente por bombeo, mediante una solución analítica directa, la cual fue implementada para los tres casos de operación mediante la herramienta MATLAB versión R2015a.

La metodología de cálculo se aplica a dos ejemplos prácticos encontrados en la literatura, los cuales presentan limitaciones en su aplicación por un conjunto de hipótesis que asumen. Las soluciones brindadas por el método analítico propuesto, para ambos casos, son iguales a las reportadas en estos ejemplos. En ambos problemas, se calcula el tiempo de llenado de un depósito de descarga en dos sistemas de bombeo según el esquema de operación del Caso 2. El modelo analítico que se propone es una solución general para los tres casos de operación, el cual no presenta limitaciones para su utilización. Este procedimiento analítico será de gran utilidad en problemas ingenieriles específicos de operación, donde sea necesario determinar el tiempo de llenado y/o vaciado de depósitos en un sistema. En un próximo trabajo se expondrán los resultados comparativos de los modelos analíticos y discretos en la aplicación de varios ejemplos prácticos.

## 04 REFERENCIAS

- Arias D.** (2015). "Diseño hidráulico de los sistemas bomba-tanque-red (Bomba-Tanque de Compensación-Red de Distribución)", Trabajo de diploma, Facultad de Ingeniería Civil, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría", Cujae, La Habana, Cuba
- Ballart D.** (2018). "Determinación de los tiempos de llenado y/o vaciado de los depósitos en los sistemas fuentes por bombeo", Trabajo de diploma, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", Cujae, La Habana, Cuba
- De Eça Guimaraes J. M., Espert V., García-Serra Jorge, Sanz F. y Cabrera Enrique** (2012). "Transitorios hidráulicos del régimen estacionario al golpe de ariete", Editorial Monografías Instituto Tecnológico del Agua, Universidad Politécnica de Valencia (UPV), 1<sup>ra</sup> edición, ISBN 978-84-8363-780-7, Valencia, España.
- Fuertes V. S., Pérez R., Martínez F. J. y López P. A.** (2007). "Optimización del sistema formado por la estación de bombeo, la tubería de impulsión y el depósito de regulación", **Pimentel H., Pérez R. e Iglesias P. L.** (2016). "Abastecimento de água: o estado da arte e técnicas avançadas", pp.: 261-274, Editorial Universidade Federal da Paraíba, ISBN 978-85-7745-078-3, Paraíba, Brasil
- Gómez P. y Hernández J.** (2016). "Mecánica de los Fluidos. Problemas y soluciones", Editorial Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), ISBN 978-84-362-7109-6, Madrid, España
- Hernández J., Gómez P y Zanzi C.** (2016). "Máquinas Hidráulicas. Problemas y soluciones", Editorial Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), ISBN 978-84-362-7004-4, Madrid, España
- Martínez Y.** (2011). "Metodología para el diseño hidráulico de las estaciones de bombeo para acueducto", Tesis de doctorado, Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", Cujae, La Habana, Cuba
- Martínez Y. y Marón D. E.** (2023). "Determinación del tiempo de llenado y/o vaciado de depósitos en sistemas fuentes por bombeo", Revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental, XLIV (4): 75-88, Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", Cujae, ISSN: 1815-591X, La Habana, Cuba

### CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

### CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

**Yaset Martínez Valdés**

<https://orcid.org/0000-0001-9770-022X>

Participó en el diseño de la investigación y en la elaboración de las metodologías de cálculo para la determinación del tiempo de llenado y/o vaciado de los depósitos en un sistema fuente por bombeo. Colaboró en el procesamiento, análisis e interpretación de los datos. Redacción final del trabajo.

**David Ernesto Marón Domínguez**

<https://orcid.org/0000-0003-4198-9962>

Realizó contribuciones en el diseño de la investigación y tuvo a su cargo la creación de los algoritmos de cálculo para el software MATLAB 2015b. Participó en el análisis de los resultados del trabajo y en la revisión y redacción del manuscrito en su versión final.