2024

INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL

02

XLV

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

ISSN 2788-6050, RNPS 2066

EQUIPO EDITORIAL

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 Mediaombiente (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*

Vol. XLV
No. 02 (ABR-JUN 2024)
ISSN 2788-6050, RNPS 2066

01	Reinier Damián Ramírez González	Transformación de la cuenca Mayarí en el cumplimiento de las políticas ambientales locales	3 13
02	Yaset Martínez Valdés Félix Riaño Valle Yilian Álvarez Gil	Ajuste de las curvas características de las bombas rotodinámicas	14 28
03	Nuria de los Ángeles Vaillant López Rosmery Velázquez Díaz Guillermo Ribeaux Kindelán	Influencia del tratamiento magnético en la turbidez, conductividad y pH del agua	29 39
04	Pedro Manuel Cabrera Castro Pável Vargas Rodríguez Rafael Miguel Pacheco Moya José Romero Morris	Selección de técnicas de riego en la empresa agropecuaria Laguna Blanca	40 49
05	Milaydis Molina Rodríguez Luis Eduardo Rodríguez Rodríguez Raydi Teydi Rojas Angel Bello José Manuel Gaio	Manifestaciones del pensamiento científico-técnico según los estilos de aprendizaje en estudiantes de Ingeniería Hidráulica	50 64
06	Daniela Córdova de Horta	Metodología para la evaluación técnica de proyectos de agua y saneamiento en Cuba.	65 77
07	Jaime Ernesto Chiang Cruz Iliover Vega González Jorge Ramírez Beltrán	Estado del arte de algoritmos de Machine Learning para la detección de rupturas súbitas	78 89

Transformación de la cuenca Mayarí en el cumplimiento de las políticas ambientales locales

Reinier Damián Ramírez González E-MAIL: reinierramirez1982@gmail.com
Delegación Territorial de Citma Holguín

RESUMEN

El objetivo de la investigación es exponer los cambios en la gestión de la cuenca hidrográfica para el uso sostenible de los recursos naturales teniendo en cuenta el desarrollo del territorio. Se caracteriza la misma en cuanto a localización, población, producción y conservación para comprender los resultados y lograr un uso eficiente de los recursos naturales teniendo en cuenta las problemáticas ambientales identificadas. Se acerca a sus funciones, al proceso de gestión de las aguas y se plasman los resultados en la transformación como parte del Programa Integral de Desarrollo e implementación de la legislación ambiental del país enfocado al desarrollo utilizando herramientas técnicas y administrativas. Se propone dar seguimiento a la gestión para mitigar los efectos del cambio climático, lograr adaptación y contribuir al desarrollo sostenible en la región.

PALABRAS CLAVES: cuenca hidrográfica, gestión, desarrollo sostenible

Transformation of the basin Mayarí in the fulfillment to the environmental local policies

ABSTRACT

The objective of investigation is to expose the changes in the step of the basin for the sustainable use of the natural resources taking in to account the development of the territory. The same as to location, population, production and conservation to understand results and to achieve an efficient use of the natural resources taking into account the environmental identified problems are characterized. You approach to his shows, to the process of step of waters and techniques and white-collar workers materialize the results in the transformation as part of Development Integral Program and implementation of the environmental legislation of the country once the development was focused utilizing tools themselves. It is proposed following up on the step to mitigate the effects of the climatic change, to get adaptation and to contribute to the sustainable development at the region.

KEYWORDS: watershed, management, sustainable development.

Mayo 2024-RECIBIDO APROBADO Junio 2024
Esta obra está bajo una licencia internacional creative commons attribution-noncommercial 4.0

01 INTRODUCCIÓN

Martínez y Villalejo (2018) afirman que el agua, como recurso vital para la vida y el desarrollo de cualquier país, debe ser administrada en beneficio de toda la población, lo cual implica asumir responsabilidades relacionadas con su contabilización, conservación y control de uso adecuado, así como reglamentar la asignación de derechos de uso del agua. La gestión del agua tiene que ver con la forma como se administra este recurso natural. La necesidad del hombre de sobrevivir, le ha obligado a acercarse más a la naturaleza para conocerla y utilizarla mejor. En los últimos tiempos han proliferado nuevos conceptos en la planificación y uso de los territorios haciéndose común términos como planificación ambiental, territorial, planificación física, ordenamiento ambiental, territorial y geoecológico, unidades de paisajes y ambientales, gestión, ordenamiento y manejo de cuencas.

La relación entre la ocupación del territorio y el agua se hace evidente a partir de procesos que garantizan la vida de las personas y el desarrollo de sus actividades agrícolas, ganaderas, forestales, mineras, industriales, recreativas, procesos de urbanización, entre otras. Sin embargo, dichas actividades pueden afectar de una u otra forma a los recursos hídricos, originando procesos tales como: la contaminación de origen residencial, agrícola o industrial; la sobreexplotación de las fuentes de recursos hídricos; las inundaciones/anegamientos; la eutrofización de los cuerpos de agua; la erosión (Carter, 2007). De ahí la necesidad de una adecuada vinculación entre la gestión hídrica y la gestión territorial, recurriendo a prácticas sostenibles en todos los usos del suelo y las actividades que se desarrollen en las cuencas hidrográficas, a fin de prevenir riesgos de origen hídrico, así como garantizar el acceso al agua para el consumo humano, una de las claves para lograr el desarrollo sostenible.

02 FUNCIONES DE LAS CUENCAS HIDROGRÁFICAS

Dentro de la cuenca, se tienen los componentes hidrológicos, ecológicos, ambientales y socioeconómicos los cuales permiten identificar diversas funciones.

Función ambiental: Esta función en una cuenca hidrográfica se puede identificar por las siguientes acciones:

- Constituyen sumideros de dióxido de carbono CO_2 alberga bancos de germoplasma, regula la recarga hídrica, conserva la biodiversidad y mantiene la diversidad de los suelos.

Función ecológica: Se puede identificar por las siguientes acciones:

- Provee hábitat para la fauna, provee hábitat para la flora, tiene influencia sobre la calidad física y química del agua.

Función hidrológica: Se identifica por las siguientes acciones:

- Drena el agua de las precipitaciones, recarga las fuentes de agua subterránea y recarga las fuentes de agua superficial.

La función económica de una cuenca hidrográfica se puede identificar por las relacionadas como suministradora de recursos naturales renovables y no renovables y como proveedora de espacio para el desarrollo social y cultural que contribuye a la permanencia de los asentamientos humanos que alrededor de ellas existen siendo determinante para la sustentabilidad propia por todos los factores que en ella interaccionan (Araque et. al, 2019).

BASAMENTOS LEGALES

A nivel nacional, con la ley 124 / 2017 (Gaceta Oficial de la República de Cuba, 2017) sobre las aguas se incorporaron los derechos de incidencia colectiva en el ordenamiento jurídico y se modificó

la distribución de competencias entre los principales actores que tienen que ver con las cuestiones relacionadas al uso, protección y conservación de este recurso en aspectos de la gestión de los recursos naturales. Además, la Constitución de la República de Cuba promulgada en 2019, incluye entre sus postulados el derecho a un ambiente sano, equilibrado y apto para el desarrollo humano, principios básicos para el logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Naciones Unidas y el Plan Nacional de Desarrollo Económico y Social hasta 2030.

CUENCAS Y ÁREAS PROTEGIDAS

Las cuencas como espacios para la protección de los recursos hidrológicos tienen una estrecha relación con los ecosistemas y en particular con las áreas forestales que las circundan, debido en lo fundamental al papel que juegan los bosques en la protección de las mismas. Es de mencionar que los esfuerzos principales en el municipio, teniendo en cuenta el sector forestal, se sitúan por encima del 70 % de los recursos materiales y financieros asignados lo cual denota la importancia que el estado cubano les confiere a estas en el cumplimiento de las políticas ambientales del país.

EDUCACIÓN AMBIENTAL Y SU DIVULGACIÓN EN LAS CUENCAS

La educación ambiental es una herramienta importante, que facilita cambios de comportamiento y genera nuevos modelos de pensamiento para mejorar la calidad de vida y asegurar las especies. Se considera un proceso continuo y permanente, que constituye una dimensión de la educación integral de todos los ciudadanos, orientada a que, en el proceso de adquisición de conocimientos, desarrollo de hábitos, habilidades, actitudes y formación de valores se armonicen las relaciones entre los hombres, y entre éstos con el resto de la sociedad y la naturaleza, para con ello propiciar la reorientación de los procesos económicos, sociales y culturales hacia el desarrollo sostenible. En este mismo sentido la divulgación ambiental desempeña un importante papel como instrumento para proteger y usar sosteniblemente los recursos del medio ambiente, al trasmitir información y diseminarla a través de todos los medios de comunicación, con mensajes y códigos claros y precisos (CITMA, 2022).

En Cuba por nuestra condición de insularidad la gestión del agua es responsabilidad del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH) como se hizo mención, aunque existe un modo peculiar de gestionar las cuencas cuando estas son compartidas entre provincias y municipios debido a su ubicación geográfica. En el caso de la cuenca Mayarí se gestiona entre las provincias de Holguín y Santiago de Cuba y cuatro municipios, Mayarí perteneciente a la primera y Segundo Frente, San Luis y Songo La Maya pertenecientes a la segunda (Figura 1)

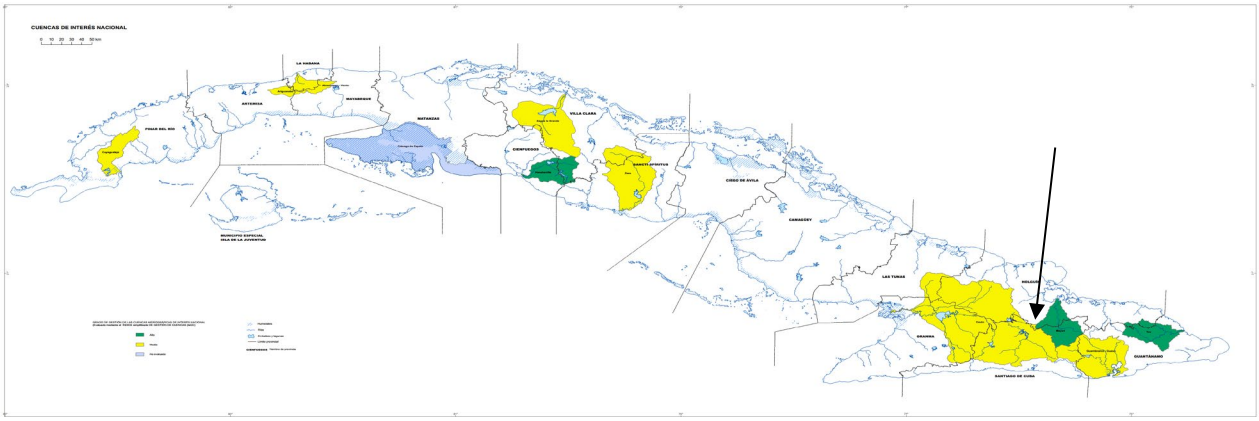

Figura 1. Ubicación de la Cuenca Mayarí (tomada de Internet)

El Consejo Nacional de Cuencas Hidrográficas (CNCH), adscripto al INRH, surge como una necesidad respecto al manejo del recurso agua en relación con otros recursos naturales de gran importancia. Esta preocupación no es reciente, sino que ha sido una constante en las políticas ambientales del país a lo largo de los años con un basamento en las experiencias nacionales ajustadas al escenario foráneo.

Después de la Agenda 21 y de la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible en 1992, es que el concepto de gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH) fue debatido a profundidad. Finalmente, tiene una mayor aceptación a nivel mundial el concepto de GIRH dado por la Asociación Mundial para el Agua: La GIRH es un proceso a favor del desarrollo y la administración coordinados, principalmente el suelo, del agua y los otros recursos relacionados, con el fin de aumentar los efectos económicos y el bienestar social de forma equitativa sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales (Programa de las Naciones Unidas para el Medioambiente PNUMA, 2017). Se toma en consideración que la sensibilidad desarrollada y amplificada en las últimas décadas sobre el medio ambiente introdujo un nuevo elemento a considerar para la participación comunal/regional. Nuevas cuestiones son parte ahora de la agenda de las comunidades locales destacando los temas ligados a los recursos naturales y el ambiente con vistas a lograr un desarrollo sostenible que permita preservar este vital recurso para las generaciones futuras.

El presente trabajo tiene por objetivo exponer los resultados obtenidos en la gestión integral de la cuenca Mayarí, de interés nacional, por la importancia estratégica que esta reviste como fuente primaria del trasvase este/ oeste. Se analizan las particularidades de la misma y las etapas por las que han transitado las inversiones, los impactos de estas y se abordan los desafíos a los que debe enfrentarse este espacio geográfico en un corto y mediano plazo ante las necesidades de mitigación y adaptación ante fenómenos naturales y tecnológicos.

CONTEXTO DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación se realizó en la cuenca Mayarí que comprende un área de 1 261 km² localizada entre las regiones alturas de Mayarí y montañas de Nipe-Cristal con orientación del cauce de sur a norte abarcando territorios de tres municipios de la provincia Santiago de Cuba, donde tiene su nacimiento el río principal, siendo estos el II Frente, San Luís y Songo-La Maya, que en conjunto abarcan el 60,7% del área de la cuenca. El 39,3 % restante del área total se encuentra en el municipio de Mayarí. Su naciente se ubica en las alturas de la Sierra de Mícara y Alto de San Fernando en el Municipio II Frente.

Sus características hidrológicas están condicionadas por la geología, el relieve y el clima. El potencial hidráulico subterráneo es de 10,7 hm^3/año, y el superficial de un gasto medio hiperanual de 13 m^3/s y un volumen de 407,2 hm^3, siendo el potencial hidráulico de 417,9 hm^3, lo que constituye un valioso recurso. En la cuenca se encuentra la Presa de Mayarí y Mícara. El agua es utilizada por la población y para el uso en la agricultura y ganadería. La erosión fluvial es notable en las pendientes de la altiplanicie, aportando sedimentos una gran cantidad de ríos y arroyos. La erosión antrópica tiene los mayores riesgos en las áreas potenciales de la minería a cielo abierto y la actividad agropecuaria y forestal, así como en la red vial. Desemboca en la bahía de Nipe formando un extenso delta con una superficie de 3 336 ha, de las cuales 484 ha son marinas.

Se utilizaron datos proporcionados por la Delegación Provincial de Recursos Hidráulicos, la Empresa de Fuentes Renovables de Energía, de Servicios René Ramos Latour con el fin de ser analizados y hacer una valoración de las variables de mayor importancia que inciden en la cuenca mayaricera. También otros datos fueron aportados por diversos organismos que inciden en la gestión

integrada de la cuenca como es el caso del Ministerio de la Agricultura con el Departamento de Suelos, el Servicio Estatal Forestal (SEF), así como la información contenida en los planes gubernamentales para la erradicación de fuentes contaminantes ejecutados en el período 2016/ 2021 rectorados por políticas del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medioambiente (CITMA).

También se utilizó el informe de los monitoreos realizados por el Centro de Investigación y Manejo Ambiental del Transporte (CIMAB, 2017) en los recorridos efectuados a tales fines a partir de un servicio ambiental prestado al CITMA como parte de un proyecto no asociado a programa. Se trabajó con el inventario actualizado de fuentes de contaminación de la cuenca, efectuándose trabajo de campo y visitas técnicas a las principales industrias del territorio desde las que se encuentran situadas en la parte montañosa como en el llano. Se tomaron como punto de partida los resultados científicos de años anteriores, realizándose una revisión de la base de datos disponible y la compilación de la información reportada por las autoridades ambientales. Se le dio seguimiento a la implementación de la Estrategia Ambiental Municipal como instrumento rector de la gestión ambiental para dar seguimiento a las acciones trazadas para mitigar los impactos de la contaminación de las aguas en la referida zona.

03 PRINCIPALES RESULTADOS

En la tabla 1 se muestra la serie cronológica del índice simplificado de gestión de cuencas (IsGC) definido como una herramienta de evaluación aproximada de intervención económica, social y ambiental (García y Gutiérrez, 2012).

Tabla 1. Comportamiento de los Indicadores Año 2011 al 2022

Año	IsGC (%)	Superficie de Suelo Beneficiada	Área cubierta de bosques	Relación Carga dispuesta/generada	Agua Potable	Saneamiento Ambiental	Relación Uso/Disponibilidad de las Aguas
2011	71	4,0	75,7	47,7	94,1	99,0	91,0
2012	58	4,5	62,8	39,5	94,1	67,0	91,5
2013	71	4,5	63,2	30,3	95,5	71,1	9,7
2014	71	4,5	73,4	69,3	94,4	92,5	14,6
2015	71	4,6	74,6	74,0	94,4	92,5	14,7
2016	75	4,7	76,9	67,1	95,3	92,5	21,0
2017	77	4,6	88,1	67,1	95,3	92,4	46,0
2018	79	4,4	87,2	67,7	96,1	88,6	29,4
2019	79	4,6	89,3	68,9	96,0	88,5	25,9
2020	83	6,0	90,1	58,3	96,0	88,5	26,0
2021	62	4,4	92,7	52,9	62,2	51,6	24,8
2022	84	3,2	92,6	6,4	84,7	71,7	25,6

Se observa la evolución favorable de este indicador de medición para la calidad de las aguas según el análisis de los resultados en cuanto a agua potable, saneamiento ambiental, relación uso disponibilidad y carga generada y dispuesta teniendo solo dos años, 2012 y 2021 con resultados por debajo de la alta gestión (9 años) que es cuando el IsGC se encuentra por encima del 70 % resultando a criterio de los especialistas, una gestión adecuada. Lo cual es coincidente con lo planteado por Cohen (2012) cuando refiere que las potencialidades de la gestión en base a la unidad de cuenca hidrográfica son numerosas por la superación de las fronteras político-administrativas de los territorios. La organización de la participación de los usuarios en la escala de cuenca, donde los usos están interrelacionados y la aproximación de la gestión de cuenca y el agua a la gobernanza sostenida mediante políticas públicas las cuales tienen su reflejo en la modificación del marco legal y su

evolución desde el rango de Decreto Ley a Ley del Agua (Gaceta oficial de la República de Cuba, 2017) y una clara respuesta a temas de naturaleza hidroecológica, como por ejemplo las relaciones aguas arriba-aguas abajo, la regulación de avenidas o la definición de caudales ambientales.

En la cuenca Mayarí se realizaron un conjunto de inversiones ambientales desde el año 2012 y que luego fueron reorganizadas en un Programa de Erradicación de Fuentes Contaminantes 2016/ 2021 (Consejo de la Administración Municipal Mayarí, 2016) que permitieron disminuir las cargas generadas por los mayores generadores de contaminación disminuyendo el impacto ambiental de estas y mitigando sus efectos encaminadas en su gran mayoría a los residuales líquidos provenientes de actividades agropecuarias como la ganadería y el café y las que tienen que ver con la recuperación de áreas afectadas por la minería teniendo esta última mucho que ver con el exitoso cierre de las minas para la extracción de la materia prima para la producción de níquel en la zona de pinares de Mayarí.

Esto permite implementar esquemas de gestión sostenible para el manejo de una cuenca hidrográfica según lo propuesto por (Díaz, 2020) basado en el enfoque de la gestión integral sostenible de las cuencas, el análisis socioeconómico, los requerimientos de una política integral y planificación de gestión integral sostenible, así también este modelo conlleva a la preservación del agua y al desarrollo socioeconómico de la población, teniendo en cuenta que representa los procesos hidrológicos que ocurren en una cuenca desde la caída de la lluvia, su transformación en escorrentía y su pasaje por puntos de monitoreo y medición de indicadores que se evalúan en dependencia de las necesidades socioeconómicas.

En cuanto la relación existente entre las áreas protegidas y la gestión en la cuenca se puede afirmar que se concatenan esfuerzos en dos vertientes que convergen en la conservación ambiental, pues la cuenca se beneficia de las labores que se llevan a cabo en los parques Nacionales Mensura Piloto y Pico Cristal encontrándose ambos rodeando tanto al río principal como a los afluentes que tributan sus aguas al mismo. En este escenario que se desarrollan las labores de manejo, conservación, exploración, monitoreo y seguimiento a muchas especies de especial significación para la flora y la fauna de la región lo cual forma parte de los escenarios de trabajo de la Empresa Agroforestal Mayarí principal ejecutora de las acciones que son controladas por el Servicio Estatal Forestal que es una dependencia del Ministerio de la Agricultura para tales fines, así como que participan también las brigadas de la Empresa Nacional para la protección de la Flora y la Fauna (Figura 2).

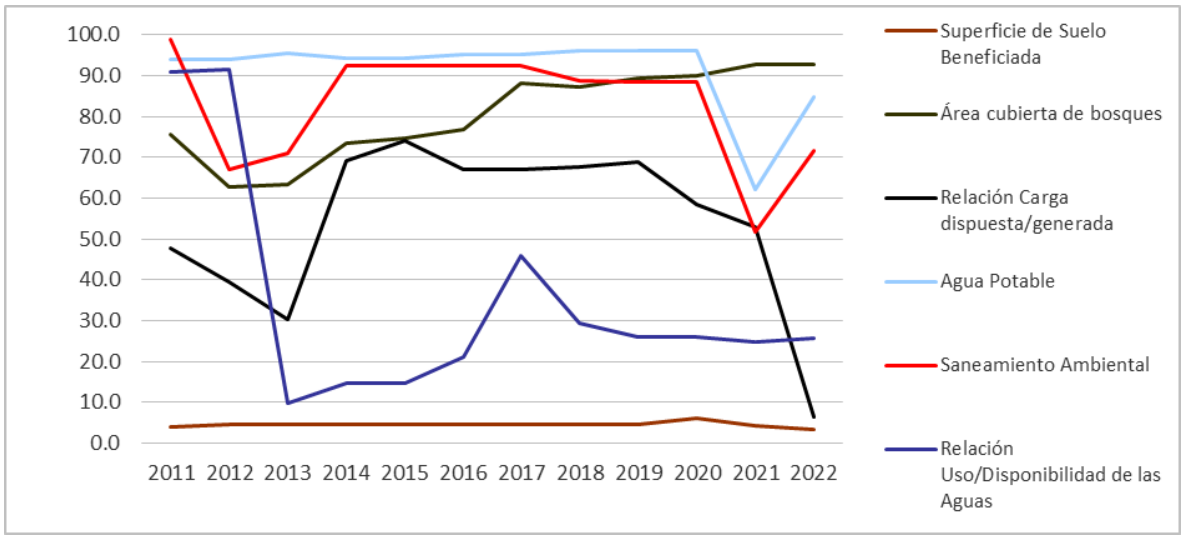

Figura 2. Comportamiento de los Indicadores en el período.

A la gestión científica contribuyen proyectos de ciencia e innovación adscriptos a programas territoriales de ciencia, tecnología e innovación que son conducidos por la Estación de Investigaciones Integrales de la Montaña (EIIM) de Pinares de Mayarí y la Agencia de Medioambiente (AMA) como el proyecto de Desarrollo Sostenible de las Montañas de la provincia Holguín conteniendo a su vez los proyectos Comunidad, programas de desarrollo estratégico y desarrollo local sostenible en las montañas de Holguín y Gestión de los bosques de la Sierra Nipe-Cristal en el municipio Mayarí para enfrentar los efectos del cambio climático, siendo también centro de proyectos de colaboración internacional centrados en las zonas montañosas de la región, con la obtención de relevantes resultados tales como el modelo de ordenamiento ambiental de las montañas, y la implementación del corredor biológico del macizo Nipe-Cristal a partir de la implementación del proyecto Conservación de ecosistemas montañosos amenazados ¨Conectando Paisajes¨ concluido en 2022.

Esta gestión de la ciencia ha dado lugar a un importante cúmulo de publicaciones científicas, de tesis de graduación en especialidades que se estudian en el Centro Universitario Municipal, en la Escuela Pedagógica, de artículos en revistas nacionales e internacionales que se derivan de los propios proyectos como ellos mismos los demandan y de libros con aportes concretos en el manejo de los ecosistemas de montaña entre los que pueden citar Rehabilitación Ambiental Minera (2016), como resultado de un proyecto de colaboración que es la compilación de años de investigación sobre la temática de la minería y que contribuyó de manera significativa a la recuperación de las áreas afectadas por la minería como se verá en lo adelante.

Por otro lado es posible definir que la alta gestión de la cuenca (como se muestra en la figura 3) está estrechamente relacionada con la atención a indicadores como el área cubierta de bosques, la superficie de suelo beneficiada y la relación entre la carga generada y la carga dispuesta, además del agua potable y el saneamiento ambiental en la misma y que este grupo de indicadores permite determinar mediante técnicas de laboratorio relativamente asequibles la calidad de las aguas que se generan en las mismas. En la zona se rehabilitaron sistemas de tratamientos de residuales pertenecientes a unidades ganaderas disminuyendo el impacto negativo de los residuales generados por las mismas potenciando su uso como materia orgánica en los viveros forestales y los cultivos varios y las áreas de forraje de los propios enclaves de crianza como vía alternativa también al uso de fertilizantes nitrogenados escasos y con un alto encarecimiento en el mercado internacional. Así mismo se realizó una reparación en el sistema de tratamiento perteneciente al poblado de pueblo Nuevo de Pinares que incluyó una ampliación a la laguna de oxidación, sustitución de redes de conducción de aguas negras y mejoramiento de registros y sus tapas contribuyendo a la disminución de las cargas dispuestas al medio.

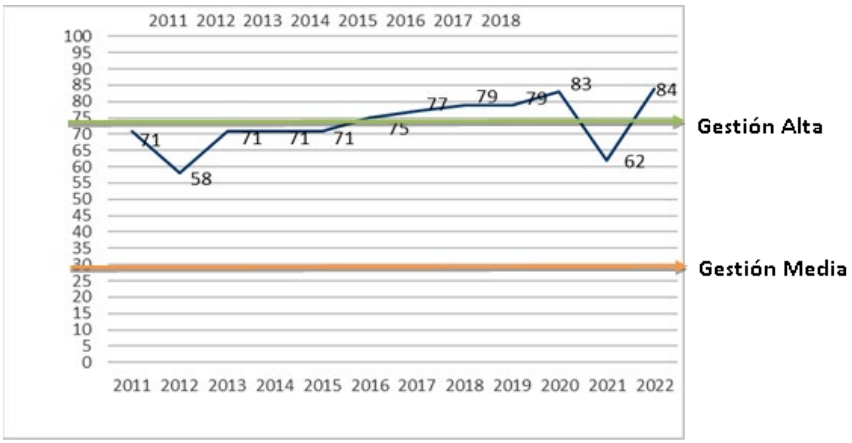

Figura 3. IsGC en el período 2011/ 2022

Esta gestión busca reforzar capacidades de gobernabilidad en territorios delimitados naturalmente, dirigido a implementar acciones (planes y programas) para la búsqueda de mecanismos financieros para el aprovechamiento y protección de los recursos naturales de la cuenca y la referencia que realiza a la importancia en proporcionar recursos financieros para apoyar la capacitación y la transferencia de tecnología en países en vías de desarrollo, y poder suministrar servicios seguros de agua y saneamiento. Lo anterior, es avalado por un grupo de inversiones ambientales encaminadas a sustituir las tradicionales tecnologías para el despulpe de café, las cuales eran altas consumidoras de agua, por otras ecológicas que realizan un reciclaje constante de este recurso evitando su disposición al medio y teniendo un impacto positivo en la disponibilidad de este recurso en los principales acuíferos.

Las despulpadoras que fueron beneficiadas son las de Arroyo Seco, Pinares de Mayarí y La Güira las cuales de forma escalonada se transformaron como parte de un programa gubernamental de asignación de fondos para el desarrollo agropecuario previsto en el Programa Integral de Desarrollo (PIDM) del municipio Mayarí desde 2012 el cual se encuentra hoy en su segunda etapa. Es de señalar que los residuales sólidos orgánicos producto del despulpe del café se han compostado para su transformación y posterior utilización como abonos en las plantaciones cafetaleras. En estas últimas también se han instalado sistemas de riego empleando tecnologías de avanzada que permiten un uso eficiente del agua en beneficio de las plantaciones y sus rendimientos contribuyendo a su disponibilidad en casi todo el año.

Como parte de esta misma política en la etapa se fomentaron la construcción de viveros tecnificados para la obtención de posturas de árboles maderables y frutales teniendo en su máxima expresión la instalación de uno con capacidad para producir un millón de posturas al año en la meseta de Pinares y otros de menor envergadura en Arroyo Seco y Levisa con beneficios palpables en el fomento de plantaciones proveyendo tecnologías en las que se humaniza el trabajo de las personas, se hace un uso más eficiente del suelo, se disminuye el tiempo en las labores de carga y traslado hasta los lugares de las futuras plantaciones lo que permite atender una mayor cantidad de áreas en cuanto a las labores de reforestación propiamente dicha se refiere.

La recuperación de las áreas afectadas por la minería coincidiendo con la detención de la explotación de las minas de níquel en Pinares y la zona de mina Martí permitieron rehabilitar con la aplicación de diversas técnicas de reforestación y distintas especies de gramíneas y árboles maderables 1059,53 ha influyendo positivamente en la disminución de los escurrimientos de material que antes se encontraba expuesto a la erosión y permitiendo devolver al patrimonio forestal 2286,72 ha hasta el cierre 2018 a partir del inventario inicial de todas estas áreas desde 2003 que ascendía en aquel momento a 4370,31 ha de pasivos ambientales derivados de muchos años de explotación de las áreas y el no tratamiento para la recuperación. Esto es un logro muy significativo pues esta cuenca tiene una alta incidencia de la región del territorio montañoso por el alto nivel de la inclinación de sus pendientes y los escurrimientos toda vez que el régimen lluvioso de la zona oscila entre los 1200 a 1400 mm anuales de precipitaciones siendo una de las que más llueve en Cuba lo cual corrobora todo el potencial de la cuenca en cuanto a la generación de recursos naturales y en particular el agua (CMP, 2012).

Se construyeron los muros de contención para los lodos procedentes del escurrimiento de la cantera del Pilón pertenecientes a la Industria de Materiales de la Construcción y una nueva conductora de abasto por gravedad hasta el propio enclave que propicia la reutilización del agua por parte de la industria, así como la instalación en ella de una nueva tecnología más amigable con el medioambiente, al eliminar con un hidrociclón los volúmenes de polvo que antes se depositaban en

los árboles de la zona y con las lluvias y los citados escurrimientos iban a parar a las aguas del río, con las consiguientes afectaciones a su calidad, lo cual aplica a los conceptos esbozados sobre que en estas instalaciones uno de los principales objetivos desde el punto de vista económico y medioambiental es recuperar la mayor cantidad de agua posible y devolverla a la circulación atendiendo a la creciente atención sobre la economía circular que lleva a un aumento del reciclaje y la recuperación de estos materiales para un segundo ciclo de vida (Canteras y Reciclaje sf).

La utilización de la fuerza hídrica para la generación eléctrica con fuentes renovables también ha tenido su espacio con la instalación de moderno equipamiento de centrales hidroeléctricas que desde su puesta en marcha en 2016 hasta cierre 2022 han generado 9759,120 MWh ahorrando por este concepto 780,730 TN de combustible diesel si se llevara a la generación convencional y dejando de emitir a la atmósfera 7319,34 TN de dióxido de carbono (EMFRE, 2022) contribuyendo al equilibrio entre el crecimiento económico, poblacional, la conservación del medio ambiente y la disponibilidad, abastecimiento y el uso adecuado del agua como fuente para la generación de energía, son componentes claves para un desarrollo sostenible, logrando además, asegurar el acceso y disponibilidad de la misma.

Los resultados expuestos más la experiencia en el trabajo cotidiano permiten inferir que para asegurar una buena gestión en las cuencas hidrográficas, es necesario el uso y aplicación de herramientas técnicas para identificar posibles afectaciones promoviendo mecanismos de apoyo institucional, con la población, personas usuarias y productoras, para lograr una eficiente adopción de las técnicas de manejo de cuencas tomando como base los recursos naturales en este caso el suelo, los bosques, la vegetación existente y así asegurar la sostenibilidad de la cuenca y los recursos naturales que en ella están presentes como se ha venido haciendo desde la creación del Consejo Específico de Cuenca Mayarí con la utilización de las normativas contenidas en la Ley 81/ 1997 Ley del medioambiente (Gaceta oficial de la República de Cuba, 1997), 85 / 1998 Ley Forestal (Gaceta oficial de la República de Cuba, 1998) y la evolución del ahora Decreto Ley 50/ 2021 (Gaceta Oficial de la República de Cuba, 2021) sobre la conservación, mejoramiento y manejo sostenible de los suelos y fertilizantes, así como la propia existencia de los consejos específicos de cuenca donde se integran diversos organismos en función de la misma temática.

Esta misma perspectiva avala los talleres comunitarios en zonas ubicadas en la cuenca en los consejos populares de Pinares de Mayarí y Arroyo Seco, como producto de la interacción de los habitantes en mecanismos de gobierno como la atención por parte del programa del Plan Turquino que protege la vida en las montañas con acciones de educación ambiental en los centros educacionales, en los consultorios del médico de la familia como base del sistema de salud pública, universal y gratuito que pone al ser humano en el centro, empoderando a las personas en el lugar donde viven, en concordancia con la necesidad de protección del medioambiente y sus recursos naturales.

04 CONCLUSIONES

La gestión integrada de la cuenca Hidrográfica Mayarí ha permitido facilitar la planificación territorial y el desarrollo del municipio, tales como su límite bien definido por el relieve, las entradas y salidas, y sus mecanismos de producción de materias primas y energía a través del funcionamiento de su estructura. Como estructura espacial permite amplias posibilidades al manejo de los recursos naturales que en ella se encuentran de utilizar con muy buena aceptación los métodos cuantitativos, basados en el marco legal establecido en las políticas del país para la atención al recurso agua toda vez que se hace necesario medir y analizar en toda su dimensión el manejo integrado de una cuenca

obteniendo información de los componentes físico-químicos y socioeconómicos que expresan otras relaciones funcionales dentro del propio espacio.

A partir de los conceptos y métodos del ordenamiento ambiental y del manejo integrado de cuencas se reafirma que ambos son instrumentos de planificación territorial y que se complementan en el proceso de gestión, siendo totalmente certero tomar las experiencias exitosas, tanto de uno como del otro, para para obtener resultados superiores. Las principales ventajas derivadas del trabajo integrador, los métodos de seguimiento por los especialistas y sus alcances en las diferentes etapas, es fruto de la necesidad surgida a partir de la implementación de los Consejos de Cuencas y en particular del de la Cuenca Mayarí como garante del cumplimiento de las medidas y la continuidad del Manejo de la misma. El acceso al agua tanto en cantidad como en calidad y de un modo estable es un derecho fundamental de las poblaciones para el sostenimiento de estas como organismos vivos como para la realización de las actividades económico/ productivas que permitan el desarrollo sostenible de la sociedad. La escasez de agua generada por contaminación, dinámica poblacional, fenómenos naturales, cambio climático, entre otros, puede conducir a desencadenar períodos de crisis. Por ello se le debe dar continuidad a las inversiones ambientales y al trabajo en las comunidades como elemento fundamental basado en los resultados de investigaciones orientadas a fortalecer estrategias para garantizar de una manera sostenida los beneficios sociales, ambientales y económicos del uso del agua.

05 REFERENCIAS

Cantera y Reciclaje (SA). Blog Consultado Octubre 2023. Disponible en: https://www.diemmefiltration.com/es/aplicaciones/cantera-y-reciclaje/

Carter J.G. (2007) “Spatial planning, water and the Water Framework Directive: insights from theory and practice”. The Geographical Journal, 2007, Vol. 173, N°4, p. 330-342. United Kingdom.

Centro Meteorológico Provincial (CMP) “Atlas Climático de la provincia Holguín. Tendencias y variaciones del clima durante el período 1970-2012. Especificidades para los sectores turístico y agrícola”. Vigente según la Organización Meteorológica Mundial. Holguín. Cuba

Cohen A. (2012): ¨Watershed as boundary objects: Scale at the intersection of competing ideologies¨. Environment and Planning A, 44: 2207-2224. United Kingdom.

Gaceta Oficial de la República de Cuba (2021) Decreto Ley 50/ 2021 Sobre la conservación, mejoramiento y manejo sostenible de los suelos y fertilizantes. Cuba.

Díaz T. (2020). ¨La huella hídrica indicador para aplicar la circularidad del agua: modelo de gestión sostenible para Panamá¨. Cátedra, (17), 66-78. Ecuador.

Empresa de Fuentes Renovables de Energía EMFRE (2022) UEB Holguín. Informe ejecutivo. Cuba.

CITMA (2022) Estrategia Ambiental Nacional 2022/ 2025. Ministerio de Ciencia, Tecnología Y medioambiente. Cuba.

Estrategia Ambiental Municipal Mayarí, Holguín. 2017/ 2021. Cuba

García J. M, Castro V. y Gutiérrez J. (2012): Nueva herramienta para evaluar la gestión integrada de las cuencas hidrográficas cubanas. El índice simplificado de gestión de cuencas hidrográficas (IsGC. 1ra etapa). Revista Voluntad hidráulica, 106, pp 6 - 17. Cuba.

Gaceta Oficial de la República de Cuba (2017). Ley 124/ 2017 De las Aguas Terrestres de la República de Cuba. Gaceta Oficial Extraordinaria No. 51. https://www.gacetaoficial.gob.cu/pdf/GOC-2017-EX51.rar

Gaceta Oficial de la República de Cuba (1997). Ley 81/ 1997 Ley de Medioambiente. Gaceta Oficial No. 7 Extraordinaria de 1997. https://www.gacetaoficial.gob.cu/es/gaceta-oficial-no-7-extraordinaria-de-1997. Cuba.

Gaceta Oficial de la República de Cuba (1998). Ley 85/ 1998 Ley Forestal. Gaceta Oficial No 46. Cuba.

Martínez Y. y Villalejo V. M. (2018). ¨La gestión integrada de los recursos hídricos: una necesidad de estos tiempo¨. Ingeniería hidráulica y ambiental, 39(1), 58-72. Cuba

Araque M., Vásconez M., Mancheno A., Álvarez C., Prehn C., Cevallos C. y Ortiz L. (2019). "Cuencas Hidrográficas". Universidad Politécnica Salesiana. Ecuador.

Centro de investigaciones y manejo ambiental del transporte (CIMAB) (2017) Informe Monitoreo, evolución y control de la calidad ambiental del ecosistema de la bahía de Nipe. Proyecto no asociado a programas. Cuba

PNUMA (2017) Centro para el Agua y Medio Ambiente. "Obtenido de Integrated Water Resources Management in Action". http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/iwrm.shtml

Consejo de la Administración Municipal Mayarí (2016). Programa de Erradicación de Fuentes Contaminantes 2016/ 2021, Holguín, Cuba.

Rodríguez U., Días J., Sigarreta B. y Vilches S. (2016) Rehabilitación Ambiental Minera. Centro de Investigaciones y Servicios Ambientales y Tecnológicos de Holguín. Cuba.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Reinier Damián Ramírez González https://orcid.org/0009-0003-7644-0694

Realizó el trabajo en su totalidad.

Ajuste de las curvas características de las bombas rotodinámicas

Yaset Martínez Valdés E-MAIL: yaset1977@gmail.com
Profesional independiente
Félix Riaño Valle E-MAIL: riano@tesla.cujae.edu.cu
Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), Cujae, La Habana.
Yilian Álvarez Gil E-MAIL: yilianal@civil.cujae.edu.cu
Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), Cujae, La Habana.

RESUMEN

Tradicionalmente la información relacionada con el comportamiento de las bombas rotodinámicas ha sido brindada de forma gráfica, mediante sus cuatro curvas características: carga-capacidad, eficiencia-capacidad, potencia-capacidad y NPSHr-capacidad. En la actualidad y estimulados por la extensión del uso de la computación, los fabricantes de bombas rotodinámicas han comenzado a generalizar el empleo de ecuaciones matemáticas en sustitución de la forma gráfica para brindar la información relacionada con sus bombas y como medio más expedito para el estudio del comportamiento hidráulico de los sistemas de bombeo. De esta manera, resulta imprescindible definir los métodos para obtener las expresiones matemáticas representativas de las curvas características de las bombas, a partir de los gráficos y/o datos proporcionados por el fabricante, ya que estos no brindan esta información de forma analítica. Se presentan las tres técnicas más empleadas para realizar el proceso de matematización de las curvas características para su posterior digitalización.

PALABRAS CLAVES: ajuste, curvas, características, bombas, rotodinámicas

Adjustment of the characteristic curves of rotodynamic pumps

ABSTRACT

Traditionally, the information related to the performance of rotodynamic pumps has been provided graphically, by means of their four characteristic curves: head-capacity, efficiency-capacity, power-capacity and NPSHr-capacity. Nowadays, stimulated by the widespread use of computers, rotodynamic pump manufacturers have begun to use mathematical equations to replace the graphical form to provide information related to their pumps and as a more expeditious means of studying the hydraulic behavior of pumping systems. In this way, it is essential to define the methods for obtaining the mathematical expressions representative of the characteristic curves of the pumps, from the graphs and/or data provided by the manufacturer, since these do not provide this information in an analytical form. The three most commonly used techniques are presented to perform the process of mathematization of the characteristic curves for their subsequent digitization.

KEYWORDS: adjustment, curves, characteristics, pumps, rotodynamics

CITMA CERTIFICADO
Mayo 2024-RECIBIDO APROBADO Junio 2024
Esta obra está bajo una licencia internacional creative commons attribution-noncommercial 4.0
SciELO

01 INTRODUCCIÓN

En muchos casos los análisis hidráulicos de los sistemas de bombeo deben ser resueltos por la vía analítica, ya sea manualmente o mediante el uso de equipos de cómputo. En este último caso, resulta imprescindible expresar matemáticamente las curvas características de las bombas rotodinámicas a partir de los gráficos presentados por los fabricantes, ya que estos raramente modelizan analíticamente el comportamiento de estos equipos (Riaño y Lorence 1986). En este aspecto conviene explicar que, normalmente, la información relativa al comportamiento de una bomba aparece recogida en gráficas del catálogo del fabricante, y en pocas ocasiones se adjunta también una tabla de valores correspondientes a un ensayo normalizado de la bomba.

La precisión y la validez en todo el rango de esta información suele ser bastante desconocida, sobre todo cuando se trata de bombas en servicio durante mucho tiempo y con un mantenimiento deficiente, para el caso de bombas que se encuentren en explotación. En cualquier caso, dado que se trata de las características de una gama de bombas, la información corresponde al promedio de las prestaciones de ese conjunto, en base al ensayo normalizado de las mismas, por tanto, debe aceptarse una dispersión en los valores (De Eça Guimaraes et al. 2012).

Con el objeto de determinar con mayor claridad cuál debe ser la garantía de los datos en servicio de una bomba, se recomienda consultar las normas de pruebas y ensayos de grupos de bombeo, entre las que destacan las normas ISO 9906:2012 en su anexo A (ISO 2012) y la ANSI/HI 14.6-2022 (ANSI/HI 2022). En todas ellas se emplea el concepto de zona y curva de garantía de una bomba, tal y como se resume en la figura 1, donde se establece la banda de confianza de la curva de una bomba rotodinámica genérica.

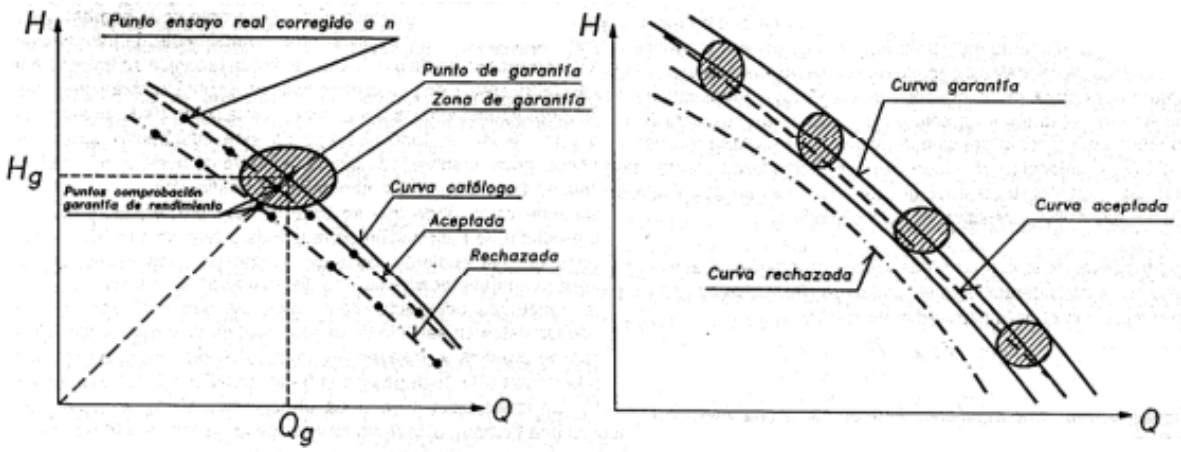

Figura 1. Expresión gráfica de la norma ISO 9906 Anexo A para el ensayo de bombas rotodinámicas.

Los datos funcionales y topológicos de las bombas rotodinámicas en un sistema de bombeo, deben ser definidos mediante sus características de funcionamiento, incluyendo sus curvas características adecuadas. Estas curvas representativas de los valores del caudal versus carga, potencia, eficiencia y NPSHr son proporcionadas por un fabricante y son presentadas mediante algún tipo de función de correlación ajustada o a través de un conjunto representativo de sus puntos característicos, resultando ser imprescindibles para realizar cualquier análisis hidráulico del sistema de bombeo. Por su parte, la inercia, que como es sabido puede tener una importancia crucial cuando se realizan cálculos de fenómenos transitorios en el sistema, debe ser obtenida también del fabricante o estimada a partir de algunas de las fórmulas disponibles en la literatura De Eça Guimaraes et al. 2012).

Sin embargo, este proceso de digitalización de las curvas características de las bombas rotodinámicas no está exento de problemas de precisión que pueden surgir de los métodos de digitalización de dichas curvas. Esto es un aspecto que los usuarios finales deben conocer, qué tan precisos son estos procedimientos y cómo se generan, teniendo en cuenta su implicancia en el proceso de selección y evaluación de una bomba rotodinámica. Este es un tema de vital importancia, en un momento donde la industria del sector avanza hacia los catálogos electrónicos con más prestaciones, los cuales se pueden encontrar en línea en las páginas web oficiales de los fabricantes y/o asociaciones y como parte de los paquetes de análisis hidráulico de los programas de selección de bombas.

02 DESARROLLO

La forma de las curvas características de las bombas rotodinámicas es un aspecto importante del comportamiento hidráulico de estas vinculado muy directamente con la velocidad específica, Nq. En general, para esta clase de bombas, una reducción de la carga, da lugar a un aumento del caudal y viceversa, pero la razón de variación es diferente para bombas que tienen distinta velocidad específica. Para bombas de baja velocidad específica, las curvas de carga-capacidad son en general planas, volviéndose más empinadas según crece la velocidad específica, aunque la mayor o menor inclinación de las curvas también está asociada con la relación entre el área de salida del impelente y el área de la garganta de la caja, en lo que se conoce como Teoría de las Áreas (Martínez 2011).

FACTORES RELACIONADOS CON EL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE LAS BOMBAS ROTODINÁMICAS Y SU RELACIÓN CON LA VELOCIDAD ESPECÍFICA

Las curvas H-Q, en las que la carga disminuye al aumentar el caudal se denominan estables. En una curva H-Q estable, a cualquier valor de la carga le corresponde un solo valor del caudal. En contraste, las curvas H-Q inestables son aquellas en las que se produce una gama de caudales para los que aumenta la carga al aumentar el caudal. En este caso, se pueden asociar dos o más valores del caudal con un solo valor de carga. Este tipo de curvas se presenta generalmente en casos de muy baja velocidad específica (Pérez 2012).

Para el caso de la curva de potencia absorbida *P-Q* de una bomba rotodinámica, para aquellas de diseño de canal lateral, la máxima potencia absorbida se da para $Q = 0$. En las bombas de flujo radial la potencia absorbida aumenta al crecer el caudal, ya que $P_o \approx (0{,}4 \div 0{,}6) \cdot P_{opt}$. La máxima potencia absorbida por las bombas de flujo mixto se produce aproximadamente para Q_{opt} volviendo a caer con caudales mayores. En el caso de las bombas de flujo axial, la máxima potencia absorbida se produce cuando $Q = 0$, cayendo al ir aumentando los caudales (Sterling 2003).

La curva de rendimiento o eficiencia η-*Q* aumenta inicialmente al aumentar el caudal hasta llegar a un punto máximo en el caudal óptimo de la bomba, cayendo después al seguir aumentando el caudal. La convexidad superior de la curva de eficiencia-capacidad se hace más aguda según aumenta la *Nq*. Por último, la forma de la curva de *NPSHr-Q* depende en gran medida de la velocidad específica como puede verse en la figura 2 (Sterling 2003).

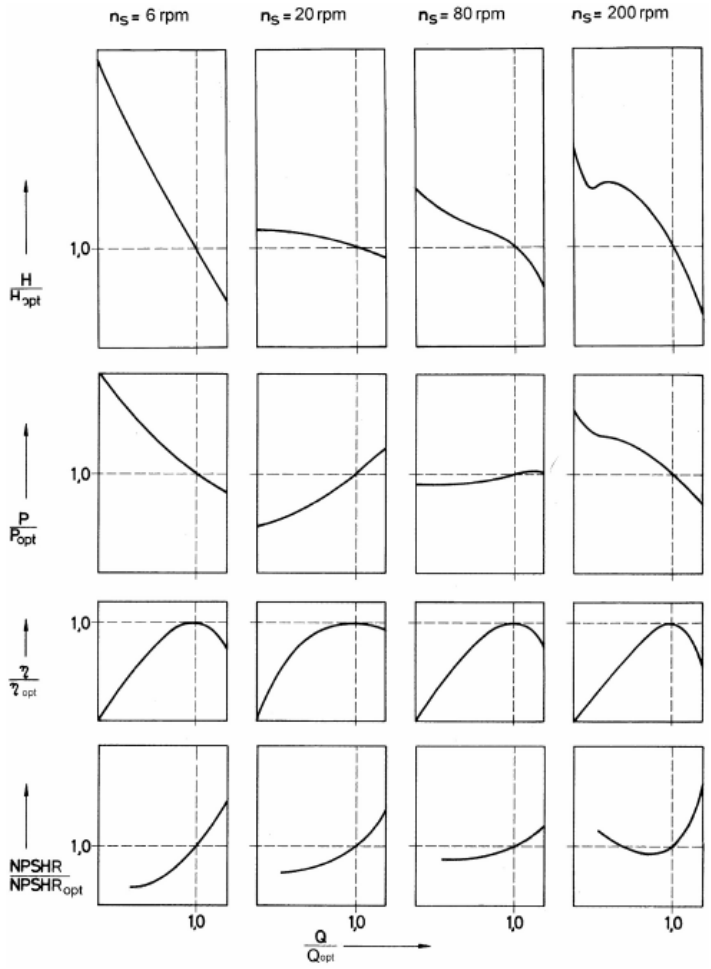

Figura 2. Influencia de la velocidad específica *Nq* en la forma característica de las curvas adimensionales de las bombas rotodinámicas.

PROCESO DE DIGITALIZACIÓN DE LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LAS BOMBAS ROTODINÁMICAS

Un software de selección y evaluación de bombas debe reproducir con la mayor precisión posible las curvas de las bombas publicadas por un fabricante, con el fin de poder ayudar al cliente a evaluar la bomba para una aplicación determinada. La clave para generar curvas digitales precisas es el método con el que se guardan y muestran los datos característicos de la bomba. Todas las formas de digitalización de las curvas características de las bombas rotodinámicas implican la obtención de puntos de datos de los fabricantes de bombas. Estos puntos característicos pueden extraerse de las curvas en papel publicadas o recopilarse directamente de los fabricantes.

Regresión polinomial

Es el método más empleado para obtener los polinomios representativos de las curvas características de las bombas rotodinámicas. Consiste en tomar varios puntos a lo largo de las curvas características de las bombas rotodinámicas y realizar un análisis de regresión polinómica para todo el intervalo de dominio de la función. Para realizar esto deben tenerse en cuenta los puntos singulares (cambio de pendientes e inicio y final de las curvas características) computando un mínimo de siete puntos y un máximo de 21. Estos polinomios que describen las respectivas curvas características son los que se utilizan en los programas de selección de bombas.

Una vez obtenidas las ecuaciones polinómicas representativas de las curvas características, se descartan los puntos de datos originales y estas se pasan a representar mediante las referidas formulaciones. Dependiendo de la forma de la curva original publicada, estas expresiones polinómicas pueden ser o no una representación precisa.

Usualmente se proponen para las bombas rotodinámicas polinomios de segundo grado para todas las ecuaciones características. En general, el orden de los polinomios de ajuste en función del caudal, puede ser mayor, consiguiendo con ello una mejora en la bondad del ajuste, siempre y cuando se disponga de una buena y amplia base de datos experimental. Esto está más justificado en el caso de bombas de tipo mixto, axial y con otros impelentes de diseño especial. No obstante, la elevación del grado del polinomio presenta serios inconvenientes, como una mayor incertidumbre en el valor de los coeficientes y un error mayor en la extrapolación. Estas desventajas se acrecientan cuando se dispone de pocos puntos de ensayo y pertenecientes a un rango relativamente estrecho entorno al punto óptimo, situación bastante frecuente.

Para obtener las ecuaciones que representan las curvas características de las bombas se seleccionan una serie de puntos representativos de estas y se aplica el Método de los Mínimos Cuadrados para encontrar las expresiones matemáticas correspondientes (Pérez Franco 2012). Los formatos de ecuaciones más usados que modelan las cuatro curvas características de diseño de las bombas rotodinámicas son (Turiño 1996) (Martínez 2011):

Curva carga-capacidad, (*H-Q*): $$H = A \pm BQ - CQ^2 \qquad (1)$$

donde: *H*: carga que desarrolla la bomba, (m); *A*: coeficiente del polinomio representativo de la curva *H-Q* que define el valor de la carga que desarrolla la bomba para caudal cero o válvula cerrada, (m); *B* y *C*: coeficientes del polinomio representativo de la curva *H-Q* que están en función de las pérdidas de carga en el interior de la bomba, (s/m^2), (s^2/m^5) respectivamente y *Q*: caudal impulsado por la bomba, (m^3/s).

Curva potencia-capacidad, (*P-Q*): $$P = D \pm EQ \mp FQ^2 \qquad (2)$$

donde: *P*: potencia absorbida por la bomba, (kW); *D*: coeficiente del polinomio representativo de la curva *P-Q*, que define el valor de la potencia consumida por la bomba para caudal cero, (kW) y *E* y *F*: coeficientes del polinomio representativo de la curva *P-Q* dependientes de las pérdidas de potencia de la bomba, ($s \cdot kW/m^3$), ($s^2 \cdot kW/m^6$) respectivamente.

Curva eficiencia-capacidad, (η-*Q*): $$\eta = GQ - HQ^2 \qquad (3)$$

donde: η: eficiencia de la bomba, (adim.) y *G* y *H*: coeficientes del polinomio representativo de la curva η-Q, (s/m^3), (s^2/m^6) respectivamente.

Curva $NPSH_r$-capacidad, (*$NPSH_r$-Q*): $$NPSH_r = I - JQ + KQ^2 \qquad (4)$$

donde: $NPSH_r$: *NPSH* requerida por la bomba, (m) e *I*, *J* y *K*: coeficientes del polinomio representativo de la curva $NPSH_r$-*Q* que describen las características de succión de la bomba, (m), (s/m^2), (s^2/m^5) respectivamente.

En estas ecuaciones, el coeficiente *A*, *D* e *I* son siempre positivos ya que corresponden a la carga y la potencia a válvula cerrada o caudal nulo y el valor inicial de la $NPSH_r$. Los coeficientes *C* y *H* son siempre negativos, dada la concavidad hacia abajo tanto de la curva de carga-capacidad como la de eficiencia-capacidad. El resto de los coeficientes, adoptan valores negativos o positivos en función de la forma de la curva característica, particularidad que se puede representar mejor en su formato

adimensional, en función de la velocidad específica de la bomba. Esto dependerá de la posición del valor máximo o mínimo del polinomio en el primer cuadrante de análisis de la bomba (Cabrera 2009).

Cuando se trata de mostrar las curvas características de la bomba en un software, una curva de regresión polinómica simple como las anteriores, en algunos casos puede tender a no representar fielmente la curva de la bomba original en algunos puntos singulares o a suavizar dichas anomalías, pudiendo tener consecuencias menores en el mejor de los casos o significativas en el peor. Podría ocurrir un escenario más perjudicial si la curva de regresión polinómica aumentara significativamente por encima de la curva real. En este caso, el programa puede sugerir una bomba viable que podría no cumplir con los criterios del punto de diseño. Además, si la bomba funciona en áreas donde la curva de regresión polinómica se desvía de las curvas publicadas por el fabricante, el usuario final podría obtener cifras de uso de energía y costos operativos erróneos.

Analizando la figura 3, se puede ilustrar los problemas asociados con el método de regresión polinómica simple de digitalización de curvas. En la figura 3 se muestran las curvas de carga-capacidad, que, para el caso, las negras son las curvas reales probadas proporcionadas por el fabricante, mientras que las de color magenta, superpuestas sobre las primeras, son las generadas por una herramienta de selección de bombas mediante una regresión polinómica simple. El recuadro es una vista cercana de las anomalías en este caso de estudio.

Regresión por función por partes

Este tipo de regresión ha sido muy utilizada por los autores para la obtención de los polinomios representativos de las curvas características de las bombas rotodinámicas. Especialmente se ha empleado para aquellas bombas con una velocidad específica media-alta, las cuales poseen curvas características con cierto grado de inestabilidad (véase figura 2). Una función definida por partes (también denominada función multipartes, función por partes, función por pedazos, función por intervalo, función seccionada o función definida por tramos o trozos) de una variable real x, es la relación cuya definición está dada por varios conjuntos disjuntos de su dominio (conocidos como subdominios).

Una función por trozos es continua en un intervalo dado si está definida en el intervalo, las expresiones matemáticas apropiadas que constituyen a la función son continuas en ese intervalo, y no hay discontinuidad en ningún punto extremo de los subdominios en ese intervalo. Para determinar si los puntos extremos de los subdominios son puntos de continuidad, hay que comprobar que los límites laterales de la función coincidan. En la figura 3 se puede observar un ejemplo ilustrativo en el recuadro ampliado.

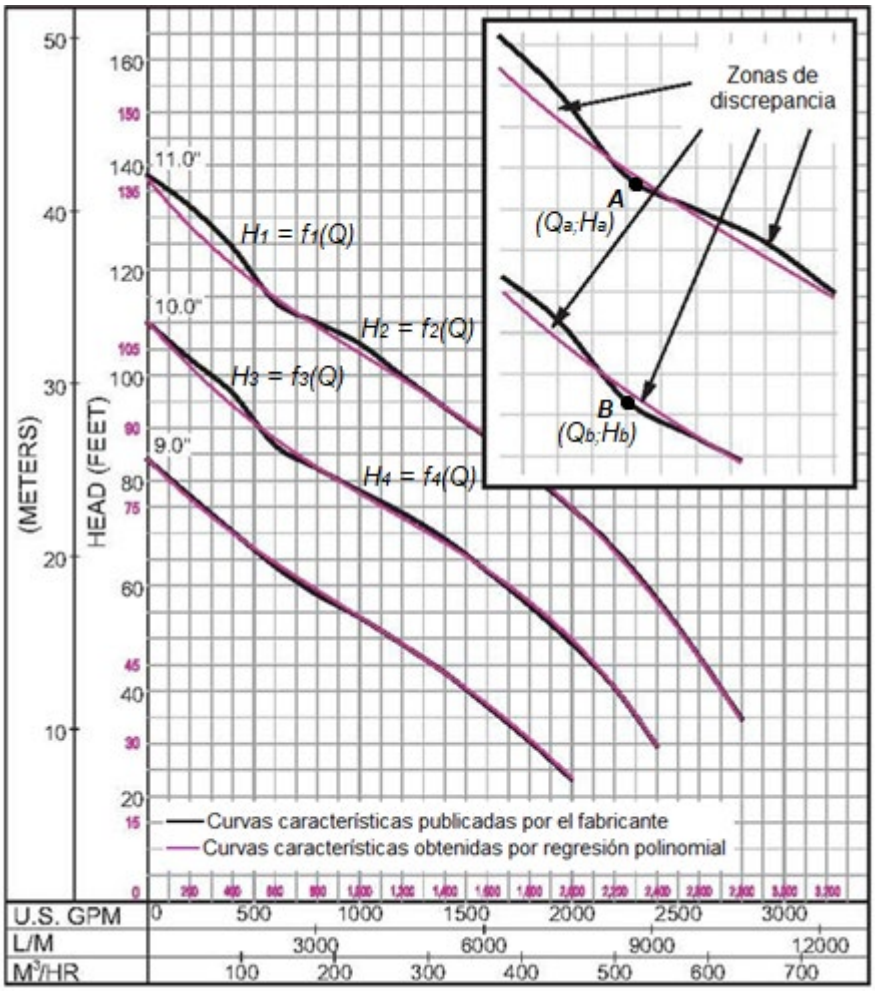

Figura 3. Curvas características de carga-capacidad de una bomba rotodinámica (originales brindadas por el fabricante y modelizadas por un polinomio).

En principio, el método de trabajo consiste en determinar los propios intervalos de trabajo y obtener el polinomio de mejor ajuste para cada tramo. Estos nodos o puntos de corte que son los puntos extremos de cada sección, son los llamados puntos singulares de las curvas características de las bombas rotodinámicas. Para el ejemplo de la figura 3, estas coordenadas son las correspondientes a los puntos A y B.

Los polinomios de mejor ajuste para cada intervalo deben cumplir con los siguientes criterios: describir la física del problema con la mayor sencillez posible (menor grado y de términos posibles), alto coeficiente de correlación, R^2 (superior a 0,99 en la medida de lo posible) y el menor valor del error relativo medio, δ_{rm} (inferior al 1% sería lo deseable). Para definir el subdominio real para cada tramo (intervalo de la variable independiente) basta con evaluar las funciones obtenidas del proceso de ajuste a ambos lados de un punto de corte y quedarse con aquella que cumpla mejor las condiciones definidas anteriormente.

Tomando el ejemplo de la figura 3, se trata de definir el subdominio real de los tramos a la izquierda y a la derecha de los puntos A o B de las dos curvas generales de carga-capacidad para los diámetros del impelente de 11 y 10 pulgadas, respectivamente. Una vez obtenidos los dos polinomios representativos de ambos tramos ($H_1 = f_1(Q)$ y $H_2 = f_2(Q)$ para la bomba con impelente de diámetro 11" o $H_3 = f_3(Q)$ y $H_4 = f_4(Q)$ para la bomba con impelente de diámetro 10") y, se procede a evaluarlos para el punto característico A o B según sea el caso, y aquel que cumpla las tres condiciones

apuntadas arriba, será el que se tome como referente para cada intervalo. Para este caso ilustrativo, si la función $H_1 = f_1(Q)$ fuera la que cumpliera dichos requisitos, entonces se define que el subdominio real del tramo a la izquierda del punto A sería: (0 gpm $\leq Q \leq$ 620 gpm), mientras que el del intervalo a la derecha será, por ejemplo: (620 gpm $< Q \leq$ 2800).

Regresión spline cúbica

Los splines son un método de interpolación que minimiza la curvatura general de una superficie a aproximar, resultando en una curva suave que pasa exactamente por los puntos deseados. Una función spline está formada por varios polinomios, cada uno definido sobre un subintervalo, que se unen entre sí obedeciendo a ciertas condiciones de continuidad. Se puede entender como una secuencia de segmentos de curvas o polinomios que se conectan entre sí para formar una sola curva continua, como una colección de trozos de curvas, en las que los extremos inicial y final están conectados. En la teoría de aproximación, un spline se define como un polinomio de grado n a trozos cuyos segmentos tienen continuidad C_{n-1} (continuidad de orden n-1). Se utilizan para aproximar curvas con formas complicadas. Producen buenos resultados con polinomios de grado bajo, evitando así las oscilaciones indeseables en la mayoría de las aplicaciones, que se producen con polinomios de grado elevado (Fenómeno de Runge) (Paluszny et al. 2005).

En la actualidad, por su simplicidad en su representación y la facilidad de cómputo, los splines se están convirtiendo en una herramienta matemática popular para la representación de curvas en informática, particularmente en el terreno de los gráficos por ordenador. Precisamente, esta peculiaridad es la que se utiliza para la descripción de las curvas características de las bombas rotodinámicas en aquellos casos que son demasiadas complicadas para definirlas usando una sola curva o función polinómica (Stephens 2011).

Los splines de menor grado que cumplen con las condiciones de practicidad y precisión, son los lineales, parabólicos y cúbicos. Su diferencia viene dada por el grado máximo de los polinomios que lo forman en cada intervalo y las condiciones de regularidad en los puntos internos. La principal razón por la que los splines cúbicos son los más usados es por el hecho de que da como resultado un polinomio interpolador tal que es la función más suave que pasa por los puntos (xi, yi) interpolados (Paluszny et al. 2005).

De forma general, para una curva spline de regresión, para cada intervalo se ajustan polinomios de orden n y se incluyen restricciones de forma que las derivadas sean continuas hasta el orden n-1. En el caso particular de las curvas splines cúbicas o spline de grado 3 se deben cumplir las siguientes restricciones:

Cada polinomio debe pasar por los puntos de corte que lo delimitan (principio de continuidad)

La primera derivada de los polinomios debe de ser continua. La primera derivada de cada polinomio debe pasar por los puntos de corte que lo delimitan.

La segunda derivada de los polinomios debe de ser continua. La segunda derivada de cada polinomio debe pasar por los puntos de corte que lo delimitan.

Típicamente se seleccionan polinomios de grado n = 3, lo que se conoce como splines cúbicos con nodos equiespaciados. Estos se emplean con frecuencia ya que, a partir de la segunda derivada, el ojo humano no aprecia la discontinuidad en los nudos (Paluszny et al. 2005).

Por otro lado, los coeficientes del polinomio local cúbico que se está definiendo en el intervalo dado quedan relacionados con los coeficientes de los polinomios de los intervalos colindantes por

ambos lados. Si se toma el intervalo [x_{i-1}, x_i] entonces el polinomio cúbico de splines se puede escribir en función del nodo de la izquierda x_i según la forma (Gotay 2004):

$$S^{(3)}(x) = a_0^i + a_1^i(x-x_i) + a_2^i(x-x_i)^2 + a_3^i(x-x_i)^3 \qquad (5)$$

donde el supraíndice *i* de los todos los coeficientes representa el intervalo donde está definido dicho polinomio splines. Este polinomio debe de satisfacer las condiciones de interpolación de la función:

$$S_i^{(3)}(x_i) = y_i \qquad (6)$$

y además debe de satisfacer las condiciones de continuidad para la primera derivada y para la segunda derivada como ya se ha apuntado:

$$S_i^{(3)}(x_i^-) = S_i^{(3)}(x_i^+) \qquad (7)$$

$$S_i^{(3)}(x_i^-) = S_i^{(3)}(x_i^+) = m_i \qquad (8)$$

$$S_i^{(3)''}(x_i^-) = S_i^{(3)''}(x_i^+) \qquad (9)$$

cómo se puede ver en las expresiones anteriores se denotó como m_i el valor de las primeras derivadas. Después de obligar que el polinomio satisfaga todas las condiciones anteriores se obtiene una serie de ecuaciones que relacionan a los coeficientes del polinomio con los valores de y_i y de m_i según se muestra:

$$a_o^i = y_i \qquad (10)$$

$$a_1^i = m_i \qquad (11)$$

$$a_2^i = \frac{2m_i - m_{i-1}}{\Delta x} - 3\frac{y_i - y_{i-1}}{\Delta x} \qquad (12)$$

$$a_3^i = \frac{m_{i-1} - m_i + 2\,\Delta x\, a_2^i}{\Delta x^2} \qquad (13)$$

Debido a que dependen de los valores de m_i es necesario resolver un sistema de ecuaciones donde las incógnitas son los valores de m_i según la expresión:

$$m_{i-1} + 4m_i + m_{i+1} = \frac{3}{\Delta x}(y_{i+1} - y_{i-1}) \qquad (14)$$

Si se conocen los valores: $m_0 = f'(x_0)$ y $m_n = f'(x_n)$ entonces el sistema anterior tiene una matriz tridiagonal simétrica y de diagonal estrictamente dominante (y, por tanto, invertible), brindando una única solución (sistema de ecuaciones 15)

$$\begin{cases} 4m_1 + m_2 = \frac{3}{\Delta x}(y_2 - y_0) - m_0 \\ m_{i-1} + 4m_i + m_{i+1} = \frac{3}{\Delta x}(y_{i+1} - y_{i-1}) \\ m_{N-2} + 4m_{N-1} = \frac{3}{\Delta x}(y_N - y_{N-2}) - m_N \end{cases} \qquad (15)$$

Una vez conocidos todos los valores de m_i se sustituyen en las expresiones anteriores para calcular todos los coeficientes a_{0i}, a_{1i}, a_{2i} y a_{3i} de cada uno de los polinomios splines definidos en cada intervalo.

Con este método de regresión de tipo spline cúbica, se puede realizar un análisis numérico más robusto, permitiendo representar las curvas con una mayor precisión con respecto a las curvas características originales de las bombas rotodinámicas publicadas por el fabricante. Para aplicar este procedimiento, se deberá recopilar tantos puntos de datos como sea necesario para ajustarse con precisión a las formas de las curvas características publicadas y utilizar esta base de datos guardados para representar la curva publicada original en el programa de selección de bombas (Stephens 2011).

En la figura 4 se muestran las curvas de carga-capacidad del mismo fabricante en negro. Las curvas verdes superpuestas se generan mediante una herramienta de selección de bombas que utiliza un análisis de regresión spline cúbica. Este método obliga a las curvas a pasar por cada punto de datos recopilados. Luego se suavizan las curvas de un punto a otro para proporcionar una visualización clara y precisa de la curva de rendimiento de la bomba. El caudal y la carga nunca se exageran ni subestiman significativamente en ningún punto del rango de la curva. Los usuarios finales pueden utilizar estas pantallas con confianza al realizar evaluaciones de bombas.

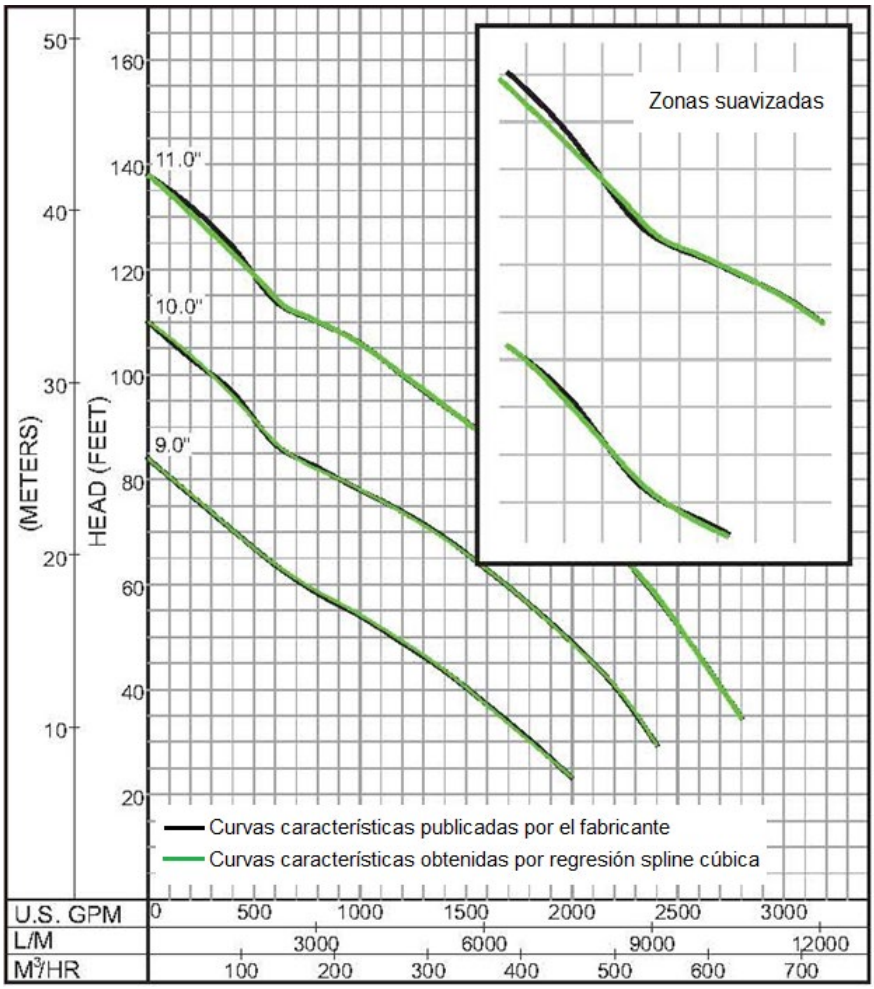

Figura 4. Curvas características de carga-capacidad de una bomba rotodinámica (originales brindadas por el fabricante y las obtenidas por una regresión spline cúbica).

Incluso las mejores técnicas de análisis numérico no pueden predecir anomalías entre puntos de datos. Si la curva característica que se va a digitalizar tiene este tipo de anomalías o singularidades, es imperativo que se recopilen suficientes puntos de datos dentro y alrededor de ese rango. Como mínimo, los puntos de datos deben recopilarse en los extremos y en el pico o valle de la singularidad. Lo ideal sería sumar un par de puntos más entre ellos. Esto permite que la herramienta de selección muestre la representación más precisa de los datos de desempeño originales y que el proceso de evaluación y selección continúe sin selecciones falsas (Stephens 2011).

Para reproducir resultados precisos y confiables, se debe recopilar un conjunto de datos del fabricante de la bomba y calcular el otro conjunto de datos. Al generar curvas, no es exacto que un programa de software intente recopilar y reproducir ambos conjuntos de datos del fabricante. Esto dejaría abierta la posibilidad de errores. Por ejemplo, se conoce que la eficiencia y la potencia de la bomba son funciones mutuas, una se calcula tomando como parámetro la otra y viceversa. En este sentido, se puede seleccionar un gasto, una carga y una eficiencia o del gráfico y luego realizar un cálculo manual de la potencia correspondiente y puede darse el caso que la potencia calculada no coincide con la potencia que se muestra en el gráfico.

Por este motivo, sólo se debe tomar del fabricante un conjunto de datos empíricos, eficiencia o potencia para luego calcular el otro. Además, los datos de eficiencia informados por la mayoría de los fabricantes de bombas suelen tener mucha más granularidad que los datos de potencia. Es decir, normalmente existe un rango más amplio de valores de eficiencia en el rango de operación de la bomba que en el rango de valores de potencia. Por este motivo, suele ser más preciso digitalizar los datos de eficiencia del fabricante y luego calcular los datos de potencia, que al revés.

EJEMPLO DE APLICACIÓN

Para ver el efecto que la digitalización puede tener en la generación de curvas de potencia y eficiencia, se puede observar las curvas de la figura 5. En este ejemplo, el programa de selección de bombas intentó digitalizar las curvas de potencia isométricas y luego calcular las curvas de eficiencia isométricas a partir de la potencia. Se puede apreciar que las curvas de eficiencia representadas por el software están muy fuera de lugar, particularmente en y alrededor del rango operativo del 70% y más. No sólo las curvas isométricas de eficiencia están desalineadas, sino que los porcentajes claramente no coinciden con la curva publicada. La eficiencia total de la bomba está sobreestimada hasta en un tres por ciento.

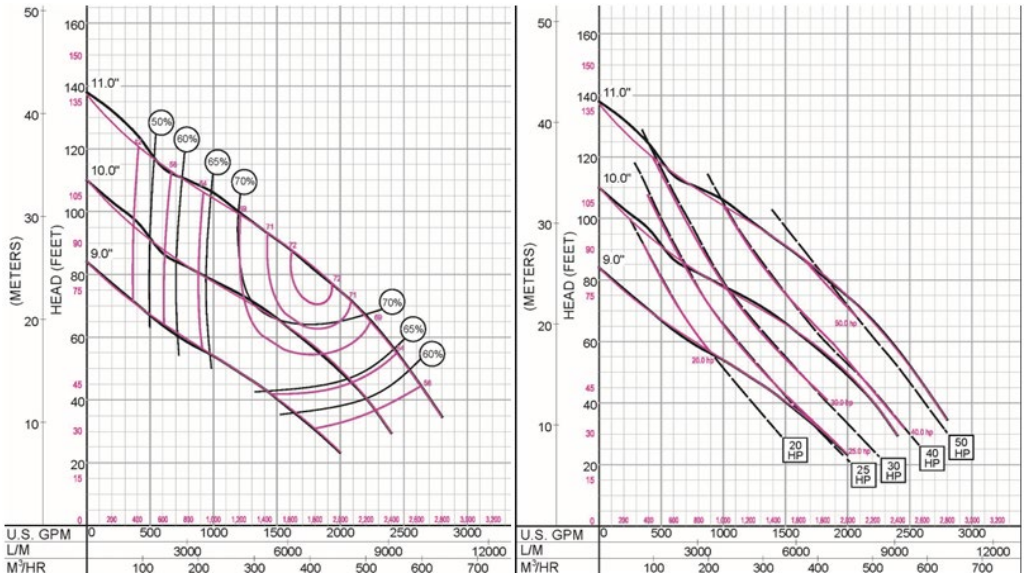

Figura 5. Curvas características de carga-capacidad, isopotencia-capacidad e isoeficiencia-capacidad de una bomba rotodinámica (originales brindadas por el fabricante y las calculadas modelizadas por una regresión polinómica).

Las curvas de carga-capacidad y la de potencia-capacidad del fabricante se superponen con las curvas del software de selección de bombas. Las curvas de potencia se representan muy bien para caudales bajos. Sin embargo, para el rango de potencia mostrado, el intervalo de potencias para las curvas de 30 a 50 HP se ve bastante limitado para caudales mayores. No se extienden hasta agotar los caudales como deberían. Este es un caso de datos faltantes y también puede generar confusión, como ocurre con las curvas de eficiencia mal representadas.

Las imprecisiones de estas curvas pueden plantear dos problemas. El primero se refiere a los errores de la eficiencia de la bomba. Por ejemplo, supongamos que esta bomba funcionara con un impulsor de 11 pulgadas a su caudal de máximo rendimiento de 1800 galones por minuto durante un año, y supongamos que los costos de suministro son de $0,15 por kWh. Si se sobrevalora el rendimiento en sólo dos puntos porcentuales, a lo largo de un año los costes de funcionamiento de esta bomba pudieran aumentar en casi 1500 dólares.

El segundo inconveniente se refiere a las curvas de potencia. Las curvas de potencia truncadas que se muestran en la gráfica de la derecha de la imagen, no se extienden a los caudales máximos. Esto es importante porque los motores de las bombas suelen dimensionarse para la potencia sin sobrecarga de la curva de diseño, que suele corresponder a los caudales de parada. Si los clientes no pueden descifrar cuál es la potencia en los caudales máximos, no podrán dimensionar y seleccionar correctamente un motor.

En el caso de las curvas de la figura 6, el software de selección de bombas digitalizó correctamente las curvas de carga-capacidad del fabricante utilizando un análisis de regresión de splines cúbicos. Las curvas isométricas de eficiencia-capacidad son muy precisas en todos los puntos del gráfico, y el rendimiento nunca es sobreevaluado. Por su parte, las curvas de isopotencia versus capacidad también coinciden muy bien con las del fabricante, dado que son curvas de potencia calculadas y, lo que es más importante, los puntos correspondientes a los caudales máximos son más precisos.

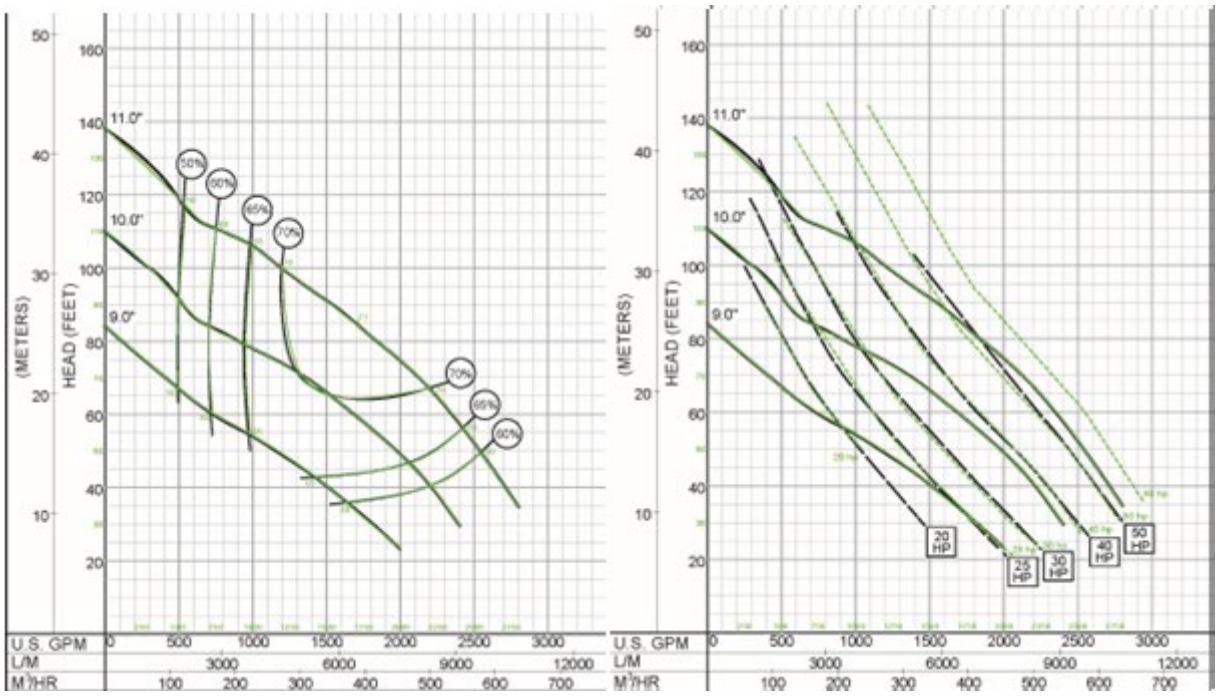

Figura 6. Curvas características de carga-capacidad, isopotencia-capacidad e isoeficiencia-capacidad de una bomba rotodinámica (originales brindadas por el fabricante y las calculadas modelizadas por una regresión spline cúbica).

Los splines de regresión, en específico, los cúbicos, suelen dar mejores resultados que la regresión polinómica por sufrir menos varianza. Esto es así, porque a diferencia de los polinomios que deben usar un grado alto para aumentar la flexibilidad, los splines introducen un mejor ajuste al modelo controlando el número de nudos, su localización y distribución, manteniendo fijos a la vez los grados de libertad, produciendo estimaciones más estables con este enfoque numérico. Como otra ventaja añadida, a diferencia de los polinomios, los splines también nos permiten aumentar la flexibilidad solo en aquellas regiones donde la función parezca cambiar rápidamente.

03 CONCLUSIONES

Cuando se trabaja con un programa de selección de bombas rotodinámicas, se debe esperar que este represente con la mayor precisión posible las curvas características de las bombas. Para que un programa de software comprenda y utilice los datos característicos de una bomba rotodinámica, se deben primero convertir estos a un formato que el programa pueda leer. Este proceso de digitalización debe reflejar con precisión la curva de la bomba publicada por el fabricante para ayudar al cliente a evaluar la bomba para una aplicación.

Las imprecisiones en la digitalización y representación de curvas pueden provocar selecciones inadecuadas de bombas y motores (que han quedado fuera de este estudio), para evitar luego cálculos incorrectos de los costos operativos de los equipos y por ende de los sistemas de bombeo. Sería ideal que los usuarios conocieran las técnicas de digitalización empleadas por cada software de selección de bombas, con el fin de poder entender cada procedimiento de trabajo en cada caso. Con el fin de ayudar a tomar una decisión informada y consciente al elegir una bomba dentro de un paquete de software determinado, es que se ha elaborado este artículo.

Se mostraron las ventajas y desventajas de cada método para digitalizar y obtener las curvas características de las bombas rotodinámicas. Se demuestran en el ejemplo ilustrativo las deficiencias

de utilizar un análisis de regresión polinómica simple para almacenar y mostrar ciertas curvas características de un fabricante. Como se puede apreciar, se encuentran zonas en las que la curva digitalizada se desvió significativamente de la curva del fabricante del caso de estudio. También se demostró que un análisis de regresión spline cúbica generaba una curva mucho más precisa, por lo que se plantea usar este método cada vez que sea posible. Esto es de especial interés para las bombas rotodinámicas de diseño vertical con valores medios y altos de la velocidad específica, cuyas curvas características presentan este tipo de anomalías.

04 REFERENCIAS

American National Standards Institute/Hydraulic Institute (ANSI/ HI) (2022). "ANSI/HI 14.6-2022: Rotodynamic Pumps For Hydraulic Performance Acceptance Tests", 84 pp., ISBN 978-1-935762-46-1, Washington D. C., United States.

Cabrera E. (2009). "Ingeniería hidráulica aplicada a los sistemas de distribución de agua", Editorial Unidad Docente Mecánica de Fluidos, Universidad Politécnica de Valencia, t. 1 y 2, 3ra edición, ISBN 8-461339-49-5, Valencia, España.

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), 1ra edición, ISBN 978-84-8363-780-7, Valencia, España.

Gotay J. (2004). "Matemática Aplicada", Editorial ENPSES, ISBN 03887-3887, La Habana, Cuba.

International Organization for Standardization (ISO) (2012). "ISO 9906:2012-Rotodynamic pumps-Hydraulic performance acceptance tests-Grades 1, 2 and 3", 52 pp., 2nd edition, Ginebra, Suiza.

Martínez Y. (2011). "Metodología para el diseño hidráulico de las estaciones de bombeo para acueducto", Tesis de doctorado, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría" (Cujae), La Habana, Cuba.

Paluszny M., Prautzsch H. y Boehm, W. (2005). "Métodos de Bézier y B-splines", Editorial Universitätsverlag Karlsruhe, ISBN 3-937300-47-3, Baden-Wurtemberg, Alemania.

Pérez D. (2012). "Estaciones de Bombeo", Editorial Félix Varela, ISBN 978-959-07-1379-8, La Habana, Cuba.

Riaño F. y Lorence M. (1986). "Algunas consideraciones sobre el punto de operación de una bomba y su determinación matemática", Ingeniería Hidráulica, 7 (1): 86-92, ISSN 0253-5696, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), La Habana, Cuba.

Stephens G. (2011). "Pump Curve Accuracy", Pumps&Systems Magazine, ISSN 1065-108X, Cahaba Media Group, Birmingham, Alabama, United States. Extraído de: https://www.pumpsandsystems.com/pump-curve-accuracy en diciembre de 2023.

Sterling SIHI (2003). "Principios básicos para el diseño de instalaciones de bombas centrífugas" (monografía), Sterling Fluid Systems Group, 7ma edición, Madrid, España. Extraído de: https://www.sterlingsihi.com/cms/es/Spain/home/navegacion-rapida/descargas/libros.html en julio de 2018.

Turiño I. M. (1996). "Procedimientos metodológicos para el diagnóstico operacional en sistemas de bombeo mediante modelos matemáticos", Tesis de doctorado, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Central de las Villas "Marta Abreu", Santa Clara, Cuba.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Yaset Martínez Valdés https://orcid.org/0000-0001-9770-022X

Participó en la elaboración del marco metodológico para la obtención de los distintos procedimientos para la predicción analítica de las curvas características de las bombas rotodinámicas, para su posterior proceso de digitalización.

Félix Riaño Valle https://orcid.org/0000-0002-9342-6064

Realizó contribuciones en el diseño de la investigación, análisis de los resultados y en la revisión y redacción del trabajo en su versión final.

Yilian Álvarez Gil https://orcid.org/0009-0003-7644-0694

Trabajó en el procesamiento de los datos del caso de estudio, haciendo contribuciones en su análisis e interpretación. Participó en la búsqueda de información y en la redacción final del trabajo.

Influencia del tratamiento magnético en la turbidez, conductividad y pH del agua.

Nuria de los Ángeles Vaillant López E-MAIL: nuriavl@civil.cujae.edu.cu
Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH). Universidad Tecnológica de La Habana.

Rosmery Velázquez Díaz E-MAIL: vdrosmery97@gmail.com
Empresa Constructora Integral Artemisa, San Cristóbal, Artemisa.

Guillermo Ribeaux Kindelán E-MAIL: ribeaux@uo.edu.cu
Centro de Electromagnetismo Aplicado (CNEA), Universidad de Oriente, Santiago de Cuba.

RESUMEN

El creciente déficit de agua potable ha motivado a la comunidad científica a incorporar nuevos métodos y tecnologías para elevar su calidad. El tratamiento magnético se presenta como una tecnología innovadora, económica, eficiente, amigable con el medio ambiente y de fácil aplicación. A partir de las características físico-químicas presentadas por las aguas analizadas, se evidencian efectos favorables y significativos con la aplicación del tratamiento magnético para la conductividad, el pH y la turbidez. Se observó que el pH a modo general aumenta sus valores hasta un 11.03 %, mientras que la turbidez disminuye hasta 44.44 %. En el caso de la conductividad los valores de la misma manifiestan aumentos y descensos reportando valores de 0.31 % y 2.79 % respectivamente. Estos resultados podrían ser el preámbulo para el estudio de los procesos de coagulación floculación.

PALABRAS CLAVES: tratamiento magnético, propiedades del agua, conductividad, pH, turbidez

Influence of magnetic treatment on turbidity, conductivity and ph of water

ABSTRACT

The growing deficit of drinking water has motivated the scientific community to incorporate new methods and technologies to raise its quality. Magnetic treatment is presented as an innovative, economical, efficient, environmentally friendly and easy-to-apply technology. Based on the physical-chemical characteristics presented by the analyzed waters, favorable and significant effects are evidenced with the application of magnetic treatment for conductivity, pH and turbidity. It was observed that the pH in general increases its values up to 11.03%, while the turbidity decreases up to 44.44%. In the case of conductivity, its values show increases and decreases, reporting values of 0.31% and 2.79% respectively. These results could be the preamble for the study of flocculation coagulation processes.

KEYWORDS: magnetic treatment, properties of water, conductivity, pH, turbidity

CITMA CERTIFICADO

Marzo 2024-RECIBIDO APROBADO Abril 2024

Esta obra está bajo una licencia internacional creative commons attribution-noncommercial 4.0

SciELO

01 INTRODUCCIÓN

Las actividades del hombre han provocado una modificación en las características de los recursos hídricos, alcanzando niveles de contaminación que hacen el agua no apta para consumo humano. Por esta razón, los procesos de tratamiento de agua son cada vez más necesarios. Teniendo en cuenta que la mayoría de los tratamientos de potabilización se realizan con productos químicos no degradables, caros y de difícil almacenamiento, se hace necesario el estudio y uso de tecnologías económicas, amigables con el medio ambiente, 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.

Durante los últimos años, se ha venido estudiando el uso del TM para el tratamiento de agua para consumo humano e industrial, y en el tratamiento de aguas residuales. El tema ha recibido mucha atención de la comunidad científica por la implicación que tiene en lo económico y en el cuidado del medio ambiente, conociendo que los tratamientos convencionales poseen los inconvenientes del uso de químicos y aguas de desecho contaminantes.

De forma general, no existen dudas de la efectividad del TM, pero si coexisten discrepancias en la explicación del fenómeno que se observa, existiendo incógnitas en la explicación teórica de la influencia del campo magnético (CM) sobre las propiedades de los sistemas acuosos. Este asunto se complejiza si tiene en cuenta la influencia de parámetros externos como la temperatura, el material de las tuberías y el amplio rango de frecuencias, intensidad, tiempo de exposición y velocidad del fluido, entre otros. Muchos artículos describen diferentes tipos de mecanismos de acción del CM, y varios de ellos incluso, están en conflicto entre sí. En el área de las aplicaciones industriales, el TM se utiliza esencialmente como método físico alternativo en la prevención o disminución de deposiciones de incrustaciones. (Vaillant et al. 2022)

Se conoce que los efectos del TM en sistemas acuosos provocan variaciones en las propiedades de éstos, conllevan a cambios en la cinética de todos los procesos físico−químicos y, por tanto, en los procesos tecnológicos y biológicos. Estas variaciones generalmente son pequeñas, sin embargo, las consecuencias en los ámbitos industrial y biológico son muy significativas (Alfonso et al., 2009). El Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado (CNEA) líder del desarrollo de esta tecnología, la ha aplicado en sistemas ingenieros industriales desde 1992, en el sector agrícola desde el 2000 y en el pecuario-avícola desde el 2009, con ejemplos bien documentados que muestran que es un método eficiente para prevenir y reducir las incrustaciones, el tratamiento de combustibles, mejorando el intercambio de calor, ahorrando energía, y recursos materiales. (Arias et al. 2018; Campo et al. 2015; Ribeaux 2012);

Los acondicionadores magnéticos se ubican en sistemas donde circula el fluido a través del CM, en el que interactúan las líneas de inducción magnética directamente con el fluido (Figura 1). Para garantizar un tratamiento eficiente deben cumplirse fundamentalmente dos requerimientos: el primero es lograr la perpendicularidad de líneas de inducción magnética $\vec{B}$ con respecto a la velocidad del fluido. El segundo requerimiento está relacionado con el tiempo de exposición del fluido al CM, que se logra instalando el acondicionador magnético un ángulo de 90º respecto a la línea de flujo (Vaillant et al. 2022).

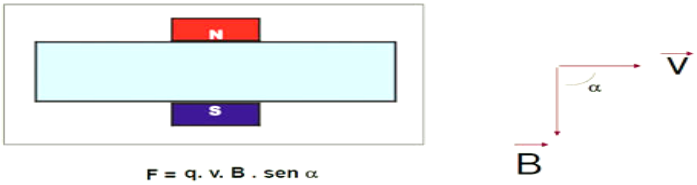

Figura 1. Diagrama de circulación de un fluido por el CM. (Nuñez et al. 2018)

02 DISEÑO EXPERIMENTAL Y MATERIALES

La fuente de CM utilizada fueron dos dispositivos acondicionadores magnéticos de la marca NOVAMAG, diseñados y construidos por el CNEA, los cuales son a base de imanes de tierras raras, hechos de una aleación de neodimio, hierro y boro: ($Nd_2Fe_{14}B$). Estos dispositivos fueron acreditados en el laboratorio de caracterizaciones magnéticas del CNEA y las características en correspondencia con las condiciones experimentales establecidas son las siguientes: En las figuras 2, 3 y 4 se muestran el mapa de los valores de inducción de CM en la zona de trabajo obtenidos mediante simulación en realizada con el software profesional COMSOL Multiphysics 3.2.

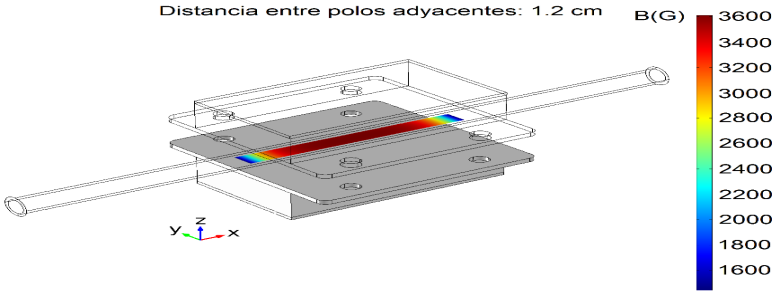

Figura 2. Mapa de escala de valores de inducción de CM para una distancia entre polos de 1,2 cm.

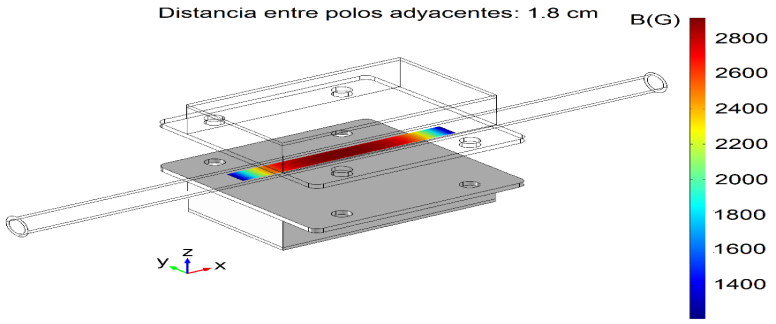

Figura 3. Mapa de escala de valores de inducción de CM para una distancia entre polos de 1,8 cm.

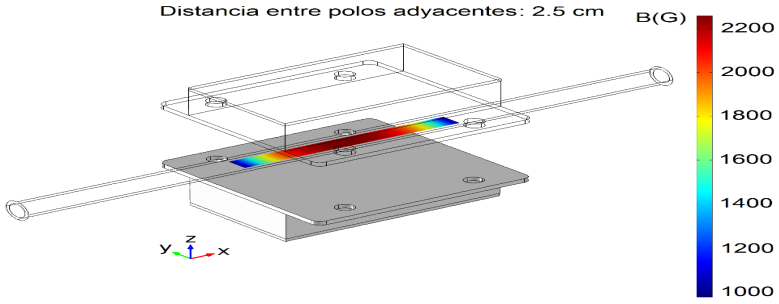

Figura 4. Mapa de escala de valores de inducción de CM para una distancia entre polos de 2,5 cm.

Sistema experimental

El sistema experimental del presente estudio, (Figura 5) estuvo conformado por una bomba peristáltica (Thermo Fisher Scientific, FH 100) para generar el flujo del fluido; una tubería de silicona de 2,85 m de longitud y 0,7 cm de diámetro interior, dos vasos de precipitado con capacidad de 1 000 mL cada uno y dos pares de imanes permanentes, (acondicionadores magnéticos de marca NOVAMAG, con No. Serie IP 17-06669 que fueron descritos anteriormente) con polos norte y sur, ubicados uno frente al otro para generar un CM homogéneo. El tamaño de cada uno de los imanes es de 5 cm x 3 cm x 0,1 cm (largo, ancho y alto) y la separación entre cada par fue de 6,5 cm orientados en repulsión.

Figura 5. Sistema experimental. (elaboración propia)

El tiempo promedio que tardó en circular un litro de agua fue 354 segundos para un área de sección transversal del conducto de $3.85*10^{-5}$ m^2, con un gasto de $2.82*10^{6}$ m^3/s, siendo la velocidad de circulación del flujo 0.16 m/s. Para uno, dos y tres pases de la muestra por los acondicionadores magnéticos el tiempo de estancia del agua en los mismos es de 1.36, 2.73 y 4.09 s respectivamente.

La temperatura de las muestras se mantiene constante a 23 − +1°C durante el proceso de medición, las mismas fueron conservadas a bajas temperaturas para el análisis de la memoria magnética a las 48 h y 72 h luego de recibir el TM. La tabla 1 resume el número de muestras tomadas para analizar cada propiedad, en función de la intensidad del CM, la separación entre imanes y el número de pases. La muestra en blanco (MB, en adelante) corresponde al agua que no fue tratada.

Tabla 1. Número de muestras para análisis de las propiedades físico-químicas. [fuente: elaboración propia]

Muestras	Intensidad de CM (Gauss)	Separación entre imanes (cm)	Número de pases de la muestra por el CM
1 TM 1	3250	1,2	1
1 TM 2			2
1 TM 3			3
2 TM 1	2678	1,8	1
2 TM 2			2
2 TM 3			3
3 TM 1	2170	2,5	1
3 TM 2			2
3 TM 3			3
Muestra en blanco (MB)		-	-

La investigación se llevó a cabo en tres etapas:

Primera etapa: análisis de las propiedades de la muestra en blanco (sin exposición magnética).

Segunda etapa: aplicación del CM a intensidades y tiempos de exposición diferentes a las muestras restantes y análisis de la conductividad, pH y turbidez luego de su exposición al CM.

Tercera etapa: estudio de la memoria magnética en las muestras con TM, luego de haber transcurrido 48 h y 72 h de su exposición al CM.

Durante los ensayos de laboratorio se mantiene constante la temperatura de las muestras a 23−+1℃, las mismas fueron conservadas en frascos de vidrio herméticos.

Determinación de conductividad, pH y turbidez

La conductividad refleja la capacidad de la solución para conducir la electricidad de acuerdo con la concentración y movilidad de los iones y la temperatura del agua. En el presente estudio, la temperatura del agua se mantuvo estable para garantizar que la conductividad sólo refleja la concentración real de iones. La conductividad se determinó mediante el uso de un conductímetro con microprocesador ASIC – COND 51+ (Fig. 6). Fabricante Instruments XS.

Para la determinación del pH se usó el sensor digital pHmetro de sobremesa pH 50+ DHS Fabricante Instruments XS. La turbidez se determinó mediante el uso de un turbidímetro nefelométrico del modelo D-110, siguiendo las recomendaciones de uso especificadas en el manual del instrumento. Fabricado por DINKO Instruments. (figura 6)

Figura 6. Conductímetro, pHmetro y Turbidímetro nefelométrico. (elaboración propia)

03 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 2 se muestran los valores de conductividad, pH y turbidez, obtenidos en el laboratorio para la muestra en blanco y las muestras tratadas bajo diferentes condiciones de tiempo, intensidad de campo, y número de pases. Los resultados obtenidos durante los ensayos se basan fundamentalmente en el promedio de las mediciones efectuadas y son admisibles de acuerdo con los valores de límite máximo admisible (LMA, en adelante) establecidos por la NC 827: 2012 para agua potable.

Tabla 2. Resultados de los análisis realizados a las aguas de la fuente Cosculluela para la MB y las muestras con TM.

	Intensidad de campo (Gauss)	Separación entre imanes (cm)	Número de pases	Conductividad (µS/cm)	PH	Turbidez (NTU)
MB				645,00	7,08	1,98
0 h	3 250	1,2	1	646,00	7,33	1,83
			2	643,00	7,34	1,78
			3	640,67	7,32	1,89
	2 678	1,8	1	647,00	7,31	1,91
			2	643,00	7,37	1,90
			3	644,67	7,34	1,86
	2 170	2,5	1	641,33	7,31	1,86
			2	641,33	7,32	1,89
			3	640,67	7,40	1,90
48 h	3 250	1,2	1	638,00	7,62	1,10
			2	640,67	7,65	1,20
			3	640,00	7,82	1,56
	2 678	1,8	1	643,67	7,61	1,81
			2	641,33	7,65	1,63
			3	644,67	7,52	1,28
	2 170	2,5	1	642,67	7,55	1,45
			2	645,67	7,47	1,27
			3	642,00	7,49	1,26
72h	3 250	1,2	1	638,33	7,68	1,88
			2	638,33	7,77	1,94
			3	627,00	7,82	1,81
	2 678	1,8	1	639,00	7,82	1,70
			2	637,00	7,82	1,89
			3	630,67	7,80	1,80
	2 170	2,5	1	637,33	7,86	1,70
			2	642,67	7,70	1,76
			3	641,00	7,76	1,83

Conductividad (µS/cm)

La figura 7 muestra la alteración de la conductividad. Las mayores variaciones se observan en la muestra con 3 250 G y tres pases a las 72 h, con disminución del 2,8 % respecto a la MB. También se observó un ligero aumento de 0,31 % respecto a la MB en la muestra con 2 678 G y un pase a las 0 h.

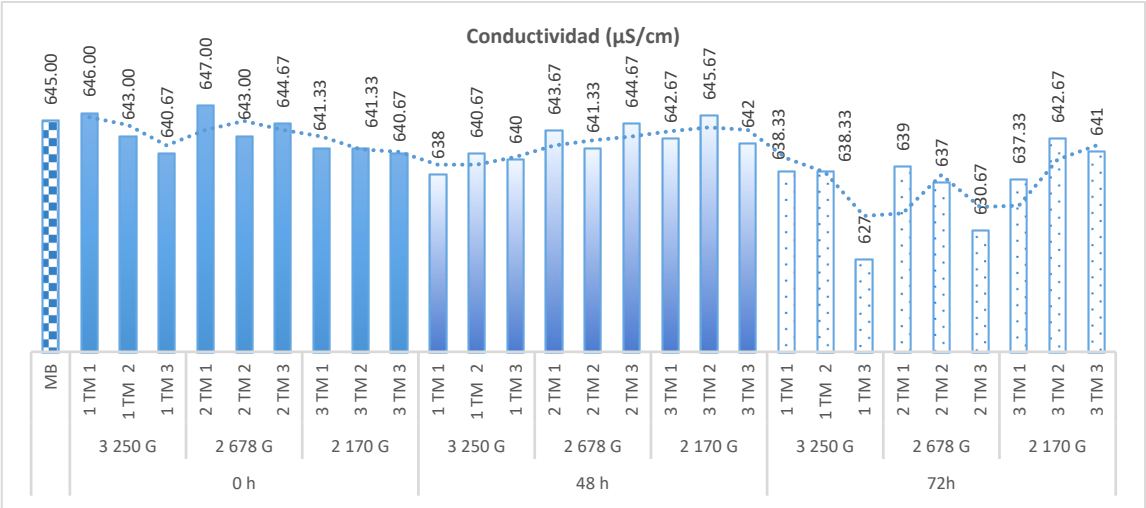

Figura 7. Valores de conductividad alcanzados por las muestras a las 0 h, 48 h y 72 h de aplicado el TM vs MB

pH

En el caso del pH, las muestras con TM aumentaron significativamente los valores respecto a la MB, esto se evidencia en la figura 8. El mayor aumento ocurre para la muestra a 2 170 G, de un pase y que fue analizada a las 72 h de aplicado el TM. (11%). En general, las mayores variaciones ocurren a las 72h luego del TM, con lo cual también se evidencia la existencia de un efecto del CM a largo plazo, lo que se conoce como memoria magnética.

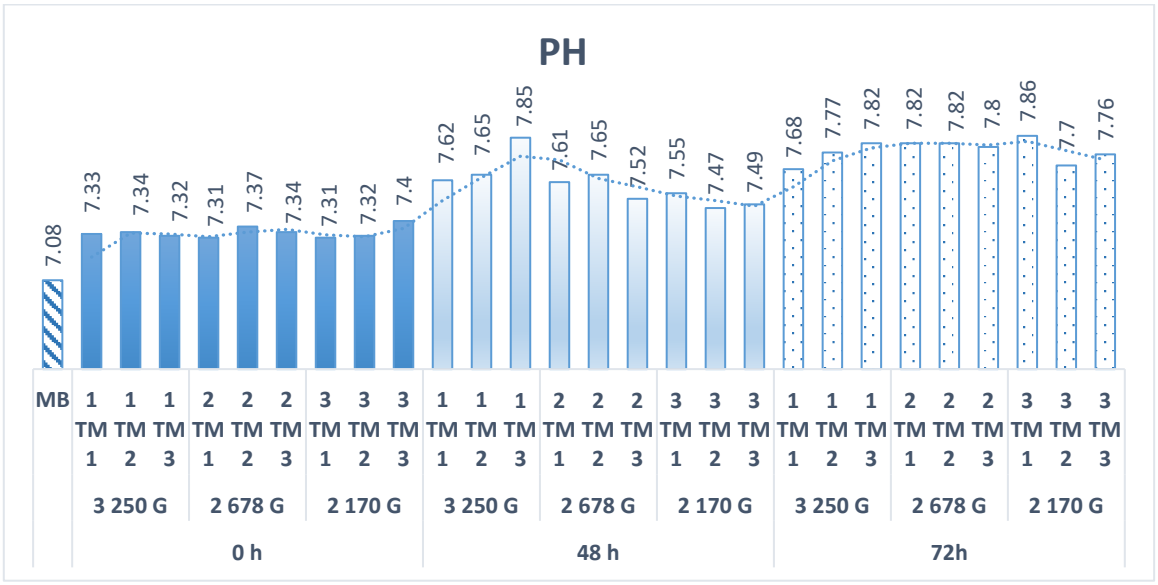

Figura 8. Valores de pH alcanzados por la muestra a las 0 h, 48 h y 72 h de aplicado el TM vs MB

Turbidez (NTU)

Turbidez (NTU)

El porcentaje de remoción de turbiedad indica la eficiencia de los sistemas de tratamiento de agua. El estudio de su comportamiento puede contribuir al ahorro de coagulantes en los procesos de clarificación. El comportamiento de este parámetro muestra resultados con diferencias significativas

al compararlas con la MB (figura 9). Bajo la influencia de CM la turbidez tiende a disminuir de forma significativa, tanto para las 0 h, como a las 48 h y 72 h de aplicarse el TM. El mayor porciento de variación ocurre al disminuir hasta 1.10 ntu para la muestra a las 48 h con intensidad de 3250G y 1 pase. (44.4%). De forma general las muestras con mayores disminuciones fueron las analizadas a las 48 h luego del TM.

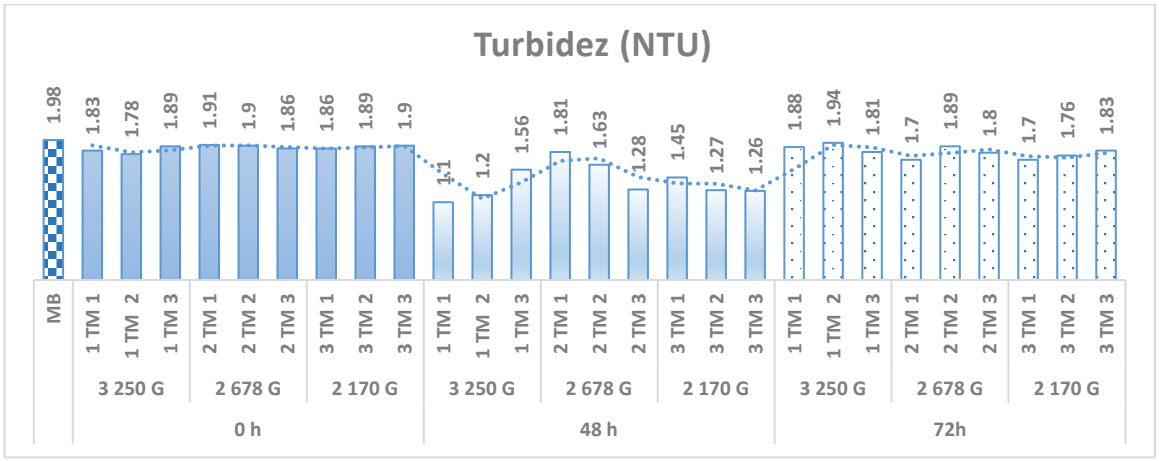

Figura 9. Valores de turbidez alcanzados por la muestra a las 0 h, 48 h y 72 h de aplicado el TM vs MB

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Una vez obtenidos los datos de los resultados experimentales se procedió a su procesamiento estadístico utilizando el Software Statgraphics Versión 15. Con el mismo se determinó Promedio, Sesgo Estandarizado y Curtosis Estandarizada de las tres intensidades de CM y pases aplicados en la investigación. Para determinar si existe diferencia estadísticamente significativa entre los diferentes tratamientos magnéticos y MB se aplicó la una prueba de Análisis de Varianza (ANOVA) y el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher.

Como resultado final del análisis estadístico, se determinó que tratamiento de intensidad 2170 G y un pase, es el óptimo en cuanto al nivel de CM y número de pases, resultado importante desde el punto de vista técnico y de aplicación ingenieril.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Es ampliamente conocido que el pH influye en la saturación y precipitación del CaCO3 en la solución. Por lo que el estudio del comportamiento del pH para aguas con TM adquiere importancia técnico económica para la industria.

Miao Xuefei (2013) investigó la efectividad de los campos electromagnéticos en la prevención del calcio en agua de refrigeración. Cuatro frecuencias diferentes y dos voltajes diferentes fueron adoptados para inducir campos electromagnéticos directamente en el agua con temperatura y velocidad de flujo constante. Las conductividades de la solución disminuyeron entre un 17% y un 25% de sus valores iniciales en los casos de TM, dependiendo de las diferentes frecuencias de pulsos eléctricos, mientras que en el caso no tratado se redujo en un 31%.

Hon Siau Shi (2014) investigó varios parámetros como pH, turbidez y sólidos suspendidos totales (SST), en agua sin TM y agua con 3 densidades de flujo magnético y velocidades de flujo diferentes, donde se obtuvo que el campo magnético redujo la turbidez y los SST de la muestra de agua alrededor

del 50% y 20% respectivamente. En la salida de la muestra de agua del sistema con CM, la concentración de Ca^{2+} y Mg^{2+} fue 90% y 20% más alta que el sistema sin CM. Además, a mayor caudal (1.5 ml/s), con dispositivos magnéticos invertidos, en la salida de muestra de agua se obtuvieron concentraciones 40% mayores que con los magnetizadores no invertidos. También, para mayor densidad de flujo magnético (0,4 T) se eliminó 40% más de calcio y magnesio. Concluyendo, la presencia de TM mejora la eliminación de incrustaciones y redujo la turbidez y SST, a mayor densidad de flujo magnético y mayores caudales.

Los experimentos de Karel Bartušek et al. (2017) muestran que la exposición de una muestra de agua desmineralizada a un campo magnético con gradiente en espiral durante 5 minutos dará como resultado una disminución de la conductividad iónica del agua, que probablemente se deba tanto a una variación en la disposición de las moléculas de agua como al campo electromagnético alterado en sus proximidades. La estabilidad temporal del cambio estructural de las moléculas no fue monitoreada; sin embargo, las mediciones repetidas no mostraron ningún signo de que se restauró la disposición original. En este contexto, no detectaron variaciones en los parámetros físicos, mecánicos y químicos del agua.

MEMORIA MAGNÉTICA

Por último, y como aspecto de interés, se destaca el hecho de que los efectos a largo plazo del CM, “Memoria Magnética”, en las condiciones establecidas se manifestaron a las 48 y 72 horas del TM.

En el 2012, Coey (2012) quien desde el 2002 y hasta la actualidad, viene haciendo aportaciones en este tema, agrega a sus estudios que el campo magnético no solo influye en la estructura y morfología del CaCO3 sino también que el agua podría adquirir una impresión magnética de larga duración (memoria). Aunque reconoce que los efectos de la memoria en el agua tienen una historia infeliz, su artículo se basa en la evidencia de un mecanismo de nucleación no clásico para el $CaCO_3$ y se recopilan trabajos en los cuales se pone en duda la teoría clásica de nucleación, sugiriendo una teoría en la que las soluciones de $CaCO_3$ (no saturadas) contienen racimos o grupos pre-nucleados termodinámica-estables llamados DOLLOPs (Dynmically-Ordered Liquid-Like Oxyanion Polymers). Estos DOLLOPs, serían los que, cuando están sujetas a un campo magnético alteran su composición y se deforman, favoreciendo un cierto tipo de estructura de racimo, y estos son los que permiten tener una gran memoria magnética en la solución.

En el 2014 los resultados obtenidos del trabajo de investigación de Vaca Jiménez (2014) parecerían indicar que se cumple la condición de cambio de velocidad de flujo cercano a los bordes de la tubería (al disminuir las incrustaciones en la primera experimentación). Además, en lo que respecta a la segunda parte de la experimentación, parece comprobarse la teoría de cambio estructural de las sales disueltas y lo correspondiente a la memoria magnética debido a la presencia de los DOLLOPs, ya que la disminución de incrustaciones en la caldera no corresponde a un cambio de régimen de flujo en el equipo.

En el 2018, Emil Chibowski Aleksandra Szcześ realizan una revisión de los enfoques más recientes de la última década. En general, se tuvieron en cuenta los cambios en la estructura del agua a través de los cambios de enlaces de hidrógeno, así como en los intraclusters y entre los interclusters, destacando que el progreso más notable fue logrado en 2012 por Coey, quien aplicó la teoría no clásica del mecanismo de nucleación de la formación de líquidos ordenados dinámicamente como polímeros de oxianión (DOLLOP) para explicar la acción del campo magnético. Su criterio para que

ocurra el efecto del campo magnético fue verificado experimentalmente (Chibowski and Szcześ 2018).

05 CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos, se concluye que el CM influye significativamente en cada una de las propiedades estudiadas (conductividad, pH y turbidez), en las condiciones establecidas de niveles de inducción de CM y número de pases, lo que se encuentra en correspondencia con los resultados obtenidos por diferentes autores consultados en la bibliografía.

Con el efecto del CM, los valores de la conductividad y la turbidez pueden disminuir hasta 2.8 % y 44,4% respectivamente; y el pH puede aumentar hasta un 11% respecto a la muestra en blanco.

El TM con intensidad 2 170 G y un pase, es el óptimo (mayores variaciones), en cuanto al nivel de inducción magnética y número de pases, resultando importante este resultado desde el punto de vista técnico económico y de aplicación ingenieril para la toma de decisiones.

Los efectos a largo plazo del CM (Memoria Magnética), en las condiciones establecidas en esta investigación, se manifestaron visiblemente a las 48 y 72 h del TM.

RECONOCIMIENTO

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.

06 REFERENCIAS

Alfonso D., Pérez C., Pérez I. y Silveira E. A. (2009). “Efecto del agua tratada magnéticamente sobre los procesos biológicos”. Revista Electrónica de Veterinaria. Vol 10 (4), 24pp. Málaga, España. ISSN: 1695-7504. http://www.veterinaria.org/revistas/redvet/n040409.html

Arias Gilart R., Berenguer Ungaro M., Vázquez Nigorenko J.A., Silveira Font J. y Alfaro Rodríguez C.E. (2018). “Disminución de las emisiones de monóxido de carbono con el tratamiento magnético del combustible”. Centro Azúcar. Cuba 45:21-31. ISSN: 2223-4861. https://centroazucar.uclv.edu.cu/

Campo Sofia M., Moro-Martínez A., León-Cañet M., Silveira-Font Y. y Falcón-Hernández J. (2015). “Tratamiento magnético sobre parámetros físico-químicos de muestras de petróleo”, Tecnología Química 35 (3): 271-281. ISSN: 0041-8420. Facultad de Ingeniería Química. Universidad de Oriente. Santiago de Cuba, Cuba.

Chibowski E. and Szcześ A. (2018). “Magnetic water treatment-a review of the latest approaches”. Chemosphere. Vol 203. 54-67pp. Elsevier Ltd. ScienceDirect, Online ISSN: 1879-1298. Impresión ISSN: 0045-6535. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.03.160.

Coey J.M.D. (2012) “Magnetic water treatment - how might it work?” Philosophical Magazine. Editorial Taylor & Francis. London, United Kingdom. Vol 92 (31). 1-9pp. ID Corpus: 96367372. DOI:10.1080/14786435.2012.685968

Karel Bartušek P.M., Fiala P., Máca J. and Dohnal P. (2017). “The eftect of spiral gradient magnetic field on the conductivity of water”. Water. Vol 9 (9) 664. Basilea, Suiza ISSN: 2073-4441 https://doi.org/10.3390/w9090664

Núñez Alvarez J., Berenguer Ungaro M., Llosas Albuerne Y. y Conde García R. (2018) “Tratamiento magnético en instalaciones turísticas: aportes desde le energía y el medioambiente” Nueva

Agenda Urbana: Energía, Atmosfera y Adaptación Humana. Barranquilla. Colombia. DOI:10.22517/23447214.1677. https://www.researchgate.net/publication/329541497/

Ribeaux Kindelán G. (2012). "Efecto de un campo magnético estático sobre la cristalización de la sacarosa en solución. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado. Editorial Universitaria. Universidad de Oriente. Santiago de Cuba.

Shi H.S. (2014). "Effect of magnetic field on scale removal in drinking water pipeline". Master Thesis. Faculty of Civil Engineering Universiti Teknologi Malaysia. 26pp. http://eprints.utm.my/id/eprint/77666/1/HonSiauShiMFKA20141.pdf

Vaillant López , N. ., Carreras Fernández, G. ., & Ribeaux Kindelán, G. (2022). Efectos del campo magnético en la dureza total, calor específico y punto de ebullición del agua. Ingeniería Hidráulica Y Ambiental, Vol 43(4), 76–87pp. Universidad Tecnológica de La Habana. Cuba. https://riha.cujae.edu.cu/index.php/riha/article/view/611

Xuefei M., Lan. X., Jiapeng. C., Zikang Y. and Wei H. (2013). "Experimental study on calcium carbonate precipitation using electromagnetic field treatment". Water Science & Technology. Vol 67(12). 2784-2790pp. London, Reino Unido. ISSN 0273-1223 EISSN 1996-9732 https://doi.org/10.21.2166/wst.2013.161

Vaca Jiménez S.D. (2014). "Aplicación de un campo magnético ortogonal al flujo en sistemas de agua para reducir la formación de incrustaciones". Revista de la Facultad de Ciencias Químicas. Universidad de Cuenca. Ecuador. No.10. ISSN: 1390-1869, ISSN-e: 2631-2948. https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/quimica/article/view/355

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, diseño experimental, corridas experimentales, análisis estadísticos, la redacción y revisión del trabajo.

Rosmery Velázquez Díaz https://orcid.org/0009-0000-5849-8540

Participó en la realización de las corridas experimentales y búsqueda de información.

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

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

Selección de técnicas de riego en la empresa agropecuaria Laguna Blanca

Pedro Manuel Cabrera Castro E-MAIL: juan. pcabrera@uo.edu.cu
Departamento de Ingeniería Hidráulica. Universidad de Oriente. Santiago de Cuba.

Pável Vargas Rodríguez E-MAIL: pvargas@uo.edu.cu
Departamento de Ingeniería Hidráulica. Universidad de Oriente. Santiago de Cuba.

Rafael Miguel Pacheco Moya E-MAIL: rpacheco@uo.edu.cu
Departamento de Ingeniería Hidráulica. Universidad de Oriente. Santiago de Cuba.

José Romero Morris E-MAIL: jrmorris@uo.edu.cu
Departamento de Ingeniería Hidráulica. Universidad de Oriente. Santiago de Cuba.

RESUMEN

Se caracteriza la infraestructura hidráulica de esta empresa, identificando problemáticas que afectan su productividad y uso eficiente del agua de riego, a partir de entrevistas a directivos y personal técnico, para establecer criterios de selección de técnicas de riego en áreas potencialmente agrícolas en secano. Del levantamiento realizado en la infraestructura de riego y drenaje, fondo de tierra de unidades productivas y análisis del complejo Agua, Suelo, Planta, el 58.6 % de las máquinas de Pivote Central están en explotación y se aprovecha, menos del 50 % del agua para el riego, por pérdidas por infiltración y otras causas, en los canales que conducen el agua. De la superficie agrícola, el 35 % del área está bajo riego y las instalaciones funcionan sin previa evaluación de los parámetros de manejo.

PALABRAS CLAVES: problemáticas de regadíos, infraestructura hidráulica, productividad del agua, eficiencia de riego

Selection of irrigation techniques at the Laguna Blanca agricultural company

ABSTRACT

The hydraulic infrastructure of this company is characterized, identifying problems that affect its productivity and efficient use of irrigation water, based on interviews with managers and technical personnel, to establish criteria for the selection of irrigation techniques in potentially rainfed agricultural areas. From the survey conducted on irrigation and drainage infrastructure, land fund of productive units and analysis of the Water, Soil, Plant complex, 58.6% of the Central Pivot machines are in operation and less than 50 % of the water is used for irrigation, due to losses by infiltration and other causes, in the canals that carry the water. Of the agricultural surface, 35% of the area is under irrigation and the facilities operate without prior evaluation of the management parameters.

KEYWORDS: irrigation issues, water infrastructure, water productivity, irrigation efficiency

CITMA CERTIFICADO

Junio 2024-RECIBIDO *APROBADO-Junio 2024*

Esta obra está bajo una licencia internacional creative commons attribution-noncommercial 4.0

SciELO

01 INTRODUCCIÓN

En las condiciones climatológicas actuales, constituye una prioridad, la protección y conservación de los recursos naturales del planeta, en particular el agua. A escala mundial, la disponibilidad de recursos de agua dulce fácilmente accesible es limitada, por lo que en las regiones áridas y semiáridas, en los países con una alta densidad de población y en la mayor parte del mundo industrializado, se ha comenzado a competir por su uso (Díaz 2018).

De acuerdo con las tendencias en las proyecciones demográficas y económicas, los recursos de agua dulce de los que todavía se puede disponer, constituyen una base estratégica para el desarrollo, la seguridad alimentaria y nutricional, la salud del medio ambiente acuático y, en algunos casos, la seguridad nacional (FAO 2006).

Cuba no está ajena a esta situación, en su condición de archipiélago largo y estrecho, enfrenta limitaciones importantes de sus reservas hídricas, en particular la región oriental del país, donde las precipitaciones constituyen la principal fuente de abasto para garantizar el preciado líquido que demanda el desarrollo del país.

En este contexto es imprescindible mejorar los niveles de eficiencia en la utilización del recurso hídrico en cada escenario de uso, en correspondencia con la Política Nacional del Agua promovida por la Dirección del país, los Objetivos de Desarrollo Sostenible y la Agenda 2030, el Plan de Estado para la Tarea Vida y en particular el Programa Sectorial de Ciencia, Tecnología e Innovación que promueve el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos para alcanzar la gestión integrada de los recursos hídricos.

Si se tiene en cuenta que la agricultura de regadío, es mucho más productiva que la de secano, aportando casi un 40% de la producción mundial de alimentos con menos del 20% de la tierra cultivada, el aumento de la producción destinada a satisfacer la demanda de alimentos del futuro debe obtenerse básicamente mediante la intensificación de la agricultura (Soto 2013).

Algunos autores indican que el 80 % de la producción adicional de alimentos procederá de la agricultura de regadío, sin embargo, a medida que aumentan las necesidades de alimentos, se hace más difícil incrementar las áreas bajo riego, fundamentalmente, por la baja disponibilidad de agua (Díaz 2018).

En Cuba es de vital importancia el aumento de la producción agrícola, debido a la demanda creciente de alimentos de la población, uno de los factores que incide en el incremento de la producción es el riego, en cuya actividad se utiliza aproximadamente el 70% del agua disponible, y aun así, es insuficiente en relación con las áreas potencialmente cultivables, debido a las insuficiencias en el manejo en particular y en su gestión ineficiente en general (Rodríguez 2023).

Varias técnicas de riego son empleadas para aplicar el agua a los cultivos, pero en los últimos años se ha incrementado el uso de los sistemas de riego presurizados por las ventajas que presentan y por ser economizadores de agua con respecto a los sistemas de riego superficiales. Esto conlleva indudablemente a una operación correcta de los mismos unido al conocimiento de su funcionamiento.

El riego moderno posibilita un ahorro de aproximadamente el 55 % del consumo de agua con relación a los métodos tradicionales, siempre que sean operados correctamente, de ahí la importancia de conocer su estado de funcionamiento (Melgarejo et al. 2019). En ese sentido, la evaluación de un sistema de riego comprende el estudio de la uniformidad de distribución y la eficiencia de aplicación así como el análisis del funcionamiento de todos los elementos del sistema

de riego, la uniformidad de riego del sistema constituye el indicador más importante del buen funcionamiento del mismo (Santos et al. 2010).

En la provincia de Santiago de Cuba, uno de los principales polos productivos que abastece a la población es la Empresa Agropecuaria Laguna Blanca, en las últimas dos décadas, se inició en la misma un Proyecto de Colaboración Internacional (PCI) para modernizar formas productivas que la integran, con el objetivo de aumentar la producción de alimentos del agro.

El análisis de la información revisada hasta el año 2022, reflejó que la infraestructura de riego no garantiza niveles elevados de eficiencia en el uso agroproductivo del agua, esta situación repercute negativamente en los rendimientos de los cultivos.

Este análisis contribuyó a actualizar, el complejo agua, suelo, planta, clima, así como, su infraestructura hidráulica y los parámetros de bombeo de los equipos de impulsión vinculados a los sistemas de riego, con el fin de identificar las deficiencias que inciden en la baja agroproductividad del agua de riego y adoptar medidas que contribuyan a incrementar la rentabilidad de las instalaciones.

02 CARACTERIZACIÓN DE LA EMPRESA

UBICACIÓN DE LA EMPRESA

La investigación se desarrolló en la Empresa Agropecuaria Laguna Blanca (EALB), ubicada en la llanura interior del municipio Contramaestre de la provincia Santiago de Cuba, donde comienza la llanura del Cauto, al Noroeste de este municipio, limitando por el Norte con la provincia de Holguín, por el Este limita con el Municipio de Palma Soriano, y al Sur con áreas del CAI Dos Río y, la zona de los Titi, al Oeste limita con el Río Contramaestre y la provincia de Holguín, como se muestra en la figura 1.

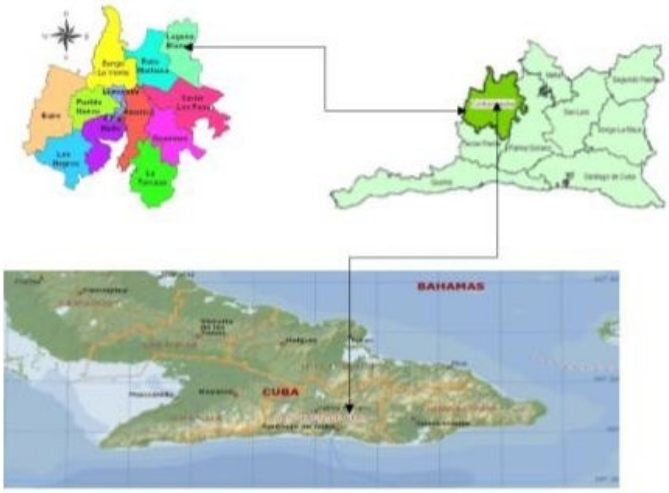

Figura: 1 Mapa general de localización de Laguna Blanca. (ENPA 2019)

La Unidad Empresarial de Base (UEB) Agropecuaria La Unión fue la forma productiva seleccionada para desarrollar la presente investigación y caracterizar los parámetros del complejo agua, suelo, planta, clima, para su realización a posteriori en las otras formas productivas pertenecientes a la Empresa y vinculadas al PCI anteriormente mencionado.

Para realizar el levantamiento se hizo un recorrido por dicha UEB, identificando en cada área la técnica de riego y drenaje existente, los tipos de cultivos y las principales dificultades que incidían en los bajos niveles de productividad del agua de riego, luego se efectuó un trabajo de mesa, unido a

entrevistas a directivos y especialistas de la entidad, así como la revisión y actualización de la información disponible.

ESTRUCTURA DE LA EMPRESA

La empresa fue creada el 24 de diciembre de 1979 por Resolución 235/79 del Ministro de la Agricultura, inicialmente con el nombre de Empresa de Cultivos Varios y Acopio Laguna Blanca, denominación que le fue cambiada por Empresa Agropecuaria Laguna Blanca mediante Resolución No. 439, de fecha 23 de Agosto de 2010, teniendo como objeto fundamental la comercialización de productos agropecuarios y forestales tanto producidos como adquiridos y brindar servicios agropecuarios, veterinarios y de reproducción de animales, encargada de abastecer al municipio cabecera, Santiago de Cuba de dichos productos. Cuenta con una plantilla de 318 trabajadores de 667, en proceso de perfeccionamiento empresarial.

Está conformada por la siguiente estructura: Dirección (área de regulación y control), tres Unidades Empresarial de Base (UEB), Agropecuaria La Unión, Prestaciones de servicios de riego y mecanización y Comercializadora y Transporte; una Unidad Básica de Producción Cooperativa (UBPC), el Cuartelito y además seis Cooperativas de Créditos y Servicios (CCS), Armando Rosales, Rafael Benítez, Ciro Redondo, Ramiro Betancourt, Lázaro Peña y José Martí, un grupo de atención y comercialización de usufructuarios.

CARACTERÍSTICAS DE LA UEB AGROPECUARIA LA UNIÓN

Tiene como misión producir viandas, tubérculos, hortalizas y frutas para la exportación y abastecer a la provincia de Santiago de Cuba. Cuenta con un fondo agrícola de 513,4 ha, 493,4 ha de ellas cultivables que están bajo riego mediante el proceso de rotación. Cuenta con cinco máquinas Pivot que riegan 109,4 ha, así como con 384 ha por riego superficial.

Fuente de abasto: Se abastece de la estación de bombeo de Arroyo Blanco, el agua se conduce por un canal magistral hasta las áreas de riego. La calidad del agua es apropiada para el riego de los cultivos propuestos.

Suelos: Según los estudios realizados por el Departamento de Suelos de la Delegación Provincial de la Agricultura (2010), el tipo de suelo que presenta las áreas de riego de esta UEB es pardo carbonatado, suelo poco erosionado y poco profundo, con un drenaje natural adecuado. En la tabla 1, se presentan algunas de las principales características del suelo que predomina.

Tabla 1. Principales características de los suelos (Merayo 2022).

Categoría de suelo predominante	Suelo pardo carbonatado
Velocidad de infiltración (mm/h)	12
Densidad aparente (g/cm^3)	1,1
Pendiente predominante (%)	0,85
Profundidad (m)	0,25
Capacidad de almacenamiento (mm)	28
Capacidad de campo (% Pss)	45
Conductividad eléctrica (dS/m)	1,8

Cultivos: Los principales cultivos cosechados son: 60 ha de Viandas (yuca, boniato y plátano), 383 ha de hortalizas (tomate, calabaza y pepino), 37 ha de granos (maíz y frijol) y 13 ha de frutas.

Clima: El clima del área de estudio es tropical. Las precipitaciones máximas se han registrado en los meses de mayo a octubre con valores de 1200-1400 mm, la evaporación anual es de 64,45 mm, las temperaturas máximas oscilan entre 31oC – 38oC y las mínimas entre 17oC – 23oC. La humedad

relativa anual es de 95 % en la mañana y de 53 % en la tarde. La tabla 2, brinda otras s características climáticas de la zona de estudio.

Tabla 2. Características climáticas (Merayo 2022)

Clasificación climática	Tropical
Precipitación media anual (mm/año)	790
Precipitación máxima mensual (mm/mes)	25
Velocidad del viento predominante (m/s)	3 - 4
Evapotranspiración media anual (mm/año)	43
Evapotranspiración máxima mensual (mm/mes)	22
Evapotranspiración máxima diaria (mm/día)	48
Humedad relativa mínima (%)	44 - 58
Humedad relativa media (%)	77

03 INFRAESTRUCTURA DE RIEGO

La Empresa Agropecuaria Laguna Blanca posee un fondo total de tierra dedicadas a cultivos agrícolas de 8012,04 ha, de ellas 6628.07 ha son cultivables, distribuidas como se presenta en la tabla 3, entre las cuatro formas productivas que la componen.

Tabla 3. Fondo tierra agrícola por formas productivas de la EALB (Merayo 2022)

Formas Productivas	Cantidad	Fondo de tierra agrícola (ha)	Fondo de tierra cultivable (ha)
Unidad Empresarial de Base	3	513,4	493,4
Cooperativa de Créditos y Servicio	6	5958,14	5525,27
Unidad Básica de Producción Cooperativa	1	128,1	116,0
En usufructo	1	1412,4	493,4

Del total de áreas cultivables, 932,0 ha (12,4 %) se prevé sean regadas con 29 máquinas de Pivote Central; 372,0 ha (5 %) con sistemas de riego por microaspersión; 1176,0 ha (15,7 %) mediante sistemas de riego superficial, mientras que de riego con Enrolladores solo 20 ha (0,3 %), lo cual es una representación mínima. En secano se cultiva más de la mitad de la superficie agrícola de la Empresa, 5000 ha (62,4 %), las cuales son potencialmente aptas para la instalación de sistemas de riego. Estas cifras evidencian la necesidad de introducir nuevas tecnologías de riego en cada una de las formas productivas que componen la Empresa, pero teniendo en cuenta criterios que conlleven a su selección apropiada.

SISTEMAS DE RIEGO Y DRENAJE EXISTENTES

Sistemas de Riego con máquinas de Pivote Central: De acuerdo a la distribución de las tierras cultivables mostradas en la tabla 1 y a las tecnologías de riego de que dispone la Empresa, las actividades de riego se han planificado con un total de 29 máquinas de Pivote Central Eléctrico, sin embargo, sólo 17 de ellas se encuentran disponibles y 12 están fuera de servicio principalmente por dificultades con el suministro de la electricidad, con estas 17 máquinas de riego se benefician 558 ha de las 932 ha planificadas con esta tecnología de riego, lo que representa el 59,8 % de la superficie total.

Estos sistemas constan de una estación de bombeo ubicada en los canales de riego, equipados con una electrobomba horizontal marca IDEAL con capacidad para entregar 166.65 m^3/h, con una presión de 392,26 kPa. Cada estación de bombeo se conecta con el punto de pivot por medio de una conductora soterrada, con diámetros que varían entre 200 y 250 mm y longitud variable en función del número de torres de la máquina y su espaciamiento.

Sistemas de Riego con Enrolladores: Existe un solo equipo instalado, el cual esta inutilizable debido a roturas y al déficit de piezas de repuesto; tiene instalada una motobomba modelo Caprary con capacidad para entregar 288 m^3/h, con una presión de 784,51 kPa. Otros parámetros de este equipo se brindan en la tabla 4.

Tabla 4. Parámetros de funcionamiento del Enrollador (EALB 2022).

Qe (L/s)	78,4	Número de posiciones	4
He (kPa)	666,8	Intervalo de riego (d)	7
Re (m)	25	Tiempo de operación diaria (h)	20
Diámetro de la manguera (mm)	90	Tiempo al inicio (h)	1,4
Longitud de la manguera (m)	120	Tiempo de avance (h)	7
Altura de enrollador (m)	3,2	Tiempo al final (h)	0,6
Angulo del sector de regado (º)	140	Tiempo de riego (h)	10
Separación entre hidrantes (m)	60	Tiempo de cambio (h)	1

Sistemas de riego por aspersión: Con esta técnica de riego se benefician 349,68 ha de una superficie total planificada de 372 ha. Cinco instalaciones de riego por aspersión están inactivas De los 115 sistemas portátiles que están diseñados para un área productiva de 372 ha, 5 están inactivos, los cuales representan una superficie de 22,32 ha, por lo que solo se cuenta con el 94 % de su capacidad de trabajo. Estos equipos fueron asignados a campesinos usufructuarios, la mayoría de los cuales, utilizan motobombas KBD y Lombardinas. La falta de piezas de repuesto constituye el principal problema que afecta a la explotación de estos sistemas.

Sistemas de riego superficial: Ocupa una extensión de 1176,0 ha y beneficia principalmente grandes extensiones de frutales, el deterioro del estado técnico de las instalaciones evidencia que no hay sistematicidad en el mantenimiento de la estructura de los sistemas instalados, lo cual unido a la ausencia de indicaciones técnicas para el manejo del agua de riego y las características intrínsecas de la técnica de riego, conlleva a la baja productividad del agua de riego.

Sistemas de drenaje superficial: La situación de los sistemas de drenaje de la Empresa se puede clasificar como deficiente, ya que más del 90 % de la superficie agrícola de toda la Empresa no dispone de sistemas de drenaje superficial. En intercambio con especialistas de la empresa de diseño del territorio se constata la ausencia de soluciones de proyecto para los problemas de drenaje, a esta situación también hay que agregar la mala calidad de más del 70 % de los suelos agrícolas, los cuales se encuentran entre las categorías III y IV de Agroproductividad.

Una superficie significativa estos suelos presentan malas condiciones de drenaje superficial e interno, con profundidades muy pequeñas, a veces del orden de los 7 cm, debajo de los cuales se encuentra una capa muy impermeable en forma de cascajo que limita la aireación de los suelos en la época de lluvias, estas condiciones, además del relieve llano característico de la Empresa conlleva a una afectación significativa de los rendimientos en los cultivos frutales, se pudo constatar que en total los sistemas de drenaje superficial abarcan una superficie de 18,6 ha y cubren una longitud de drenaje de 1,3 km.

Infraestructura hidráulica: El esquema de la infraestructura hidráulica se presenta en la figura 2, la fuente de abasto principal es el río Cauto, el agua para el riego se impulsa a partir de la estación de bombeo Arroyo Blanco por medio de dos conductoras de PEAD de 900 mm de diámetro diseñadas para conducir un caudal de 2,2 m^3/s hacia una caja de descarga y desde está se distribuye a través de un canal magistral hacia las áreas de riego. Se dispone además con los embalses: Aguacate, Vista Alegre y Mariana, así como, el rebombeo Carlito con captación en el embalse Vista Alegre hacia la finca de semillas y los canales primarios.

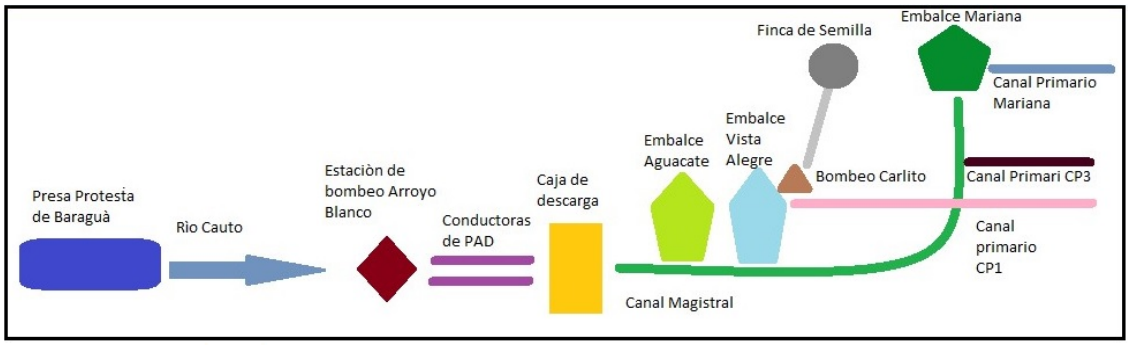

Figura 2. Infraestructura hidráulica de la Empresa Agropecuaria Laguna Blanca (Merayo 2022).

PRINCIPALES PROBLEMÁTICAS DETECTADAS

Las principales problemáticas que afectan la producción agrícola de la Empresa Agropecuaria Laguna Blanca se pueden resumir en:

La degradación de los suelos, condicionada por las limitaciones en las propiedades hidrofísicas de la mayoría de sus suelos agrícolas, la composición cualitativa de los mismos presenta condiciones muy desventajosas, determinadas entre otras por la presencia de factores limitantes como la erosión, la salinización y el deficiente drenaje natural superficial e interno, todo lo cual contribuye a identificar más del 70% de los suelos en las III y IV categorías de calidad, correspondientes a las de menor rango en la escala de agroproductividad de los suelos.

La gestión del agua es una problemática importante en la producción agrícola de la Empresa, ya que se estima que solo se aprovecha menos del 50% del agua de riego, debido a pérdidas por infiltración, fugas y otras causas en los canales que conducen el agua desde la fuente de abasto hasta las áreas de riego, también se constataron insuficiencias en el manejo del agua de riego, la no aplicación de métodos para pronosticar el momento oportuno para el riego, la no existencia de instrumentos y otras herramientas para evaluar la eficiencia de diferentes parámetros de manejo de riego en las instalaciones en explotación.

Otra problemática que afecta la producción agrícola de la Empresa es la insuficiente utilización de las tecnologías de riego, ya se ha dicho que más de la mitad de la superficie agrícola potencialmente apta de la Empresa, (5000 ha), no disponen de sistemas de riego.

La falta de cobertura del suelo debido al trabajo agrícola que conlleva el cultivo de frijoles en la Empresa, provoca una mayor erosión del suelo, resultando en la pérdida de nutrientes y la degradación de la calidad del suelo, esto condicionó que el suelo sea más vulnerable a posibles enfermedades y plagas, lo que a su vez afectó negativamente la producción agrícola. La falta de cobertura del suelo también contribuyó a la pérdida de humedad en el suelo, con la consecuente afectación al crecimiento de los cultivos y la productividad agrícola en general.

En resumen, la falta de cobertura del suelo en la Empresa Agropecuaria Laguna Blanca ha contribuido a incrementar la erosión, la pérdida de nutrientes, la vulnerabilidad a enfermedades, la pérdida de humedad y, en última instancia, afectar la producción agrícola de manera significativa. Todas estas problemáticas que afectan la producción agrícola de la empresa, requieren ser abordadas para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de la producción.

CRITERIOS PARA SELECCIONAR LAS TÉCNICAS A PARTIR DEL ANÁLISIS DEL COMPLEJO AGUA, SUELO, PLANTA

El análisis del complejo Agua – Suelo – Planta permitió estimar las potencialidades y limitaciones de la empresa para la producción agrícola y el uso racional del agua, así como, establecer criterios para seleccionar las técnicas más apropiadas para las áreas potencialmente agrícolas que actualmente se encuentran en secano.

Con relación a la fuente de abasto, se constató que su calidad es apta para los cultivos agrícolas que se fomentan en la empresa. A los efectos de diseño, interesa conocer además la disponibilidad y la accesibilidad del preciado líquido, así como el contenido de sales de diferente origen. En este sentido son aplicables los tres métodos de riego, aunque es válido aclarar, que en el caso de las técnicas de riego localizado, se debe tener en cuenta que las necesidades de filtrado son más exigentes y por ello el costo de inversión inicial puede ser mayor que las otras técnicas de riego.

Con relación a los suelos, las condiciones favorecen la instalación de técnicas de riego localizado principalmente en aquellas áreas con profundidades de la capa activa menores de 20 cm, poca capacidad de almacenamiento y velocidades de infiltración muy lentas y donde las técnicas de riego por aspersión convencional, los sistemas de riego con Enrolladores e incluso las máquinas de pivote Central con dispositivos de emisión de caudal convencionales, no ofrecen las mejores posibilidades.

También pueden ser válidas las máquinas de pivote central con la aplicación de baja energía de precisión LEPA (por sus siglas en inglés) y los sistemas de riego con Enrolladores acoplados con Alas Pivoanas, en los cuales la intensidad de aplicación es menor que en las variantes convencionales. Con relación a las técnicas de riego superficial tradicionales no son recomendables, debido a las dificultades que se presentan en el manejo de riego y que condicionan la baja eficiencia de riego.

De todas las técnicas de riego comúnmente utilizadas en el regadío cubanas, los sistemas de riego por goteo y microaspersión son los que favorecen mejor transferencia de humedad en el suelo, sobre todo en los llamados suelos difíciles (muy arenosos o muy arcillosos). Otro aspecto a considerar es el contenido de sales en la solución del suelo, en este sentido, la alta frecuencia que tiene lugar con los sistemas de riego localizado, propicie un manejo de sales en el suelo más favorable para lograr incrementos en los rendimientos de los cultivos.

En presencia de suelos estratificados o varios tipos de suelo en una misma explotación las técnicas de aspersión y localizado son más recomendadas, en el caso de suelos con relieve llano o relativamente ondulado que requiera cierta nivelación las técnicas de riego por aspersión y localizado son más convenientes.

Con relación a los cultivos, las técnicas de riego superficial pueden ser empleadas en la mayoría de los cultivos que se fomentan en la Empresa, a diferencia de las técnicas de riego por aspersión y localizado las cuales deben utilizarse preferiblemente en cultivos de alto valor comercial como es el caso de algunas hortalizas y vegetales y cultivos cítricos y frutales; esto es debido a que en estos es mayor el costo de la inversión inicial y por esta razón en muy pocos casos y por razones justificadas se emplean en cultivos de bajo valor comercial.

Se puede generalizar que el riego localizado con excepción del cultivo de arroz y los pastos, es adecuado para el riego de cultivos individuales, árboles frutales y en general cultivos sembrados en hilera como la caña de azúcar. También es necesario tener conocimientos acerca de la tolerancia de los cultivos a la inundación y su resistencia y sensibilidad a la salinidad, ya que estos aspectos inciden directamente en el rendimiento de los cultivos y por ende en la rentabilidad de las instalaciones.

Con relación al clima, en condiciones de velocidades del viento fuertes las técnicas de riego superficial son las preferidas, en determinados casos también se pueden utilizar algunas técnicas de riego localizado (goteo y exudación) y los conocidos sistemas con dispositivos de emisión de caudal con baja precisión (LEPA por sus siglas en inglés) acoplados a los sistemas de riego por aspersión (Pivote Central). En las áreas donde se aplican riegos suplementarios, las técnicas de riego por aspersión y localizado son más aplicables que las técnicas de riego superficial, debido a su mayor flexibilidad y adaptabilidad a las variaciones de las demandas de agua en las parcelas de riego.

RECOMENDACIONES PARA EL USO RACIONAL Y EFICIENTE DEL AGUA DE RIEGO EN LA EMPRESA

- Gestionar el incremento de la utilización de tecnologías de riego en las áreas que actualmente no disponen de sistemas de riego.
- Aplicar criterios de selección de técnicas de riego para las áreas en secano teniendo en cuanta las características del complejo ASP de cada unidad productiva.
- La garantía de un diseño agronómico e hidráulico racional de los sistemas de riego, que incluya las soluciones para el drenaje y recomendaciones para la explotación.
- Establecer estrategias para la evaluación de la eficiencia de riego de los sistemas de riego existentes, a partir de procedimientos actualizados y viables para cada unidad productiva.
- Intencionar la adquisición de instrumentos y herramientas de trabajo útiles para el manejo del agua de riego en las instalaciones, como pueden ser los evaporímetros de cubeta clase A y los procedimientos para pronosticar el momento oportuno para el riego.
- Promover el diseño de sistemas de drenaje superficial y establecer las soluciones de drenaje dando prioridad a aquellas parcelas y cultivos comprometidos con el abastecimiento a la población de productos del agro.
- Disposición de un Manual de buenas prácticas para brindar asesoría a los productores de las diferentes unidades productivas.

Estas recomendaciones constituyen una contribución al Proyecto de Investigación PS113LH001 032 Evaluación de la eficiencia en el uso del agua de riego en la Empresa Agropecuaria Laguna Blanca, correspondiente al Programa Sectorial del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos concebido para valorizar las fuentes de abasto destinadas al riego.

04 CONCLUSIONES

La Empresa Agropecuaria Laguna Blanca cuenta con un fondo agrícola de 8006 ha y solo 31% se encuentra bajo riego.

La infraestructura hidráulica para riego no está en óptimas condiciones, esto conlleva a que no se satisfacen las necesidades de agua de riego y la gestión del recurso no es la más apropiada.

La Empresa cuenta con una estación de bombeo principal con 6 electrobombas de ellas solo 4 en explotación por lo que está a un 66,6% de su capacidad máxima entregando un caudal de 1600 L/s.

No se explotan adecuadamente los sistemas de riego instalados debido a deficiencias en la infraestructura de riego, las mismas se identifican en canales sin revestir, deficiente control del funcionamiento técnico de los sistemas de riego y de bombeo, así como, de protección y mantenimiento de la tecnología de riego.

La mala categoría agroproductiva de los suelos afecta el desarrollo adecuado de los cultivos que allí se fomentan y limita su variedad unida a la ausencia de sistemas de drenaje parcelario afecta la sostenibilidad de las producciones agrícolas.

RECONOCIMIENTO

Nos complace reconocer el apoyo logístico ofrecido por el Proyecto de Investigación PS113LH001 032, "Evaluación de la eficiencia en el uso del agua de riego en la Empresa Agropecuaria Laguna Blanca", correspondiente al Programa Sectorial del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos concebido para valorizar las fuentes de abasto destinadas al riego, para el desarrollo de la investigación y las facilidades para la edición y socialización de los resultados.

05 REFERENCIAS

Díaz J. (2018). "El agua en Cuba: Un desafío a la sostenibilidad". Revista de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Volumen XXXIX, No. 2, p. 46-59. La Habana, Cuba. ISSN 1815–591X.

EALB. (2022). "Informe técnico de la Dirección de Riego". Empresa Agropecuaria Laguna Blanca. Santiago de Cuba, Cuba

ENPA. (2019). "Informe técnico del Departamento de Desarrollo". Empresa Nacional de Proyectos Agropecuarios. UEB Santiago de Cuba, Cuba

FAO. (2006). FAOSTAT Database Results. Food Agricultural Organization, Disponible en: hp://faostat.fao.org. [Consulta: agosto 2021].

Melgarejo J., y Fernández P. (2019). Congreso Nacional del Agua Orihuela. Innovación y Sostenibilidad. Universidad de Alicante. España. ISBN: 978-84-1302-034-1

Merayo, S. A. (2022). "Actualización del complejo Agua – Suelo – Planta – Clima y los parámetros de bombeo en la Empresa Agropecuaria Laguna Blanca". Universidad de Oriente, Tesis de Grado. Especialidad Ingeniería Hidráulica, Santiago de Cuba, Cuba.

Rodriguez D. (2023). Modelo de gestión integral del riego en sistemas con máquinas de pívot central eléctrico en el cultivo del frijol en suelos fersialítico pardo rojizo. Tesis doctoral, Centro de Estudios Hidrotécnicos, Universidad de Ciego de Ávila, Cuba

Santos L., de Juan J. A., Picornell M. R., y Tarjuelo, J. M. (2010). El Riego y sus Tecnologías (1ra ed.). Centro Regional de Estudios del Agua. Universidad de Castilla-La Mancha, Albacete, España. ISBN: 13: 978-84-692-9979-1

Soto M. (2013). Estudio de la evolución de los regadíos mediante técnicas de benchmarking. Aplicación en la Región de Murcia. Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Cartagena Departamento de Ingeniería de Alimentos y del Equipamiento Agrícola, España.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Pedro Cabrera Castro https://orcid.org/0000-0001-7619-3396

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

Pavel Vargas Rodríguez https://orcid.org/0000-0003-3316-0898

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

Rafael Miguel Pacheco Moya https://orcid.org/0000-0001-7053-3791

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

José Romero Morris https://orcid.org/0009-0005-8363-4694

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

Manifestaciones del pensamiento científico-técnico según los estilos de aprendizaje en estudiantes de Ingeniería Hidráulica

Milaydis Molina Rodríguez. E-MAIL: milaydismr@gmail.com
Universidad de Ciego de Ávila. Ciego de Ávila. Cuba.

Luis Eduardo Rodríguez Rodríguez E-MAIL: luiseduardorr745@gmail.com
Universidad de Ciego de Ávila. Ciego de Ávila. Cuba.

Raydi Teydi Rojas Angel Bello E-MAIL: raidyra1978@gmail.com
Universidad de Ciego de Ávila. Ciego de Ávila. Cuba.

José Manuel Gaio E-MAIL: josemanuelgaio1964@gmail.com
Escuela Superior Pedagógica de Bié. República de Angola

RESUMEN

El desarrollo del pensamiento científico-técnico constituye una exigencia de la formación de los profesionales universitarios de especialidades de las ciencias técnicas. El objetivo de este artículo es exponer las manifestaciones peculiares de las características del pensamiento científico-técnico que deben formarse en estudiantes de Ingeniería Hidráulica de acuerdo a los estilos de aprendizaje activo, reflexivo, teórico y pragmático. Se utilizaron los métodos de la sistematización de la teoría y la práctica, el inductivo-deductivo, el hipotético-deductivo, el test de estilo de aprendizaje de Honey-Alonso y técnicas experimentales basadas en la solución de problemas. La utilización de técnicas de correlación permitió establecer relaciones entre los estilos de aprendizaje y las características del pensamiento científico-técnico en la muestra de sujetos estudiada.

PALABRAS CLAVES: enseñanza de la física, formación de ingenieros hidráulicos, pensamiento científico-técnico, estilos de aprendizaje

Manifestations of the thought scientific-technician according to the learning styles in students of Hydraulic Engineering

ABSTRACT

The development of the thought scientific-technician constitutes a demand of the formation of the university professionals of specialties of the technical sciences. The objective of this article is to expose the peculiar manifestations of the characteristics of the thought scientific-technician that should be formed in students of Hydraulic Engineering according to the styles of active, reflexive, theoretical and pragmatic learning. The methods of the systematizing of the theory and the practice were used, the inductive-deductive one, the hypothetical-deductive one, the test of style of learning of Honey-Alonso and technical experimental based on the solution of problems. The use of technical of correlation allowed to establish relationships between the learning styles and of the characteristics of the thought scientific-technician in the studied sample of fellows.

KEYWORDS: teaching of the physics, hydraulic engineers' formation, thought scientific-technician, learning styles

CITMA CERTIFICADO

Junio 2024-RECIBIDO *APROBADO-Junio 2024*

Esta obra está bajo una licencia internacional creative commons attribution-noncommercial 4.0

SciELO

01 INTRODUCCIÓN

En la actualidad constituye un reto de la educación superior la formación de profesionales capaces de utilizar los recursos de la ciencia y la tecnología en su actuación profesional. Especial importancia se le concede a la utilización del método científico para resolver deferentes tipos de problemas de la profesión. Los estudiantes que estudian carreras universitarias de perfil técnico deben alcanzar un óptimo desarrollo del pensamiento científico-técnico como base para formular y resolver problemas vinculados a la especialidad.

Lo anterior apunta, a la importancia de las diferentes formas en que los estudiantes asimilan y comprenden el contenido teórico, para concretarlo en las acciones sociales, científicas y tecnológicas, de acuerdo al perfil del profesional de que se trate. Los estudiantes de la carrera de Ingeniería Hidráulica se preparan para enfrentar problemas profesionales relacionados con el planeamiento, diseño, construcción, gestión y rehabilitación de recursos hídricos a partir de sólidos conocimientos de la ciencia y la tecnología (Ministerio de Educación Superior, 2018).

Las disciplinas relacionadas con las ciencias básicas que se estudian en las carreras relacionadas con las ciencias técnicas en las universidades poseen amplias posibilidades para desarrollar el pensamiento científico-técnico de los estudiantes. Dentro de estas ciencias, la Física desempeña un papel crucial teniendo en cuenta las características de su objeto de estudio y la amplia utilización de los métodos inductivo-deductivo, los modelos, las analogías, las hipótesis y los procedimientos lógicos, tanto en la ciencia como en el proceso de enseñanza-aprendizaje. Sin embargo, la experiencia muestra que los estudiantes que comienzan el estudio de la carrera manifiestan dificultades en el estudio de la Física y, como consecuencia en el desarrollo del pensamiento físico y científico-técnico.

El sistema de conocimientos de la Física tiene carácter científico-técnico y es el resultado del conocimiento de la naturaleza como resultado del desarrollo del pensamiento físico y científico-técnico. En esta investigación se asume que el pensamiento científico es aquel que utiliza el método científico para formular y resolver problemas mediante acciones de análisis y síntesis, inducción-deducción, planteamiento de hipótesis, diseño de estrategias, comprobación de la solución y comunicación de los resultados y se expresa en las habilidades del pensamiento científico (Figueroa et al., 2020).

La experiencia de los autores como profesores de Física General en las carreras de ingeniería y un estudio diagnóstico realizado a estudiantes de la carrera de Ingeniería Hidráulica en la Universidad de Ciego de Ávila permitió constatar que se manifiestan limitaciones en el desarrollo del pensamiento científico-técnico por parte de los estudiantes. Se aprecia una tendencia a la utilización del ensayo y error para resolver las tareas docentes de la disciplina, no se utilizan con independencia los contenidos de la Física General para formular y resolver problemas de la ciencia y de la tecnología, se presentan dificultades en la utilización del método investigativo y de las operaciones lógicas a él asociadas.

Estudios anteriores sobre esta problemática, revelan que la atención a las características del aprendizaje de los estudiantes se realiza fundamentalmente mediante el apoyo heurístico de acuerdo con su nivel de desarrollo, la mayor parte del cual está dirigido a que los estudiantes profundicen en los procesos analítico-sintéticos, sin tener en cuenta un profundo diagnóstico de las particularidades del proceso de aprendizaje (Pérez et al., 2020).

Consecuentemente con las ideas anteriores el objetivo de este artículo es exponer las manifestaciones peculiares de las características del pensamiento científico-técnico que deben

formarse en estudiantes de Ingeniería Hidráulica de acuerdo a los estilos de aprendizaje activo, reflexivo, teórico y pragmático.

02 CARACTERÍSTICAS DEL PENSAMIENTO CIENTÍFICO-TÈCNICO DE LOS ESTUDIANTES DE INGENIERÍA HIDRÁULICA DE ACUERDO A LOS ESTILOS DE APRENDIZAJE

En la formación de los ingenieros hidráulicos debe lograrse la profesionalización desde las distintas disciplinas del currículo y la Física General desempeña un rol importante, favorece que el estudiante domine un óptimo lenguaje de la especialidad, de la ciencia y la tecnología y sus aplicaciones a los problemas profesionales. Con la profesionalización de la disciplina Física General para el ingeniero hidráulico se garantiza el crecimiento profesional, personal, laboral, económico y social (Alonso y Cruz, 2020).

En la concepción de la Física General en la carrera Ingeniería Hidráulica para lograr las tareas de la profesionalización de los futuros egresados es necesario tener en cuenta las características del pensamiento científico-técnico que deben desarrollarse en este tipo de profesionales y las potencialidades de las características individuales de los estudiantes (Herrero et al. 2023).

Los estilos de aprendizaje de los estudiantes se abordan por investigadores tales como (Alonso et al. 2012; Bermúdez y Rodríguez, 2018). Estos estudios permiten establecer que los estudiantes abordan el aprendizaje desde diferentes aproximaciones o estilos, los estilos de aprendizaje abarcan rasgos cognitivos, afectivos y fisiológico, las características de los estudiantes en cuanto a los estilos de aprendizaje se pueden diagnosticar utilizando los test de estilo de aprendizaje y los modelos de estilos de aprendizaje se basan en las teorías de la psicología cognitiva.

En esta investigación se asume que los estilos de aprendizaje son los rasgos cognitivos, afectivos y fisiológicos que sirven como indicadores relativamente estables, de cómo los estudiantes perciben, interaccionan y responden a sus ambientes de aprendizaje (Alonso y Gallego, 2004).

Existen diferentes modelos y clasificaciones de los estilos de aprendizaje, entre los que se encuentran los estilos visuales, auditivos y cinestésicos, de acuerdo a los rasgos analíticos vs globales y secuenciales vs simultáneos, de acuerdo a las preferencias individuales y ambientales de los estudiantes (Alonso et al. 2012), por la interacción social se pueden clasificar en convergentes, divergentes, asimiladores y acomodadores (Keefe, 1988).

En esta investigación se asume la clasificación de estilos de aprendizaje que ofrece Alonso et al. (2012) basado en el modelo de Kolb cuando señalan que, los estilos de aprendizaje en los estudiantes de la educación superior, de acuerdo a los rasgos individuales y ambientales, se pueden clasificar en activo, reflexivo, teórico y pragmático.

A partir de la sistematización de estudios realizados en investigaciones anteriores relacionadas con el desarrollo del pensamiento científico-técnico y el pensamiento físico (Rodríguez et al., 2021; García et al. 2023), se asume que el pensamiento científico-técnico es el proceso cognoscitivo del objeto físico y sus interconexiones expresado en los hechos científicos, los conceptos, las leyes, las hipótesis y las teorías físicas que permiten formular y resolver problemas de la ciencia y la técnica mediante los métodos experimentales, analítico-sintético y gráficos; así como los procedimientos algorítmicos, analógicos y de modelación.

Siguiendo esta línea de razonamiento y a partir del estudio realizado por Nova (2022) se delimitan las características del pensamiento científico-técnico que se deben desarrollar en los estudiantes de Ingeniería Hidráulica. Estas características se relacionan con el desarrollo del pensamiento lógico para

resolver problemas de la ciencia y la técnica, la modelación de situaciones del objeto físico y de la técnica, la aplicación de los conocimientos a situaciones de la ciencia, la tecnología, la sociedad y el medio ambiente, el empleo de representaciones simbólicas físico-matemáticas y el reconocimiento de las implicaciones científicas, axiológicas, estéticas y sociales de los problemas técnicos.

A partir de la sistematización teórica de las características de los estilos de aprendizaje activo, reflexivo, teórico y pragmático y las características del pensamiento científico-técnico en general, es posible deducir las características del pensamiento científico-técnico que prevalecen en los estudiantes que manifiestan distintos estilos de aprendizaje. Las características del pensamiento científico-técnico se relacionan con las diferentes formas de aprender de los estudiantes, por esta razón los estudiantes de estilos de aprendizaje diferentes manifiestan de forma diferenciada las características antes relacionadas.

Las características del pensamiento científico-técnico que prevalecen en estudiantes que manifiestan estilos de aprendizaje activo se concretan en que utilizan el ensayo y el error en la formulación y solución de problemas, determinan las relaciones esenciales que se establecen en la situación presentada con el sistema de conocimientos físicos buscando aproximaciones mediante la improvisación, utilizan las representaciones simbólicas físico matemáticas sin seguir un orden lógico y aplican los conocimientos a situaciones de la ciencia, la tecnología, la sociedad y el ambiente empleando las acciones del método científico espontáneamente.

Los estudiantes que manifiestan estilos de aprendizaje reflexivo se caracterizan por formular y resolver problemas de la ciencia y la técnica planificando con exactitud las acciones a desarrollar, determinan las relaciones esenciales que se establecen en la situación con el sistema de conocimientos físicos mediante un análisis profundo y multilateral. Los estudiantes que manifiestan este tipo de estilo de aprendizaje diseñan y rediseñan las estrategias de solución de los problemas siguiendo un orden lógico de las acciones y en la utilización de las representaciones simbólicas físico matemáticas; de igual modo, aplican los conocimientos a situaciones de la ciencia, la tecnología, la sociedad y el ambiente utilizando acciones del método científico siguiendo un orden de pasos preestablecidos.

Las características del pensamiento científico-técnico que prevalecen en estudiantes que manifiestan estilos de aprendizaje teórico se expresan en que formulan y resuelven problemas planificando con exactitud y de forma metódica las acciones a desarrollar, valoran críticamente aciertos y desaciertos y determinan las relaciones esenciales en la situación mediante un análisis profundo y multilateral. Estos estudiantes diseñan y rediseñan las estrategias de solución de los problemas siguiendo un orden lógico y bien estructurado de las acciones y pueden valorar las estrategias de solución más racionales, utilizan las representaciones simbólicas físico matemáticas siguiendo un orden lógico y aplican los conocimientos a situaciones de la ciencia, la tecnología, la sociedad y el ambiente utilizando el método científico de acuerdo a la situación presentada de forma objetiva.

Mientras que las características del pensamiento científico-técnico que prevalecen en estudiantes que manifiestan estilos de aprendizaje pragmático se reflejan en que formulan y resuelven problemas de la ciencia y la técnica ejecutando con eficacia y de forma directa acciones prácticas y la experimentación, determinan las relaciones esenciales que se establecen en la situación con el sistema de conocimientos físicos mediante el análisis fáctico, diseñan y rediseñan las estrategias de solución de los problemas prácticos y experimentales y buscan las estrategias de solución más directas y eficaces. Los estudiantes que manifiestan un estilo pragmático utilizan las representaciones simbólicas y las estructuras aritméticas, algebraicas, geométricas y del cálculo diferencial e integral

de acuerdo a las características de la situación presentada y utilizan el método científico de forma directa y eficaz.

03 DIAGNÓSTICO DE LOS ESTILOS DE APRENDIZAJE Y SUS RELACIONES CON EL PENSAMIENTO CIENTÍFICO-TÉCNICO

METODOLOGÍA GENERAL

En la investigación realizada, desde un enfoque mixto prevalecen métodos como la sistematización de la teoría y la práctica, el inductivo-deductivo y el hipotético-deductivo para delimitar desde la teoría las características del pensamiento científico-técnico en general y las que se manifiestan de acuerdo a los estilos de aprendizaje, según el modelo de Kolb activo, reflexivo, teórico y pragmático (Díaz, 2017). Se utiliza el test de estilo de aprendizaje de Honey-Alonso (Alonso et al. 2012) para determinar los estilos de aprendizaje que predominan en el grupo de estudiantes y de forma individual y una técnica experimental basada en la solución de problemas para determinar el nivel de desarrollo del pensamiento científico-técnico de los estudiantes. Las técnicas de correlación permitieron establecer las relaciones entre los estilos de aprendizaje y los rasgos del pensamiento científico-técnico y su comparación con los postulados teóricos asumidos.

Se trabajó con una muestra intencional de 26 estudiantes de segundo año de la carrera de Ingeniería Hidráulica de la Universidad de ciego de Ávila. Los estudiantes mostraron su consentimiento para resolver el test y dispusieron de un tiempo de una hora.

RESULTADOS OBTENIDOS EN EL DIAGNÓSTICO Y SU ANÁLISIS

Desde el punto de vista práctico se determinó en esta investigación los estilos de aprendizaje que manifiestan los estudiantes de segundo año de la carrera de Ingeniería Hidráulica. Para el estudio de los estilos de aprendizaje se utiliza el modelo de Kolb (Díaz, 2017) que los clasifica en estilo activo, reflexivo, teórico y pragmático por considerase que es el que más se adapta a estudiantes de la Educación Superior y expresa las características personales y ambientales de este tipo de estudiantes. Para conseguir este propósito se utiliza el test de estilo de aprendizaje de Honey-Alonso (tomado de Díaz, 2017).

El test de estilos de aprendizaje se aplicó a una muestra intencional de 26 estudiantes de la carrera de Ingeniería Hidráulica de la Universidad de Ciego de Ávila. Se le solicitó el consentimiento a cada estudiante para la aplicación del test de estilo de aprendizaje y el 100 % de la muestra mostró disposición para realizarlo y curiosidad por conocer el estilo que manifiestan.

Los resultados del instrumento muestran que 8 estudiantes para un 30,7 % de la muestra manifiestan un estilo de aprendizaje activo, 3 para un 11,5 % manifiestan un estilo de aprendizaje reflexivo, 10 para un 38,4 % manifiestan un estilo teórico y 5 para un 19,2 % manifiestan un estilo pragmático. En la muestra de 26 estudiantes predominan los estilos de aprendizaje teórico y activo.

Contrastando estos resultados con la caracterización psicopedagógica de cada estudiante y el diagnóstico que tienen de ellos los investigadores se pudo delimitar que los estudiantes que manifiestan un estilo de aprendizaje activo son espontáneos y arriesgados, muestran disposición para el trabajo en grupos y tienden con frecuencia al ensayo y error para resolver problemas. Mientras que los estudiantes que manifiestan un estilo de aprendizaje reflexivo se caracterizan por ser más receptivos, formulan muchas preguntas en las clases y analizan con profundidad los problemas y las tareas de aprendizaje, en ocasiones tardan más tiempo del necesario para resolver las actividades en las clases.

Siguiendo esta misma línea de razonamiento, los estudiantes que manifiestan un estilo de aprendizaje teórico, como los del estilo reflexivo, formulan muchas preguntas en clases, asimilan con mayor facilidad los conceptos, las leyes y su modelación físico-matemática, siguen un orden lógico en las acciones para resolver problemas y cuestionan con frecuencia los criterios del profesor y los compañeros. Sin embargo, los estudiantes que manifiestan un estilo pragmático se interesan sobre el sentido utilitario de determinados contenidos, muestran interés en las actividades experimentales y generalmente tienen éxito en la solución de ejercicios y problemas de aplicación del contenido a situaciones concretas.

Para el estudio de las características del pensamiento científico-técnico de los estudiantes, se define como variable a estudiar el nivel de desarrollo del pensamiento científico-técnico de los estudiantes. Esta variable se expresa operacionalmente como el nivel de desarrollo del pensamiento lógico para formular y resolver problemas de la ciencia y la técnica, la modelación de situaciones del objeto físico y de la técnica para formular y resolver problemas reales de la profesión, el desarrollo de habilidades para formular y resolver problemas teóricos, experimentales y de la ciencia y la técnica. También incluye la operacionalización de la variable definida, las acciones para diseñar y rediseñar estrategias, esquematizar y montar instalaciones experimentales y técnicas, utilizar equipos y aparatos, comprobar hipótesis, procesar información, comunicar los resultados, la aplicación de los conocimientos a situaciones de la ciencia, la tecnología, la sociedad y el medio ambiente y la resolución de problemas prácticos.

A partir de esta variable y su operacionalización se diseñó y aplicó una técnica experimental para determinar el nivel de desarrollo del pensamiento científico-técnico de los estudiantes seleccionados. Se toman como dimensiones para el estudio las características del pensamiento científico-técnico definidos en esta investigación (ver la leyenda de la tabla 1). El instrumento consta de cuatro items que consisten en resolver problemas de Física vinculados con los contenidos de la ingeniería hidráulica. En el primer ítem se les pide resolver un problema sencillo de una prensa hidráulica y se les solicita expresar sus aplicaciones técnicas. En el segundo y tercer ítem deben resolver problemas donde apliquen los contenidos de dinámica de los fluidos a redes hidráulicas y desagües en una presa, respectivamente. El cuarto item es un problema experimental para determinar la velocidad de salida del agua de una toma de agua. Este instrumento se aplicó a la muestra intencional previamente definida para el estudio de los estilos de aprendizaje.

Para procesar la información se elaboró una escala ordinal con los valores 3 (alto), 2 (medio) y 1 (bajo) para la calificación del instrumento a partir de los protocolos que se recogen a cada uno de los estudiantes derivados de la técnica experimental utilizada. Esta escala se validó con un coeficiente Alpha de Cronbach de 0,85.

Para el análisis cuantitativo de estos resultados se determinó el índice promedio ponderado de cada indicador (I) utilizando la ecuación 1 (Rodríguez y Rodríguez, 2018):

$$\mathrm{I} = \frac{a+b+(a+b)2+(a+b)3}{2N} \quad (1)$$

Las variables *a* y *b* determinan la cantidad de estudiantes en cada categoría (bajo, medio o alto) por cada característica del pensamiento científico-técnico. Se pondera por 1 la cantidad de estudiantes en la escala de bajo, por dos la cantidad de estudiantes en medio y por tres de la cantidad de estudiantes con categoría de alto. *N* es el total de estudiantes.

Para otorgar una categoría a cada indicador, de acuerdo al criterio establecido se tuvo en cuenta una escala convencional a partir del análisis del índice ponderado para cada indicador, cuando el

índice ponderado está en el rango de 1 a 1,59 en nivel de desarrollo del pensamiento científico-técnico se evalúa de bajo (B), cuando está en el rango de 1,6 a 2,09, se evalúa de medio (M) y de 2,1 a 3 de alto (A).

La determinación del índice ponderado de cada indicador y para los estudiantes que manifiestan los estilos de aprendizaje activo, reflexivo, teórico y pragmático se refleja en la tabla 1. A partir de estos resultados es posible determinar las relaciones que existen entre las características de pensamiento científico-técnico que manifiestan los estudiantes y los diferentes estilos de aprendizaje.

Tabla 1. Índice promedio de cada indicador por cada uno de los estilos de aprendizaje estudiados.

Indicador	Estilo activo I	Estilo reflexivo I	Estilo teórico I	Estilo pragmático I
(1)	1,25	1,66	1,70	1,80
(2)	1,25	2,00	1,70	1,80
(3)	1,25	1,66	1,50	1,40
(4)	1,25	1,66	1,40	1,40
(5)	1,37	1,66	1,80	1,80
(6)	1,37	2,00	1,50	2,00

Leyenda de la tabla 1: (1) Desarrollo del pensamiento lógico para formular y resolver problemas de la ciencia y la técnica, (2) Modelación de situaciones del objeto físico y de la técnica para formular y resolver problemas reales de la profesión, (3)Desarrollo de habilidades para formular y resolver problemas teóricos, experimentales y de la ciencia y la técnica, (4) Aplicación de los conocimientos a situaciones de la ciencia, la tecnología, la sociedad y el medio ambiente, (5) Utilizar representaciones simbólicas y las estructuras físico-matemáticas para formular y resolver el problema, (6) Resolución de problemas prácticos a partir de reconocer sus implicaciones científicas, axiológicas, estéticas, económicas y sociales y aspectos utilitarios de las posibles soluciones.

De acuerdo a los resultados que se reflejan en la tabla 1, se aprecia que los estudiantes que manifiestan un estilo de aprendizaje activo alcanzan una categoría de bajo (B) en todos los indicadores estudiados (rango de 1-1,59), mientras que los estudiantes que manifiestan un estilo de aprendizaje reflexivo alcanzan la categoría de medio (M) en todos los indicadores estudiados (rango de 1,6-2,09). Los estudiantes que manifiestan un estilo de aprendizaje reflexivo obtienen resultados superiores en la modelación de situaciones del objeto físico y de la técnica para formular y resolver problemas reales de la profesión y en la resolución de problemas prácticos a partir de reconocer sus implicaciones científicas, axiológicas, estéticas, económicas y sociales y aspectos utilitarios de las posibles soluciones.

Los resultados cuantitativos que se reflejan en la tabla 1 también permiten inferir que los estudiantes que manifiestan un estilo de aprendizaje teórico alcanzan un índice de medio (M) en tres de los indicadores estudiados (rango de 1,6-2,09) y bajo (B) en el resto (rango de 1-1,59).

Estos estudiantes alcanzan los mejores resultados en los indicadores vinculados con el desarrollo del pensamiento lógico para formular y resolver problemas de la ciencia y la técnica y en la modelación de situaciones del objeto físico y de la técnica para formular y resolver problemas reales de la profesión. Mientras que los estudiantes que manifiestan un estilo de aprendizaje pragmático alcanzan un nivel medio (M) en cuatro de los indicadores estudiados y bajo (B) en los restantes. Estos últimos muestran las mayores dificultades en el desarrollo de habilidades para formular y resolver problemas teóricos, experimentales y de la ciencia y la técnica y en la aplicación de los conocimientos a situaciones de la ciencia, la tecnología, la sociedad y el medio ambiente.

El análisis cualitativo de los resultados de la aplicación de la técnica experimental y su correlación con las características del pensamiento científico-técnico obtenidas teóricamente en esta investigación, permite concluir que existen relaciones entre las características del pensamiento científico-técnico y los estilos de aprendizaje que predominan en la muestra de estudiantes con los que se trabajó.

Las principales limitaciones observadas en el desarrollo del pensamiento científico-técnico en los estudiantes que manifiestan un estilo de aprendizaje activo se concretan en que utilizan, como tendencia, el ensayo y error para formular y resolver los problemas, establecen relaciones no esenciales que conducen a soluciones incorrectas, tienden a buscar aproximaciones mediante la improvisación y presentan insuficiencias en el uso del método investigativo.

Por otra parte, los estudiantes en que predomina el estilo de aprendizaje reflexivo omiten algunos elementos esenciales en la modelación de la situación del objeto físico, llagando a formular el problema con ayuda, diseñan las estrategias de solución utilizando los algoritmos estudiados, sin necesidad de auxiliarse del profesor, los compañeros o la bibliografía, no siempre asumen las estrategias de solución más originales o ingeniosas y tienen más éxitos en la solución de problemas cuando el algoritmo es conocido.

Las principales limitaciones en el desarrollo del pensamiento científico-técnico que manifiestan los estudiantes en que predomina un estilo de aprendizaje teórico se centran en la utilización de las representaciones simbólicas y la modelación físico matemática para resolver problemas de la ciencia y la técnica. Mientras que los estudiantes que manifiestan un estilo de aprendizaje pragmático muestran un limitado desarrollo de habilidades para formular y resolver problemas teóricos y para aplicar los conceptos y leyes estudiadas a situaciones de la profesión.

El análisis cualitativo y cualitativo de estos resultados y su contrastación con las características del pensamiento científico-técnico permite arribar a las siguientes regularidades en cuanto a la correlación entre dichas características y su manifestación de acuerdo a los estilos de aprendizaje que predominan en los estudiantes que conforman la muestra:

Características del pensamiento científico-técnico que predominan en los estudiantes que manifiestan un estilo de aprendizaje activo:

- Utilizan el ensayo y error para resolver los problemas y no arriban a una formulación y solución acertada.
- No pueden determinan las relaciones esenciales que se establecen en la situación presentada con el sistema de conocimientos físicos estudiado buscando aproximaciones mediante la improvisación,
- Diseñan y rediseñan las estrategias de solución de los problemas mediante el ensayo y error,
- Presentan insuficiencias en la utilización del método investigativo para resolver problemas de la ciencia, la tecnología, la sociedad y el ambiente.

Características del pensamiento científico-técnico que predominan en los estudiantes que manifiestan un estilo de aprendizaje reflexivo:

- Utiliza de forma correcta el método analítico-sintético, el inductivo-deductivo, los modelos-analogías y el hipotético-deductivo en las fases de análisis de la solución y de solución de los problemas, si establece una estrategia correcta para resolver el problema, pero no es capaz de fundamentar y comunicar adecuadamente la estrategia utilizada.
- Omite algunos elementos esenciales en la modelación de la situación del objeto físico, pero formula el problema con ayuda.

- Diseña las estrategias de solución utilizando los algoritmos estudiados, sin necesidad de auxiliarse del profesor, los compañeros o la bibliografía.
- Analiza las estrategias de solución aplicadas individualmente o por sus compañeros críticamente, destaca ventajas y desventajas, aunque no siempre asume las más originales o ingeniosas.
- Procede a la solución del problema siguiendo un orden lógico de los procedimientos físico-matemáticos cuando los algoritmos son conocidos.
- Planifica adecuadamente las acciones de solución del problema, pero no considera adecuadamente todas las condiciones.

Características del pensamiento científico-técnico que predominan en los estudiantes que manifiestan un estilo de aprendizaje teórico:

- Formulan y resuelven problemas de la ciencia y la técnica planificando con exactitud y de forma metódica las acciones a desarrollar y valoran críticamente aciertos y desaciertos con ayuda del profesor,
- Determinan algunas de las relaciones esenciales que se establecen en la situación presentada con el sistema de conocimientos físicos estudiado cuando el algoritmo es conocido,
- Diseñan y rediseñan las estrategias de solución de los problemas siguiendo un orden lógico con ayuda del profesor o cuando la estrategia es conocida,

Características del pensamiento científico-técnico que predominan en los estudiantes que manifiestan un estilo de aprendizaje pragmático:

- Muestran adecuado desarrollo del pensamiento lógico para formular y resolver problemas de la ciencia y la técnica,
- Modelan con ayuda situaciones del objeto físico y de la técnica para formular y resolver problemas reales de la profesión,
- Es limitado el desarrollo de habilidades para formular y resolver problemas teóricos, experimentales y de la ciencia y la técnica (análisis y síntesis, inducción-deducción, establecer hipótesis, diseñar y rediseñar estrategias, esquematizar y montar instalaciones experimentales y técnicas, utilizar equipos y aparatos, comprobar hipótesis, procesar información, comunicar los resultados,
- Utilizar adecuadamente las representaciones simbólicas y las estructuras aritméticas, algebraicas, geométricas y del cálculo diferencial e integral de forma lógica en la modelación matemática de los conceptos y las leyes físicas a utilizar para formular y resolver el problema,
- Resuelven problemas prácticos a partir de reconocer sus implicaciones científicas, axiológicas, estéticas, económicas y sociales y aspectos utilitarios de las posibles soluciones.

Haciendo un análisis integral de la muestra de 26 estudiantes se pudo constatar que se presentan las siguientes regularidades en relación al desarrollo del pensamiento científico-técnico:

- Los estudiantes utilizan de forma adecuada los algoritmos aprendidos para resolver problemas, plantean las ecuaciones y las resuelven a partir del trabajo algebraico siguiendo un orden lógico.
- Se aprecian limitaciones en abstraer lo conocido y lo desconocido como parte del proceso de comprensión del problema y en la determinación de relaciones esenciales que permitan planificar y diseñar una estrategia de solución acertada.
- Los estudiantes que forman parte de la muestra no son capaces de rectificar las estrategias de solución inadecuadas, de encontrar más de una estrategia para abordar situaciones similares y

de analizar con profundidad el sistema de conocimientos a utilizar según corresponde a las condiciones del problema.
- Se observan limitaciones en analizar la situación de forma multilateral, en determinar todas las condiciones de la misma para arribar a una respuesta correcta.
- Existe una tendencia a la ejecución de algoritmos aprendidos y a seguir el sentido común, sin hacer las necesarias generalizaciones teóricas implícitas en el sistema de conocimientos a utilizar.

El estudio realizado permitió establecer tendencias en cuanto a las características del pensamiento científico-técnico de acuerdo a los estilos de aprendizaje que prevalecen en los estudiantes de Ingeniería Hidráulica. Este resultado puede constituir un antecedente en la concepción de los sistemas de problemas que se utilizan en la disciplina Física General para contribuir al desarrollo del pensamiento científico-técnico de los estudiantes desde un enfoque científico-tecnológico que permita vincular las potencialidades lógicas y gnoseológicas de las teorías físicas con los sistemas hidráulicos (Díaz y Ortega, 2022).

04 EJEMPIFICACIÓN DE PROBLEMAS UTILIZADOS Y RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN

La situación del objeto físico que se utiliza para la formulación y solución de problemas en la carrera de Ingeniería Hidráulica se vincula con elementos del planeamiento hidráulico, las soluciones técnicas a problemas hidráulicos, la conducción del agua, los métodos y técnicas de riego y el drenaje agrícola.

Para la implementación en la práctica se diseñó un sistema de problemas que responde a los componentes de la formación del ingeniero hidráulico y se sustentan en las características y los niveles de desarrollo del pensamiento científico técnico de los estudiantes de Ingeniería Hidráulica. A continuación, se relacionan algunos ejemplos de problemas utilizados en la asignatura Física I en la carrera de Ingeniería Hidráulica en la Universidad de Ciego de Ávila.

Problema 1: La estación de bombeo urbana mantiene en la tubería de alimentación de agua, a un nivel del primer piso, una presión de 5 atm. Determine (despreciando la presión al fluir el líquido) la velocidad del chorro de agua que sale de las tomas de agua en los pisos primero, segundo y tercero, si las tomas de cada uno de los pisos siguientes distan 4 m por la vertical. ¿A qué piso el agua ya no ascenderá por la tubería de alimentación?

Solución: Primer piso 28 m/s, segundo piso 27,3 m/s, tercer piso 26,5 m/s. No ascenderá al 12 piso.

Problema 2: ¿En cuántas veces aumentará el desagüe a través de una presa ancha, si el nivel del agua sobre el borde de la presa crece al doble?

Solución: Las dimensiones de la sección longitudinal del chorro aumentarán el doble. Las velocidades de las secciones semejantes en el chorro aumentarán $\sqrt{2}$ veces. Por eso el desagüe aumentará 2 $\sqrt{2}$veces.

Problema 3: ¿Cómo puede determinar la velocidad de salida del agua de una toma de agua si dispone de una lata cilíndrica, un cronometro y un compás grande?

Solución: Con la ayuda del compás se mide la altura h y diámetro d1 del recipiente y se calcula el volumen (ecuación 2).

$$V = \frac{\pi d_1^2}{4} \mathrm{h} \quad (2)$$

Después con el cronómetro se determina el tiempo en que se llena la lata. Entonces la cantidad de agua (*Q*) que sale en la unidad de tiempo se determina por la ecuación 3.

$$\boldsymbol{Q} = \frac{\boldsymbol{V}}{\boldsymbol{t}} = \frac{\pi d_1^2}{4}\frac{h}{t} \quad (3)$$

Por otra parte, *Q* se puede expresar como producto de la velocidad buscada *v* de la salida del agua por el área *S* de la sección transversal de la toma de agua (ecuación 4).

$$Q = S\,v = \frac{\pi d_2^2}{4}\mathrm{v} \quad (4)$$

Igualando los segundos miembros se obtiene la magnitud buscada de acuerdo a la ecuación 5.

$$\mathrm{v} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 \frac{h}{t} \quad (5)$$

d_2 se mide con el compás y es el área de la sección transversal del tubo de la toma de agua.

Problema 4: Para hacer funcionar el elevador de automóviles de una estación de servicio, se utiliza una presión aplicada de 6kp, el cual permite elevar un vehículo, si el diámetro del pistón mayor mide 20 cm y el área del menor pistón es 1 cm^2(figura 1). Determinar:

a) De acuerdo al enunciado, realizar el gráfico respectivo de la aplicación de la prensa hidráulica.
b) Calcular el peso a levantar en Newton (N).

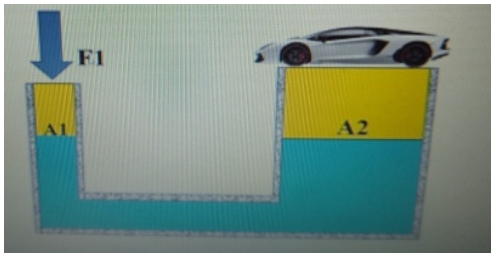

Figura 1: Representación de la prensa hidráulica.

Problema 5: Entre los extremos de un tubo de 0,006 m de diámetro y 1 m de longitud, se aplica una diferencia de presión relativa de 50.000 Pa. Si el caudal que fluye es de *Q* = 3,5 x10-6 m3/s, halle la viscosidad del fluido circulante, considere régimen laminar.

Problema 6: Las mangueras que se usan en los grandes incendios estructurales tienen un diámetro interior de 6,40 cm (figura 2). Supongamos que dicha manguera transporta un flujo de 40,0 L/s, a partir de una presión manométrica de 1,62×106N/m^2. La manguera sube 10,0 m por una escalera hasta una boquilla con un diámetro interior de 3,00 cm. ¿Cuál es la presión en la boquilla?

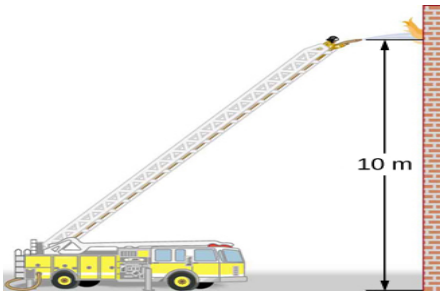

Figura 2. Representación de las mangueras que se utilizan en los grandes incendios.

Solución: La presión en la boquilla de esta manguera contra incendios es menor que en el suelo por dos motivos: el agua tiene que ir cuesta arriba para llegar a la boquilla y la velocidad aumenta en la boquilla. A pesar de su baja presión, el agua puede ejercer una gran fuerza sobre cualquier cosa que golpee en virtud de su energía cinética. La presión de la corriente de agua se iguala a la presión atmosférica una vez que sale al aire.

Problema 7: ¿Qué fuerza debe soportar una presa?

Consideremos la presión y la fuerza que actúan sobre la presa que retiene un embalse de agua (figura3). Supongamos que la presa tiene 500 m de ancho y el agua tiene 80,0 m de profundidad en la presa, como se ilustra a continuación.

(a) ¿Cuál es la presión media sobre la presa debido al agua?
(b) Determine la fuerza ejercida contra la presa.

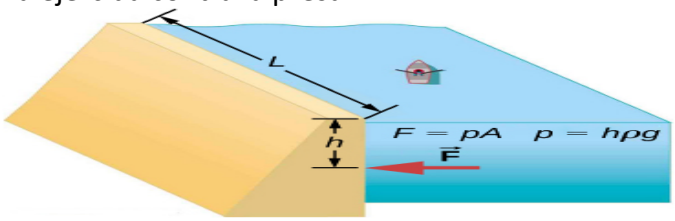

Figura 3. Representación de una presa.

c) Mostrar a partir de un análisis de fuerzas cómo determinar la diferencia de presiones entre dos puntos del fluido (figura 4).

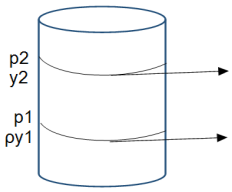

Figura 4. Diferencia de presión entre los diferentes puntos del fluido.

Problema 8: Un tanque cilíndrico de 1,80 m de diámetro descansa sobre una plataforma de una torre a 6 m de altura (figura 5). Inicialmente, el tanque está lleno de agua, hasta la profundidad h_0 = 3 m. De un orificio que está al lado del tanque y en la parte baja del mismo, se quita un tapón que cierra el área del orificio, de 6 cm^2. ¿Con qué velocidad fluye inicialmente el agua del orificio? ¿Cuánto tiempo necesita el tanque para vaciarse por completo?

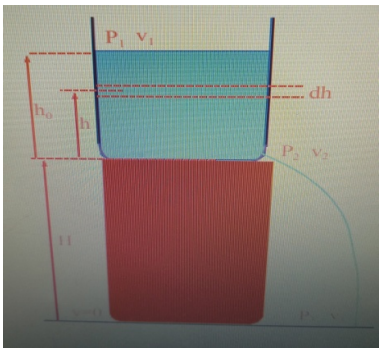

Figura 5. Representación del tanque cilíndrico sobre una plataforma.

Para la evaluación del desarrollo del pensamiento científico-técnico después de la intervención se utilizaron los mismos indicadores que en la etapa de diagnóstico. En la tabla 2 se reflejan los resultados del índice promedio ponderado para la muestra de 26 estudiantes.

Tabla 2. Índice promedio ponderado después de la intervención.

Característica del pensamiento estudiado	I_c
(1)	2.28
(2)	2.28
(3)	2.07
(4)	2.11
(5)	2.11
(6)	2.17

El análisis de este resultado muestra que un indicador alcanza la categoría de medio y cinco indicadores alcanzan la categoría de alto. En general los estudiantes de la muestran manifiestan resultados superiores en los indicadores vinculados con el desarrollo de habilidades para formular y resolver problemas teóricos, experimentales y de la ciencia y la técnica, aplicación de los conocimientos a situaciones de la ciencia, la tecnología, la sociedad y el medio ambiente, utilización de representaciones simbólicas y estructuras aritméticas, algebraicas, geométricas y del cálculo diferencial e integral de forma lógica en la modelación matemática de los conceptos y las leyes físicas a utilizar para formular y resolver el problema vinculados con la ingeniería hidráulica. También se obtuvo resultados superiores en la resolución de problemas prácticos a partir de reconocer sus implicaciones científicas, axiológicas, estéticas, económicas y sociales y aspectos utilitarios de las posibles soluciones vinculados con el perfil del ingeniero.

05 CONCLUSIONES

La investigación realizada permitió revelar que las características del pensamiento científico-técnico que se manifiestan en los estudiantes de la carrera de Ingeniería Hidráulica están relacionados con el desarrollo del pensamiento lógico para formular y resolver problemas de la ciencia y la técnica, la modelación de situaciones del objeto físico y de la técnica, el desarrollo de habilidades para formular y resolver diferentes tipos de problemas, la utilización representaciones físico matemáticas y la resolución de problemas prácticos. La manifestación de estas características del pensamiento científico-técnico tiene particularidades específicas a partir de los estilos de aprendizaje que manifiestan los estudiantes.

El estudio de los estilos de aprendizaje mediante el modelo de Kolb que los clasifica en estilo activo, reflexivo, teórico y pragmático se adapta a estudiantes de la Educación Superior y expresa las características personales y ambientales de los mismos. La aplicación del test de estilos de

aprendizaje basado en este modelo permitió constatar que en los estudiantes de la muestra predominan los estilos de aprendizaje teórico y activo.

Los resultados de la aplicación y procesamiento de la técnica experimental utilizada para el estudio de los niveles de desarrollo del pensamiento científico-técnico de los estudiantes y su relación con los estilos de aprendizaje, permitió constatar que, como tendencia, existen relaciones entre estas dos variables y que persisten limitaciones en algunas de las características del pensamiento científico-técnico objeto de estudio en esta investigación.

06 REFERENCIAS

Alonso C., Gallego D. y Honey P. (2012). "Los Estilos de Aprendizaje. Procedimientos de diagnóstico y mejoras", Ediciones Mensajero, ISBN 978-84-271-1914-7, España.

Alonso C. y Gallego D. (2004). "Los estilos de aprendizaje: Una propuesta pedagógica", I Congreso Internacional de Estilos de Aprendizaje. Madrid, España extraído de https://repository.udca.edu.co/handle/11158/358

Alonso C. y Cruz M. (2020). "Dimensiones del proceso de enseñanza-aprendizaje para la formación profesional", Revista Luz, vol.19, no.2, pp. 40-54, ISSN1814-151X, Holguín, Cuba.

Bermúdez R. y Rodríguez M. (2018). "Psicología del pensamiento científico", Colección Ciencias de la Educación. Editorial Universo Sur. **ISBN:** 978-959-257-523-3, Ecuador.

Díaz A. (2017). "Estilos de aprendizaje y métodos pedagógicos en la Educación Superior", Tesis de Doctorado. Escuela Internacional de Doctorado. UNED.

Díaz A. Y Ortega J. (2022). "La resolución de problemas de física y el pensamiento matemático en la formación de ingenieros", Revista Referencia Pedagógica, V.10, NO. 3, PP 31-46, ISSN2308-3042, La Habana, Cuba

Figueroa I., Pezoa E., Godoyc M. y Díaz T. (2020). "Habilidades de Pensamiento Científico: Una propuesta de abordaje interdisciplinar de base sociocrítica para la formación inicial docente", Revista de Estudios y Experiencias en Educación, V.19, no.41, pp. 257 – 273, ISSN 0718-5162, Santiago, Chile.

García A., Pla R. y Ulloa E. (2023). "Una aproximación diagnóstica al desarrollo del pensamiento científico en los profesionales de la educación", Revista Mendive, vol.21, no.1, pp.1-12, ISSN 1815-7696, Pinar del Río, Cuba

Herrero, A., García, J. y Pérez, A. (2023). "Situación de aprendizaje en Educación Física y Física y Química: el enfoque interdisciplinar en la LOMLOE", Revista Retos, vol.47, no.95150, pp.146-155, ISSN 1579-1726, España.

Keefe J. (1988). "Using the NASSP Learning Style Profile. En: J. Keefe. Profiling and utilizing learning styles", Editorial National Association of Secondary School Principals, ISBN 0882102079, United States America: National Association of Secondary School Principals.

Ministerio de Educación Superior. (2018). Modelo del Profesional. Plan de Estudio E. Ingeniería Hidráulica. República de Cuba.

Nova M. (2022). "La enseñanza de la filosofía y desarrollo del pensamiento crítico en la secundaria". Tesis de Grado. Universidad Santo Tomás de Aquino Sede Bogotá. Colombia.

Pérez N., Ramos J., Sifredo C. y Gil E. (2020). "Didáctica de la Física I", Editorial Félix Varela, ISBN 978-959-07-2269-1, La Habana, Cuba.

Rodríguez L. E., Pérez Y. y Pérez N. (2021). "La habilidad para formular problemas en la enseñanza y el aprendizaje de la solución de problemas de Física y de Matemática". Revista Luz, vol.20, no.1, pp. 40-54, ISSN1814-151X, Holguín, Cuba.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Milaydis Molina Rodríguez https://orcid.org/0000-0001-9427-9185

Participó en el diseño de la investigación, el análisis de los resultados. Realizó contribuciones en la interpretación de los datos, las referencias bibliográficas y en la redacción del texto.

Luis Eduardo Rodríguez Rodríguez http://orcid.org/0000-0001-9581-9542

Participó en el diseño de la investigación. Realizó contribuciones en la interpretación de los dato, en la revisión y redacción final.

Raydi Teydi Rojas Angel Bello https://orcid.org/0000-0003-1668-2459

Participó en el diseño de la investigación, el análisis de los resultados, la interpretación de los datos y la búsqueda de información.

José Manuel Gaio http://orcid.org/0000-0003-2913-4291

Realizó contribuciones en la interpretación de los datos, el análisis de los resultados y la revisión final.

Metodología para la evaluación técnica de proyectos de agua y saneamiento en Cuba.

DANIELA CÓRDOVA DE HORTA E-MAIL: danielitach096@gmail.com

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

RESUMEN

El abasto de agua en Cuba se ve afectado por limitaciones económicas y financieras, además de los efectos del cambio climático, que han incrementado la sequía, afectando los servicios básicos a la población. Los sistemas de saneamiento resultan ineficientes debido a su insuficiencia. Para enfrentar estos desafíos, el gobierno cubano, con apoyo del Fondo de Cooperación para Agua y Saneamiento (FCAS), implementó el proyecto “Mejora y Ampliación de los Sistemas de Agua Potable y Saneamiento de Pequeñas Ciudades Cubanas” (2010), que incluyó la construcción y rehabilitación de plantas potabilizadoras, redes, metrocontadores y plantas de tratamiento. Se diseñó una metodología para evaluar los impactos sociales y técnicos del proyecto, permitiendo corregir deficiencias y lograr los objetivos planteados.

PALABRAS CLAVES: abasto de agua, evaluaciones, metodología, proyectos, saneamiento

Methodology for the Technical Evaluation of Water and Sanitation Projects in Cuba.

ABSTRACT

Water supply in Cuba is affected by economic and financial limitations, along with the effects of climate change, which have increased droughts and impacted basic services for the population. Sanitation systems are also inefficient due to their insufficiency. To address these challenges, the Cuban government, with the support of the Water and Sanitation Cooperation Fund (FCAS), implemented the project "Improvement and Expansion of Water Supply and Sanitation Systems in Small Cuban Cities" (2010), which included the construction and rehabilitation of water treatment plants, networks, water meters, and treatment facilities. A methodology was designed to evaluate the social and technical impacts of the project, allowing for the correction of deficiencies and achieving the proposed goals.

KEYWORDS: water supply, evaluations, methodology, projects, sanitation

CITMA CERTIFICADO

Junio 2024-RECIBIDO *APROBADO-Junio 2024*

Esta obra está bajo una licencia internacional creative commons attribution-noncommercial 4.0

SciELO

01 INTRODUCCIÓN

Con el fin de garantizar el acceso universal al agua potable segura y asequible para todos, es necesario realizar inversiones adecuadas en infraestructura, proporcionar instalaciones sanitarias y fomentar prácticas de higiene en todos los niveles. (Alicia Bácena and Prado 2016)

El abastecimiento de agua potable y saneamiento en pequeñas ciudades cubanas, presenta una problemática significativa debido a su situación intermediaria entre las áreas rurales y las grandes aglomeraciones urbanas, ciudades entre 20 000 y 100 000 habitantes. (Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos and Colaboración 2013)

Una de las prioridades del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), en Cuba, es la gestión de riesgos asociados a la calidad del agua. En la actualidad, se estima que más del 50 % del recurso se pierde por conducción, distribución o en los puntos de consumo. No obstante, la problemática del agua tiene múltiples causales, así como diversas aristas. (Sánchez 2014)

Aunque el 73,5 % de la población cubana tiene acceso a agua potable a través de la red de acueducto, aún un número importante de personas la reciben por otras vías, lo cual no siempre garantiza la calidad de la misma. Estas problemáticas y la voluntad del país de asegurar este vital servicio, han determinado que se emprendan programas que, a corto, mediano y largo plazo, contribuyan a ir solucionando las dificultades. (Sánchez 2014)

En 2010 se concibió el Programa ‘‘Mejora y Ampliación de los Sistemas de Agua Potable y Saneamiento de Pequeñas Ciudades Cubanas’’, colaboración conjunta entre España y Cuba. El Programa fue concebido partiendo de la precaria situación existente con el abastecimiento de agua identificada por el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH) y en relación con sus planes de desarrollo. Es por ello que los objetivos, resultados y productos de este proyecto se orientaron a recuperar los sistemas de agua potable y saneamiento dañados por el paso de los huracanes Ike y Gustav por el país. Dentro de sus alcances comprendía la mejora del suministro de agua potable a zonas periurbanas y disminuir los valores de agua no contabilizada en las redes de abastecimiento.

Las áreas de intervención del proyecto fueron: Nueva Gerona en la Isla de la Juventud, La Palma en Pinar del Río, Jatibonico en Sancti Spíritus, Cueto y Báguano en Holguín, la zona sur de Guantánamo y Guisa en Granma, territorios muy distantes entre sí y dispersos en la geografía nacional.

Tomando en el presente trabajo como casos de estudio: La Palma en Pinar del Río, Jatibonico en Sancti Spíritus y Cueto en Holguín. El aporte recibido por el Fondo de Cooperación para Agua y Saneamiento fue de 3 788 903, 92 EUR y el aporte local fue de 9 308 605,80 CUP.

02 MATERIALES Y MÉTODOS

En esta sección se describen los casos de estudio y se hace referencia a la metodología aplicada para realizar la evaluación técnica de los proyectos de la Agencia Española de Colaboración en Cuba (AECID), el procedimiento se conformó a partir de un estudio de metodologías ya existentes. Debido a las deficiencias encontradas con respecto a los temas de evaluación técnica se hizo necesario la elaboración de una metodología donde se incluyeran estos términos, presentando mayor adaptación a las condiciones actuales del país.

CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE LOS PROYECTOS

Las ciudades en las que actúa este proyecto son las más afectadas por el paso de los Huracanes Ike y Gustav y que además cumplen los siguientes criterios. (Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos and Colaboración 2013):

- Ubicación de la ciudad en un sector catalogado como vulnerable al saneamiento.
- La vulnerabilidad de su población residente a problemas sociales, de baja cobertura de agua y de enfermedades vinculadas a la mala calidad del agua suministrada.
- Dificultades con la implementación de programas de desarrollo económico en la zona.
- La existencia de una Estrategia de Desarrollo en la zona avalada por los Planes de Ordenamiento Territorial, elaborado por el Instituto de Planificación Física.
- La inclusión de los Proyectos en el Plan de Inversiones del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos avalado por el Ministerio de Economía y Planificación del país.
- Voluntad política de las máximas autoridades de los gobiernos en los municipios y las provincias por resolver la difícil situación existente con el abastecimiento de agua.

CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS CASOS DE ESTUDIO

Los casos de estudio de este trabajo se encuentran ubicadas a lo largo de todo el territorio nacional como se muestra en la figura 1, en provincias tales como: Pinar del Río, Sancti Spíritus y Holguín. A continuación, se hace una descripción general de estos lugares en la primera fase del proyecto.

Figura 1. Ubicación geográfica de las ciudades del Proyecto “Mejora y Ampliación de Sistemas de Agua Potable y Saneamiento de Pequeñas Ciudades Cubanas”

LA PALMA, PINAR DEL RÍO

La ciudad cabecera del municipio de La Palma, se ubica en la zona norte central de la provincia de Pinar del Rio. Cuenta con 9 000 habitantes, los cuales desarrollan su vida laboral a partir de las actividades agropecuarias y forestales.

Como fuente de abasto se cuenta en el municipio con el embalse nombrado Mártires de la Palma a unos 11, 2 km de distancia de la ciudad. El mismo tiene una capacidad de 12,4 millones de m^3 de agua por lo que alberga sin dificultades los caudales solicitados para la cobertura prevista. Es además la única alternativa local con posibilidades de abastecer la demanda. También son asistidas además de la cabecera municipal dos comunidades existentes en la ruta de la conductora: Batey del Antiguo Central Azucarero con 5 200 habitantes y La Ceja con 800 habitantes.

En la actualidad el sistema de abasto da cobertura a más de 15 000 personas, solo que el deterioro y la falta del adecuado mantenimiento ha hecho que sea necesario dar agua por zonas y en días alternos, creando ciclos que aumentan o disminuyen en dependencia de la gravedad de las roturas y las posibilidades de ser resueltas en mayor o menor tiempo con las acciones del proyecto.

Para la estabilización de los niveles de calidad del agua, se rehabilitó la planta potabilizadora de una capacidad de 100 L/s. La planta flocula, sedimenta, filtra y desinfecta el líquido antes de que este llegue a la población, además se mantiene vigilancia en cuanto a los posibles vertimientos de productos y residuos tóxicos. (Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos and Colaboración 2013)

JATIBONICO, SANCTI SPÍRITUS

La situación en la capital municipal donde se desarrolla el proyecto, es muy difícil, puesto que solamente 6 000 habitantes reciben el agua clorada sin filtrar, proveniente de la presa Lebrije mediante un sistema que está en muy mal estado. Las redes de distribución fueron instaladas a finales de los años 80, por lo que se encuentran en mal estado, provocando frecuentes roturas y gran número de salideros, lo que hace que el servicio sea deficiente. El resto de la población que suman 17 000 habitantes se abastece de pozos artesanales, muchos de ellos están contaminados, lo que provoca que periódicamente aparezcan focos de enfermedades gastrointestinales.

La necesidad fundamental es dotar a toda la población de la localidad de agua potable suficiente y de calidad, para ello es fundamental ampliar y mejorar la cobertura y el acceso al agua potable, razón prioritaria en la ejecución de este proyecto. Con el mismo se eliminarán enfermedades gastrointestinales que periódicamente surgen en la población debido al consumo de agua de pozos contaminados y se mejorará en gran medida el nivel de vida de la localidad.

La población total beneficiada directamente será de aproximadamente 23 000 habitantes

(6 345 viviendas). (Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos and Colaboración 2013)

CUETO, HOLGUÍN

El poblado de Cueto con 14 564 habitantes se encuentra ubicado al sur en la provincia de Holguín, a 60 kilómetros de la ciudad cabecera provincial, la base económica fundamental es la agro-industrial al contar con un central azucarero en el municipio, además de otras actividades como la ganadería y la producción de viandas y hortalizas.

En la actualidad el poblado de Cueto se abastece del agua proveniente del canal Sabanilla Cueto que es tratada en la planta potabilizadora de Ramón 2 la cual no está diseñada para este fin, pues realmente esta planta es de abasto al poblado de Marcané.

El agua es conducida a través de una conductora de unos 6 Km en mal estado y con disímiles usuarios en ruta por lo que se pierde aproximadamente el 50 % del agua bombeada hasta el tanque ubicado en la elevación del Tirso.

Solo el 40 % de la población actual de la cabecera municipal cuenta con redes de abasto, aunque en mal estado por lo que no se le suministra la dotación necesaria según la norma cubana, estableciendo que debe de ser de 235 lppd.

El resto de los habitantes no cuentan con sistema de abasto por redes, por lo que obtienen el agua a través de carros cisternas del acueducto y a través de tanques de agua que son transportados en animales de tiro, no garantizándose con esto la calidad de agua requerida según las normas cubanas. (Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos and Colaboración 2013)

ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN

LA PALMA, PINAR DEL RÍO

Como vía de solución se planteó la elaboración de un proyecto de ingeniería de detalle con el objetivo de rehabilitar los sistemas de abasto existentes.

Durante el proyecto CUB-001 se previó adquirir parte de los equipos para rehabilitar la planta potabilizadora existente, la reposición del tramo inicial de la conductora, así como las redes y acometidas. El CUB-004 continuación del CUB-001 consiste en seguir rehabilitando un tramo de conductora y de redes, así como la finalización de la estación de tratamiento y bombeo.

Las características hidrogeológicas de la macro zona en que está enclavado este poblado, hacen que se deseche totalmente la idea de solucionar el abasto de agua a partir de fuentes subterráneas por lo que se hace ineludible la rehabilitación de los sistemas existentes de modo que se hagan sostenibles en el tiempo. Se ha previsto continuar utilizando la misma fuente de abasto, la presa Mártires de la Palma (aguas superficiales), construida en el río Puercos, la fuente se encuentra unos 8 Km del pueblo, este reúne las condiciones de calidad y cantidad suficientes que la convierten en la mejor opción desde el punto de vista económico.

Con la implementación del proyecto quedaran beneficiados 15 255 personas que habitan las 4 275 viviendas existentes en el área del proyecto. El 49% de los beneficiaros son mujeres.

JATIBONICO, SANCTI SPÍRITUS

La solución propuesta consiste en rehabilitar el sistema de abasto existente que se inicia con el CUB-001B y continúa durante la fase CUB-004B. Este sistema lo conforma como fuente de abasto la presa Lebrije, con un volumen total de 102 hm^3 y un volumen útil de 81,7 hm^3, única fuente de abasto, resultado al que se llegó luego de hacer un profundo estudio hidrogeológico y una conductora que lleva el agua por gravedad hasta la potabilizadora.

La rehabilitación de la potabilizadora consta de la reconstrucción de la estación de bombeo instalando electrobombas con motores de velocidad variable para bombear directo a las redes.

Se analizó la posibilidad de construir un tanque apoyado para evitar el bombeo directo a las redes, pero la posición aprobada para el mismo quedaba a una distancia para la cual las conductoras tenían un costo sumamente elevado, siendo rechazada esta opción.

Desde el inicio no se consideró la posibilidad de explotación de pozos debido a los bajos niveles del manto freático y la imposibilidad de los acuíferos de almacenar el agua suficiente que permitiera el abasto desde las fuentes subterráneas, por lo que en los planes futuros se debía buscar las soluciones de abasto mediante fuentes superficiales.

Para el abasto a la ciudad se aceptó como la variante más óptima rehabilitar el mismo sistema ya existente y construir las redes de distribución de la ciudad.

CUETO, HOLGUÍN

La solución propuesta por la dirección de inversiones consiste en un acueducto alimentado a través de una fuente superficial existente presa Nipe. El agua será bombeada con una estación existente en el canal que se encuentra a la salida de obra de la toma de la presa, será tratada con una planta potabilizadora tradicional, desde la cual se bombea el agua tratada (60 l/s) hasta el tanque apoyado existente construido de hormigón que será rehabilitado. Desde este tanque nace la conductora principal hasta la red propuesta a construir, el abasto será directo a cada vivienda a través de acometidas con metrocontadores. (Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos and Colaboración 2013)

METODOLOGÍA DE LA EVALUACIÓN

La evaluación llevada a cabo, empleó una metodología que combinó herramientas cuantitativas y cualitativas para la recogida de información. El método utilizado implicó taller participativo, comprobación en el terreno, entrevistas con actores y beneficiarios, revisión documental, lo que

permitió recuperar evidencia y una valoración crítica del proceso. Debido a que no se existía ninguna metodología para la evaluación técnica de proyectos de agua y saneamiento fue preciso conformar una teniendo en cuenta las particularidades de Cuba, regulaciones, sistemas administrativos, sistemas constructivos, población, características topográficas, factores climáticos, etc con los cuales se programó una plantilla en formato Excel que recoge los resultados de las fases del proyecto y evalúa los indicadores recogidos en las fases, atendiendo a la siguiente clasificación: **Alta**: Del 95 al 100 % de cumplimiento; **Media**: Del 45 al 95% de complimiento y **Baja**: Del 0 al 45% del cumplimiento.

En dependencia del cumplimiento de los objetivos planteados, se evaluará el proyecto en tres categorías. **Alta**: proyecto que no tenga evaluación de Baja en ningún objetivo; **Media**: proyecto que tenga un solo objetivo evaluado de Baja; **Baja**: proyecto que tenga dos o más objetivos evaluados de Baja. Además, se analizarán y medirán con la misma clasificación los impactos directos derivados de la actividad de abasto o saneamiento según el caso de estudio.

FASES DE EVALUACIÓN

Cada fase comprende actividades a desarrollar, abarcando desde la recogida hasta el procesamiento de la información.

Fase I. Trabajo de Gabinete

- Análisis de Términos de Referencia
- Preparación de la propuesta técnica de evaluación.
- Redacción de metodología y oferta de servicios.
- Revisión de información.
- Diseño y preparación de instrumentos para el trabajo de campo.
- Identificación de los/as informantes claves.
- Diseño de los indicadores para el análisis de los criterios de evaluación.

Fase II. Trabajo de Campo

- Taller participativo para recogida de información.
- Aplicación de los instrumentos de recogida de información.
- Análisis de la información.
- Visitas a los objetos de obras y comunidades beneficiarias.

Fase III. Trabajo de Gabinete

- Análisis de la información.
- Elaboración del informe preliminar.
- Elaboración y envío a las contrapartes del informe preliminar.
- Intercambios de comentarios sobre el informe preliminar
- Elaboración del Informe Final

Fase IV: Jornada de Devolución

Presentación del Informe Final a las contrapartes.

03 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Se presentan los resultados correspondientes a la evaluación del proyecto ‘‘Mejora y Ampliación de los Sistemas de Agua Potable y Saneamiento de Pequeñas Ciudades Cubanas’’ aplicando la metodología técnica conformada en este trabajo, específicamente para las condiciones cubanas, la cual permitió determinar en qué medida se han lograron los objetivos y así valorar la pertinencia, eficiencia, eficacia y sostenibilidad del mismo.

PERTINENCIA RESPECTO A LAS PRIORIDADES NACIONALES Y DEL INSTITUTO NACIONAL DE RECURSOS HIDRÁULICOS (INRH)

El Proyecto "Mejora y Ampliación de los Sistemas de Agua Potable y Saneamiento de Pequeñas Ciudades Cubanas" busca mejorar las condiciones de vida en La Palma, Jatibonico, Cueto, Guisa, Báguano y Guantánamo mediante la rehabilitación de infraestructuras. Estas ciudades rurales están ubicadas en áreas distantes de Cuba. Antes del programa, el sistema de agua y saneamiento enfrentaba problemas significativos debido a la sequía y las secuelas del Período Especial, como falta de mantenimiento y equipos, además de una cultura deficiente sobre el uso racional del agua. Los huracanes Ike y Gustav empeoraron la situación. En respuesta, se implementó la Tarea Vida, un plan estatal basado en la ciencia para enfrentar el cambio climático, que prioriza 73 municipios, incluidos los más vulnerables. Este proyecto se ajusta a las prioridades nacionales y a los objetivos del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH).

El proyecto que se evalúa tiene una **Alta pertinencia** con las prioridades nacionales y se ajusta a los objetivos y funciones que realiza el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), institución responsable y encargada del manejo de los recursos hidráulicos y el saneamiento.

EFICIENCIA

Se analizó la correspondencia entre los resultados y las actividades y entre estas y los recursos gestionados por el programa; una valoración de los recursos humanos y materiales empleados, y cómo fue su gestión en función de los objetivos y resultados propuestos. Se examinó la calidad de los sistemas de coordinación, seguimiento y difusión tomando en cuenta tipo de instrumentos dispuestos para ello y su uso adecuado, y si fueron pertinentes para la toma de decisiones oportunas.

En sentido general la eficiencia del proyecto se consideró **Media** porque:

a) Los mecanismos organizativos y de ejecución con que contaba la estructura del INRH facilitaron la implementación de las obras, aunque en algunos casos sobrepasó las capacidades constructivas del INRH generando atrasos e incumplimiento del cronograma de ejecución de obra.
b) No existió un equipo de gestión por parte del INRH que se dedicara a tiempo completo a la ejecución del Programa, su acción se apoyó en los mecanismos de trabajo del INRH.
c) No se contó con un grupo gestor del proyecto a nivel territorial que facilitara su ejecución, pero si se apoyó en la estructura de las Delegaciones y Empresas de Servicios Ingenieros para llevar cabo su desarrollo.
d) Existió flexibilidad en la ejecución de acciones de infraestructura pendientes de la Fase I (CUB001B) para desarrollarlas en la Fase II (CUB- 004B), superponiéndose las acciones planificadas de ambos proyectos.
e) Resultó muy favorable la reorganización que tuvo el proceso de gestión a partir del año 2015 con la mejor articulación de las coordinaciones del Proyecto por parte del INRH y la AECID.

EFICACIA

El análisis de la eficacia se realizó siguiendo los elementos pactados en el objeto de la evaluación, poniendo énfasis en los objetivos, resultados y productos que estaban previstos concluir en el proyecto. Para la valoración del presente criterio se analizó el grado de avance de los resultados adscritos a los componentes que integran el programa, en base a sus productos e indicadores.

En las tablas 1, 2 y 3 se exponen y valoran el cumplimiento de los indicadores de los proyectos evaluados, así como la evaluación asignada a cada uno con respecto al indicador en cuestión.

LA PALMA, PINAR DEL RÍO

La Palma comenzó a beneficiarse desde el proyecto CUB 001-B y continuó en la segunda fase con el CUB 004-B**.** Su eficacia en relación al cumplimiento de las metas planificadas en la ciudad de La Palma se considera **Media** porque:

a) El sistema de agua rehabilitado está incompleto por faltarle la culminación de la obra de toma y la mejora de las condiciones de la planta potabilizadora.
b) Se completaron los trabajos de instalación de los metrocontadores planificados para este período.
c) Los equipos de medición que se encuentran en el laboratorio no están usando adecuadamente.
d) La mayoría de los equipos tecnológicos y de transporte aportados por el proyecto están funcionando.
e) Las capacitaciones recibidas durante el período del proyecto han respondido a las necesidades de los operarios y técnicos en correspondencia con las complejidades técnicas del proyecto.

JATIBONICO, SANCTI SPIRITUS

La eficacia en relación al cumplimiento de las metas planificadas en la ciudad de Jatibonico se considera **Media** porque:

a) Presentaron dificultades con la fuerza de trabajo que retrasó la construcción de la obra civil de la planta potabilizadora.
b) No se ha concluido con la instalación de las redes en la zona centro de la ciudad, por lo que no se le ha dado valor de uso al 100% de las redes instaladas.
c) Se dio por terminada la tarea de la instalación de los metros contadores sin la calidad requerida y sin valor de uso.
d) Gracias al proyecto se dio la posibilidad que los barrios periféricos pudieran contar con abasto de agua.
e) Aunque se le dosifica una cloración por seguridad al agua cruda abastecida a la población esta no llega a los hogares con el límite mínimo permisible para el consumo humano.

CUETO, HOLGUÍN

La eficacia en relación al cumplimiento de las metas planificadas en la ciudad de Cueto se considera Baja porque:

a) No cuentan con la capacidad constructiva especializada para iniciar la construcción de la planta potabilizadora, imposibilitando que la población pueda recibir un mejor servicio de agua en cuanto a frecuencia y calidad.

Se le está dando valor de uso a las redes instaladas acortando los ciclos de entrega de agua, siendo beneficiada la población que antes recibía el agua por caminos cisternas.

Tabla 1 Relación del cumplimento de los indicadores de la Fase I en La Palma.

Indicadores	Observaciones	Evaluación
Colocación de 3,1 km de redes	Esta etapa del proyecto se concibió para el abastecimiento a la población comprendida entre la planta potabilizadora y el entronque de Magueyes, la instalación 3,6 km de conductoras, 3,1 km de redes, 75 acometidas y 75 metrocontadores. Estas actividades fueron desarrolladas completamente, cumpliendo los indicadores establecidos para esta fase y como constancia, todas las viviendas cuentan con suministro de agua. Vale señalar que algunas de las acometidas se encuentran sobre el terreno, expuestas a riesgos y roturas. Esto puede ser debido a la poca profundidad a la hora de su colocación o debido a la erosión del suelo por la topografía ondulada del terreno. Sería recomendable repasar por parte de la U.E.B., la empresa constructora o bien aconsejar a la población para corregir la colocación de las acometidas y así evitar la rotura de las mismas y garantizar la sustentabilidad y durabilidad de la obra ejecutada.	Alta
Colocación de 3,6 km de conductoras		Alta
Colocación de 75 tramos de acometidas		Alta
Colocación de 75 metrocontadores		Alta
Adquisición de equipos tecnológicos para la planta potabilizadora	En relación al montaje de equipos y puesta en marcha de la planta potabilizadora, es importante señalar que se colocaron las válvulas, los equipos de laboratorio, de cloración y bombeo adquiridos a través del proyecto. Estos últimos, al momento de la visita para esta evaluación, se encontraban en el taller para su reparación. Además, se han venido realizando acciones menores de rehabilitación civil, enfocados en pintura interior y exterior de la planta, enchape de mesetas en el laboratorio, entre otras.	Alta
Trabajos de mejora en la obra de toma	En los inicios del proyecto fue concebida la utilización de la obra de toma de fondo de la presa para suministrar agua a la planta potabilizadora. Debido al mal estado y a fallas que se presentaron en la conductora a la hora de la puesta en marcha, fue necesario replantearse la colocación de una toma superficial para abastecer a la planta. Esto conllevó la concepción de un nuevo diseñó, trazado e instalación de una nueva conductora, retrasando la finalización del proyecto, aunque por el momento se continúa suministrando agua con la conductora vieja, para no afectar a la población. Se había programado su ejecución y finalización para el 30 de septiembre de 2018. Debido a la falta del equipo de excavación se ha decidido trasladar para el mes de diciembre la ejecución de la misma, aprovechando las intervenciones de la empresa constructora en la ejecución de la conductora de agua cruda (CUB004-B). La solución prevista consistirá en realizar una zanja lo más profunda posible sobre la corona de la presa con vistas a disminuir las presiones negativas (en anteriores soluciones producían el fallo de la tubería de PEAD empleada) y colocar tubería de acero soldada para el tramo con mayores presiones negativas, manteniendo el resto del trazado con tuberías de PEAD. A pesar de lo planteado aún no se ha ejecutado la toma flotante de la planta potabilizadora de abasto a la población.	Baja

Tabla 2 Relación de los indicadores de la Fase I en Jatibonico.

Indicadores	Observaciones	Evaluación
Colocación de 16,6 km de redes	Durante esta fase estaba previsto la colocación de 16,6 km de redes donde existió un sobrecumplimiento de 0,9 km de redes, colocando un total de 17,5 km de redes resultando beneficiados 23 000 habitantes y 6 345 viviendas. Cabe destacar la existencia de algunas tuberías que están colocadas, pero no conectadas. Fueron instaladas el 100% de las acometidas comprometidas, aunque estas no se encuentran en explotación debido a que no se está dando agua a través de redes. La colocación no fue la más acertada en todos los casos evidenciándose en algunos lugares grandes errores de instalación que imposibilitaran el funcionamiento adecuando de las mismas. Respecto a los metrocontadores, estos fueron colocados e instalados en el tiempo previsto. En el trabajo de campo se visualizaron errores de instalación que han propiciado un deterioro significativo que influirán en su posterior funcionamiento.	Alta
Colocación de 3 514 acometidas		Alta
Colocación de 3 514 metrocontadores		Media
Adquisición de equipos tecnológica para la planta potabilizadora	Se cuenta con una planta potabilizadora tradicional de 690 l/s que se encuentra en buenas condiciones estructurales, pero carece de equipamiento y con el que se cuenta no se encuentra en óptimas condiciones para su explotación.	Alta

Tabla 3 Relación de los indicadores de la Fase I en Cueto.

Indicadores	Observaciones	Evaluación
Colocación de 30 km de redes	Los 3 km de conductora comprenden desde la fuente hasta el área donde se ubicará la potabilizadora ya que la existente no se pudo aprovechar por encontrarse en una situación precaria con disímiles salideros. Se colocaron 30 km de redes cubriendo el 100 % de Cueto cabecera y reduciendo los ciclos a intervalos de 9-14 días instalando así 2 850 acometidas. Como parte final del proceso de colocación de las redes y con el fin de implementar la política de ahorro de agua en el país, fueron colocados 2 850 metrocontadores. La mayoría de los metrocontadores se encuentran colocados y empotados correctamente, aunque una parte de estos no cumplen con las medidas de seguridad establecidas.	Alta
Colocación de 3 km de conductoras		Alta
Colocación de 2850 acometidas		Alta
Colocación de 2850 metrocontadores		Media
Adquisición de equipos tecnológicos para la planta potabilizadora	Se realizó un estudio técnico para la ampliación hasta 120 l/s de la planta existente, pero no fue posible debido a que no existe área para la construcción de las nuevas obras requeridas. Por lo tanto, se propuso construir una planta aledaña al tanque compensador, logrando con esto una mejor operación del sistema. Parte de los equipos tecnológicos se adquirieron durante esta etapa. Teniendo en cuenta que el agua es superficial la misma debe ser tratada mediante una planta potabilizadora el esquema tecnológico consistirá en: Coagulación seguido de floculación- sedimentación, filtración y desinfección.	Alta
Trabajos de rehabilitación del	Se realiza la rehabilitación del tanque existente en la elevación del Tirso, aunque se mantienen algunas deficiencias en la cubierta. El depósito cuenta con un volumen aproximado de 1 500 m^3.	Alta

IMPACTO DE LA CALIDAD DEL AGUA SUMINISTRADA

Se enfocaron las valoraciones hacia los efectos logrados por el alcance de los resultados y objetivos del programa. La percepción que tiene la población sobre los cambios en sus condiciones de vida. Así como los impactos positivos y negativos en las dimensiones de mejora de la calidad de vida, participación social y empoderamiento. Para esto se valoró fundamentalmente el impacto que ha tenido la construcción y/o rehabilitación de los sistemas de abasto en la calidad del agua suministrada.

LA PALMA, PINAR DEL RÍO

En relación a la calidad del agua del sistema de abasto de La Palma es importante decir que la UEB de Acueducto y Alcantarillado estableció contrato con la Empresa Nacional de Análisis y Servicios Técnicos (ENAST) para realizar las pruebas de calidad en las redes de abastecimiento de forma mensual y de esta forma certificar el cumplimiento de los requerimientos necesarios para abastecer a la población. Pero no existió una retroalimentación de información entre la ENAST y la UEB de Acueducto, puesto que no se les hizo entrega de los resultados de los informes de la calidad del agua, sólo se les enviaron reportes en los casos donde existía incumplimiento de alguno de los parámetros.

La Dirección de Higiene y Epidemiología realizó análisis mensuales a las redes, considerando que con la rehabilitación de los sistemas de agua potable y la planta potabilizadora se produjera un gran impacto en la salud de los habitantes, quedando eliminados los encharcamientos por salideros que dan origen a la proliferación de vectores dañinos a la salud.

En la planta potabilizadora se llevaron a cabo muestreos para el seguimiento de la calidad del agua en la entrada y la salida, los cuales fueron detenidos seis meses por problemas eléctricos y se continuaron suministrando los químicos tales como cloro y alúmina por la experiencia de los operarios.

JATIBONICO, SANCTI SPIRITUS

Respecto a la calidad del agua, es importante señalar que al equipo evaluador nunca se le entregó los resultados del monitoreo realizado por la Dirección de Higiene y Epidemiología y/o la ENAST al agua de los pozos y a la de las redes. En este sentido, se procedió a determinar la concentración de cloro residual y total en el agua de las redes, por el método visual de comparación DPD, a falta de valores comparativos. En la estación de bombeo temporal con que cuenta este sistema, se constataron valores superiores a 2 mg/L, pero en los puntos medidos en las redes, no se encontró presencia de cloro, valores de 0,01 mg/L, valores menores a los establecidos en la NC 827:2012 Agua Potable-Requisitos Sanitarios. No fue posible determinar las causas de la no presencia de cloro en los puntos medidos de la red. Se sugirió que este análisis se repita al finalizar el proyecto.

CUETO, HOLGUÍN

Respecto a la calidad del agua la UEB de Acueducto y Alcantarillado realizó análisis al agua de forma semanal en conjunto con la Dirección de Higiene y Epidemiología, estas muestras fueron llevadas a los laboratorios de Mayarí, cumpliendo en todos los casos con las normas de abasto según el gobierno cubano.

La UEB estableció contrato con la Empresa Nacional de Análisis y Servicios Técnicos, y se realizaron pruebas de calidad del agua de forma mensual para determinar si el agua cumplía con los requerimientos necesarios para el abasto a la población, existiendo retroalimentación entre ambas entidades.

En la planta potabilizadora no se llevaron a cabo muestreos para el seguimiento de la calidad del agua debido a que no se culminó la ejecución de la misma.

SOSTENIBILIDAD Y PERDURABILIDAD DE LOS SISTEMAS DE ABASTO

Se analizaron las condiciones existentes para que los resultados y efectos positivos derivados del proyecto continúen una vez que se ha retirado la ayuda externa, así como qué medidas se han tomado para garantizar el mantenimiento y reparación de las obras y para garantizar los insumos y medios a largo plazo.

Resulta esencial considerar las operaciones y el mantenimiento de sistemas de abastecimiento de agua que han sido rehabilitados por el proyecto para así poder garantizar una mayor perdurabilidad de los nuevos sistemas de abasto. Es por ello que a continuación se hará el análisis de este aspecto por cada una de las ciudades beneficiadas.

LA PALMA, PINAR DEL RÍO

Actualmente se está operando el sistema de redes de abastecimiento que comprende el proyecto La Palma, por la experiencia de la entidad de años de trabajo. Debido a que la explotación de la nueva obra sólo se encuentra en estado parcial, en cuanto se culmine la obra constructiva y se realice la entrega del proyecto, por parte de los inversionistas a los actores explotadores del sistema, se debe hacer entrega del plan de operaciones para la explotación de la obra.

La planta potabilizadora tampoco cuenta con un plan de operaciones establecido, debido a que todavía se está suministrando agua de la toma de fondo del embalse. Se opera la planta por la experiencia adquirida de los años para esta situación y con las características específicas de estas aguas. Se espera que cuando se termine la construcción de la toma superficial, y mejore la calidad del agua, se pueda y deba establecer un plan de operaciones óptimo para la planta potabilizadora.

La UEB Acueducto contaba con un plan de mantenimiento preventivo, donde incluya todos los objetos de obra pertenecientes a la entidad, planta potabilizadora La Palma y redes de abasto instaladas. También se realizaron mantenimientos correctivos, por fallas o roturas imprevistas en el día a día de trabajo quedando como constancia en las órdenes de reparación y mantenimiento

La sostenibilidad en relación a la perdurabilidad de los sistemas de agua rehabilitada en la ciudad La Palma se consideró **Media** porque:

a) No se ha concluido la obra y por tanto no se cuenta con un Plan General de Operación y Mantenimiento establecido.
b) Operan las redes a partir de su experiencia, pero no queda constancia de su operación diaria.
c) Cuentan con registros del mantenimiento de las redes.

JATIBONICO, SANCTI SPIRITUS

En el caso de esta ciudad no es factible contar con un Plan de operación y mantenimiento para la planta de tratamiento porque no está concluida. Cuando se concluya la rehabilitación de la planta se debe hacer entrega oficial a la UEB de Acueducto de la obra y con ello del plan de operación.

Las redes no se están operando adecuadamente porque se está explotando sólo una parte de las ya instaladas y no cuentan con un plan de operación y mantenimiento.

La sostenibilidad en relación a la perdurabilidad de los sistemas de agua rehabilitada en la ciudad Jatibonico se consideró **Baja** porque:

a) Aún no se ha concluido la obra y por tanto no se cuenta con un Plan General de Operación y Mantenimiento establecido.
b) No se están operando las redes instaladas.

c) Las redes que se encuentran colocadas y en explotación no tienen establecido un Plan de Operación.
d) No cuentan con registro de mantenimiento de las redes.

CUETO, HOLGUÍN

Debido a que no se han realizado los trabajos de construcción de la planta potabilizadora no resulta factible analizar la existencia de un Plan de Operación y Mantenimiento para este objeto de obra.

El proyecto benefició a todo el poblado de Cueto con la colocación de las redes. La poca experiencia en este sector conllevó a que la UEB haya implementado un Plan de Operación adaptado a las situaciones diarias que presenta la localidad, aunque la misma no consta con un plan de mantenimiento.

La sostenibilidad en relación a la perdurabilidad de los sistemas de agua rehabilitada en la ciudad de Cueto se consideró **Medio** porque:

a) No se cuenta con un Plan de Mantenimiento, de igual manera no se han comenzado los trabajos en la planta potabilizadora.
b) Operan las redes a partir de las necesidades de la población, debido a su poca experiencia.
c) No cuentan con registros del mantenimiento de las redes.

04 CONCLUSIONES

Se elaboró una metodología para evaluación de proyectos de alcance nacional, tomando como referencias diversas metodologías de América Latina en el sector de agua y saneamiento.

Se establecieron las normas de evaluación según el porciento de ejecución realizado.

Se evaluaron los casos de estudio otorgándoles una evaluación general según el cumplimiento de los indicadores establecidos.

Se determinan las deficiencias presentadas por el INRH, beneficiario principal del programa “Mejora y Ampliación de Pequeñas Ciudades Cubanas”.

La metodología propuesta en este trabajo incorpora una evaluación técnica, no establecida en las metodologías de agua y saneamiento consultadas.

Se establece el sistema de evaluación de los proyectos otorgándoles categorías de Alta, Media Y Baja en correspondencia con el cumplimiento de cada indicador.

05 REFERENCIAS

Bárcena A. y Prado A. (2016). Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: Una oportunidad para América Latina y el Caribe. Naciones Unidas, CEPAL. https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/81eff451-0f82-4332-aee5-9f25f2950b45/content

Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos & A. E. de Colaboración. (2013). Plan operativo general. Informe técnico. Cuba.

Sánchez L. (2014, 20 de noviembre). Abasto y saneamiento del agua: una estrategia a seguir. Granma. https://doi.org/10.0000/0000

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Daniela Córdova de Horta https://orcid.org/0000-0002-7284-9682

Realizó contribuciones en conceptualización, metodología, validación, análisis formal, escritura y discusión de los resultados

Estado del arte de algoritmos de Machine Learning para la detección de rupturas súbitas

Jaime Ernesto Chiang Cruz E-MAIL: jaime.cc@civil.cujae.edu.cu
Centro de Investigaciones Hidráulicas, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, CUJAE,Cuba.

Iliover Vega González E-MAIL: ivegag@cime.cujae.edu.cu
CIME, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, CUJAE, Cuba.

Jorge Ramírez Beltrán E-MAIL: jorgeramirezcihcujae@gmail.com
Centro de Investigaciones Hidráulicas, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, CUJAE,Cuba.

ABSTRACT

En este trabajo se realiza una revisión de los paradigmas existentes y las técnicas más usadas en la detección de rupturas súbitas, profundizando en las que emplean Machine Learning como herramienta principal para la interpretación de datos. Se comparan la relación entre la efectividad de la detección y los parámetros de cada algoritmo, así como el nivel de procesamiento requerido. Para la Máquina de Soporte Vectorial la efectividad en la detección de ruptura súbita está relacionada de forma exponencial con la cantidad de combinaciones de C y γ . El árbol de decisión expuesto aumenta su precisión mientras más información del estado de la red tenga. La red neuronal analizada demuestra una efectividad en la detección al nivel del resto de algoritmos tratados manteniendo el compromiso con el nivel de procesamiento.

PALABRAS CLAVES: Aprendizaje automático, redes hidráulicas, redes neuronales, ruptura súbita.

State of the art of Machine Learning algorithms for burst detection

RESUMEN

In this work, a review of the existing paradigms and the most used techniques in the burst detection is carried out, delving into those that use Machine Learning as the main tool for data interpretation. The relationship between detection effectiveness and the parameters of each algorithm, as well as the level of processing required, are compared. For Support Vector Machine, the effectiveness in burst detection is exponentially related to the number of combinations of C and γ. The exposed decision tree increases its precision the more information about the state of the network it has. The artificial neural network demonstrates a detection effectiveness at the level of the rest of the algorithms treated, maintaining the commitment to the processing level.

KEYWORDS: Machine learning, hydraulics networks, neural networks, burst.

CITMA CERTIFICADO

Junio 2024-RECIBIDO *APROBADO-Junio 2024*

Esta obra está bajo una licencia internacional creative commons attribution-noncommercial 4.0

SciELO

01 INTRODUCCION

El agua es un recurso de vital importancia, contribuye a la estabilidad y regulación de los entornos, del medio ambiente y de los organismos que habitan en este. El riesgo de agotar los recursos hidráulicos se ha incrementado notablemente en los últimos años debido a la creciente contaminación y el cambio climático los cuales se consideran un peligro inminente. La mayor influencia para las pérdidas de agua en los sistemas hidráulicos está dada por rupturas súbitas y fugas de fondo. Las primeras son grandes fugas de agua que ocurren en un corto intervalo de tiempo, ocasionadas por rupturas bruscas en los conductos y componentes de su ensamblaje. Las fugas de fondo presentan un caudal bajo y principalmente se originan en tanques y tuberías. A pesar de que estas últimas contribuyen a la pérdida de agua, la ruptura súbita representa un volumen mayor.

Por la importancia que presenta la detección oportuna de rupturas súbitas en redes hidráulicas, es esencial la búsqueda de alternativas que mejoren su eficiencia y lleven a cabo una gestión adecuada de los recursos hidráulicos. Una de ellas es tener un sistema capaz de detectar fugas por ruptura súbita en tiempo real, que reduzca al mínimo los falsos positivos y logre la suficiente precisión al conseguir un manejo rápido y efectivo del problema. Este sistema requiere de un algoritmo que cumpla con las exigencias anteriores y pueda ser implementado en una plataforma de bajo consumo de potencia. Esto posibilita que los registradores de datos se mantengan autónomos durante un período de tiempo prolongado, facilitando su ubicación en lugares de difícil acceso.

En la comunidad científica se definen dos paradigmas compuestos por técnicas que detectan y localizan estos fenómenos indeseados. El primero adquiere datos a través de los sistemas de Supervisión, Control y Adquisición de Datos (SCADA, por sus siglas en inglés de Supervision Control and Data Adquisition) con un período de muestreo que típicamente se encuentra entre 5 y 15 minutos, debido a que este período de muestreo provee un balance razonable entre el volumen de datos y la definición de patrones diarios, también permite obtener una buena representación de la dinámica del fluido en la red (Trutié-Carrero et al. 2018). A pesar de los resultados alcanzados siguiendo el modelo mencionado, la principal dificultad es su incapacidad para detectar y localizar la ruptura súbita en el momento que se genera; no disminuyendo su ciclo de vida y aumentando los costos. El segundo paradigma es el basado en datos (data-driven), este tiene un período de muestreo mucho más pequeño para lograr una mejor apreciación del instante en el que se generó la ruptura súbita, utilizando en la adquisición de los datos, tecnología de sensores inalámbricos desplegada en el Sistema de Distribución de Agua (SDA) con dispositivos de bajo costo, posibilitando monitorizar la infraestructura en tiempo real (Srirangarajan et al., 2013). En los métodos basados en datos no es necesario un conocimiento profundo del SDA, pues solo implican un análisis estadístico o de procesamiento de señales de los datos adquiridos, como consecuencia sus resultados son resistentes a errores de modelado y medición.

En los últimos años el desarrollo del Machine Learning se ha visto potenciado. Es una rama de la Inteligencia Artificial que desarrolla técnicas que permiten a máquinas tomar decisiones, aprenden gracias a encontrar patrones en los datos y predecir situaciones posteriores. En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo exponer los paradigmas existentes y las técnicas más usadas en la detección de rupturas súbitas, profundizando en las que emplean Machine Learning como herramienta para interpretar los datos de presión y caudal.

02 DESARROLLO

DETECCIÓN DE RUPTURAS SÚBITAS EN TUBERÍAS

Las fugas por ruptura súbita en los SDA representan un volumen mayor de pérdida de agua que las de fondo, provocando un aumento en la perturbación del sistema. Además de que produce la interrupción del suministro de agua, puede dañar las calles y edificaciones y eleva los costos por reparación.

En la figura 1 se observan los tiempos que intervienen en el ciclo de vida de dicho evento.

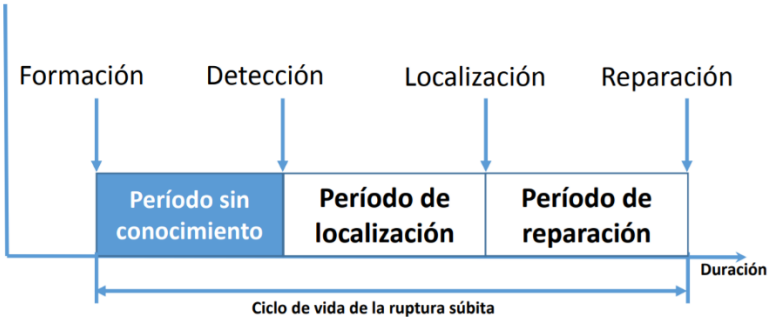

Figura 1. Ciclo de vida de la ruptura súbita.

En la mayoría de los casos, una técnica para la detección de rupturas súbitas basada en datos se realiza siguiendo dos pasos:

Adquisición, preprocesamiento y transformación de datos: Su objetivo principal es eliminar datos erróneos o faltantes de los adquiridos en la medición de parámetros de interés en la tubería como caudal o presión, para facilitar los análisis posteriores. Estos datos deben procesarse antes de ser usados para el análisis de fugas, lo que asegura que son adecuados para el algoritmo seleccionado. Aunque es posible que cuestiones relacionadas con la variabilidad y la incertidumbre surjan durante el procesamiento de los datos de medición, pueden ser superadas en cierta medida con preprocesamiento y transformación de los datos (Zaman et al. 2020).

Estrategia de detección de fugas: Las técnicas basadas en datos se pueden clasificar según sus estrategias de detección de fugas en métodos de clasificación de conjuntos de características, métodos de clasificación-predicción y métodos estadísticos.

ALGORITMOS DE MACHINE LEARNING

Machine Learning es una disciplina de la Inteligencia Artificial cuyo objetivo principal es que un agente artificial mejore su rendimiento a partir de resultados previamente obtenidos. Desde el punto de vista del Machine Learning obtener conocimiento implica extraer información potencialmente útil y desconocida a partir de un conjunto de datos. Para lograrlo, es necesario generar métodos, generalmente no-triviales, que permitan analizar los datos, y a partir de dicho análisis producir un modelo mediante el cual pueda representar un fenómeno. En Machine Learning se pueden diferenciar dos tipos de métodos que se utilizan para la construcción de los modelos previamente mencionados: el aprendizaje supervisado y no supervisado.

El aprendizaje no supervisado se basa en modelos descriptivos en donde la máquina entiende los datos, la evaluación es cualitativa o indirecta y no realiza predicciones, encuentra algo específico. El aprendizaje no supervisado utiliza algoritmos de aprendizaje automático para analizar y agrupar un conjunto de datos sin etiquetar. Estos algoritmos hallan patrones ocultos en los datos sin la necesidad de ser supervisados.

En el aprendizaje supervisado se utilizan modelos predictivos en donde la máquina aprende explícitamente, por lo tanto, intenta predecir el futuro a partir de datos históricos, además resuelve problemas de clasificación y regresión. A medida que los datos de entrada se introducen en el modelo, este ajusta sus ponderaciones hasta que el modelo se ha ajustado correctamente, lo que ocurre como parte del proceso de validación cruzada (Saravanan y Sujatha, 2018).

Existen diversas técnicas que permiten obtener modelos que representen el patrón obtenido a partir de los conjuntos de datos. Los árboles de decisión, las redes neuronales y las máquinas de soporte vectorial han sido ampliamente utilizados para construir modelos predictivos. Resulta interesante entonces profundizar en las características de estos algoritmos.

ÁRBOL DE DECISIÓN

Los Árboles de Decisión (DT por sus siglas del inglés Decision Trees) son algoritmos estadísticos o técnicas de Machine Learning que permiten la construcción de modelos predictivos de analítica de datos basados en su clasificación según ciertas características o propiedades, o en la regresión mediante la relación entre distintas variables para predecir el valor de otra. Por otro lado, los árboles de decisiones brindan una eficiencia de alto nivel y una fácil interpretación. Estos dos beneficios hacen que este simple algoritmo sea popular en el espacio del aprendizaje automático.

Los árboles de decisión se clasifican en dos tipos de modelos: regresión y clasificación (Mendoza García, 2023).

Modelos de Regresión: se pretende predecir el valor de una variable en función de otras variables que son independientes entre sí. Por ejemplo, predecir el precio de venta de un piso en función de variables como su localización, superficie, distancia a la playa, etc. El posible resultado no forma parte de un conjunto predefinido, sino que puede tomar cualquier posible valor.

Modelos de Clasificación: se pretende predecir el valor de una variable mediante la clasificación de los datos en función de otras variables. Por ejemplo, predecir qué personas comprarán un determinado producto, clasificando entre clientes y no clientes, o qué marcas de computadoras portátiles comprará cada persona mediante la clasificación entre las distintas marcas. Los valores para predecir son predefinidos, es decir, los resultados están definidos en un conjunto de posibles valores.

En el artículo (Alves Coelho et al. 2020) se presenta un método de detección de rupturas súbitas que emplea árboles de decisión para interpretar cambios rápidos en las variaciones transitorias de una señal de presión. En el algoritmo presentado se utiliza una partición jerárquica de datos de entrenamiento y un atributo determinado para dividir los datos, y esta división se realiza de forma iterativa hasta que el nodo hoja contenga una serie de registros que se pueden utilizar para clasificar los datos. Cada nodo en el árbol actúa como un caso de prueba para algún atributo, y cada borde que desciende de ese nodo corresponde a una de las posibles respuestas al caso de prueba. Este proceso es recursivo y se repite para cada subárbol enraizado en los nuevos nodos.

Para la elección del atributo se utilizan Medidas de selección de atributos (MSA) para dividir los registros. Las MSA consisten en seleccionar el subconjunto más pequeño de atributos tal que no se afecte significativamente el porcentaje de clasificación y que la distribución de clases resultante sea lo más parecido posible a la original.

El proceso de selección de atributos involucra 4 pasos (Arredondo Arteaga et al. 2017):

1. Generación de candidatos (subconjuntos): involucra una estrategia de búsqueda
2. Evaluación de candidatos (subconjuntos): requiere un criterio de evaluación

3. Criterio de parada: Este puede darse por la estrategia de búsqueda, el número de iteraciones realizadas, el número de atributos seleccionados, el que no se mejore el criterio de evaluación al añadir/quitar otro atributo, que el error de clasificación esté por debajo de un umbral, etc.
4. Validación de resultados: Ya sea contra atributos conocidos como relevantes o comparando el error en la clasificación con y sin la selección de atributos.

Se utiliza el algoritmo ID3, el cual induce árboles de decisión basados en la ganancia de información obtenida de los ejemplos de entrenamiento y luego lo usa para clasificar el conjunto de prueba. En la figura 2 se muestra el pseudocódigo del algoritmo.

1: **procedimiento** ID3(R, C, S) ▷ Entrada: R un conjunto de atributos no objetivo; C, el atributo objetivo; S, dato de entrenamiento. Salida: árbol de decisión
2: **si** $S = \emptyset$ **entonces**
3: **regresar** $\emptyset$ ▷ Regresar conjunto vacío
4: **fin si**
5: **si** S tiene valores con el mismo valor objetivo **entonces**
6: **regresar** un único nodo con este valor
7: **fin si**
8: $D \leftarrow Calcular\ la\ Ganancia(D, S) con\ 2.5$
9: $\{d_j j = 1, 2, 3..., m\} \leftarrow valores\ de\ atributo\ de\ D$
10: $\{S_j \quad con \quad j \quad = \quad 1, 2, 3..., m\} \quad \leftarrow$ *los subconjuntos de E construído de* d_j *registrar el valor del atributo* D
11: **regresar** Un árbol cuya raíz es D y los arcos son etiquetados por $d_1, d_2, \cdots, d_m$. E ir a los sub-árboles ID3$(R - \{D\}, C, S_1), ID3(R - \{D\}, C, S_2), \cdots, ID3(R - \{D\}, C, S_m)$
12: **fin procedimiento**

Figura 2. Pseudocódigo del algoritmo ID3 (Rodríguez et al. 2021)

REDES NEURONALES ARTIFICIALES

Las Redes Neuronales Artificiales (RNA) están inspiradas en la biología, esto significa que están formadas por elementos que se comportan de manera análoga a las neuronas definidos con el mismo nombre (en las funciones más elementales) y están organizadas de una forma similar a la del cerebro. Cuando se trabaja con grandes cantidades de neuronas, es natural ordenar aquellas que tienen comportamientos similares en "capas". Cada capa es un vector de neuronas. Se puede establecer una clasificación de las redes neuronales en cuanto al número y características de sus capas como simples o multicapa, como se muestra en la figura 3.

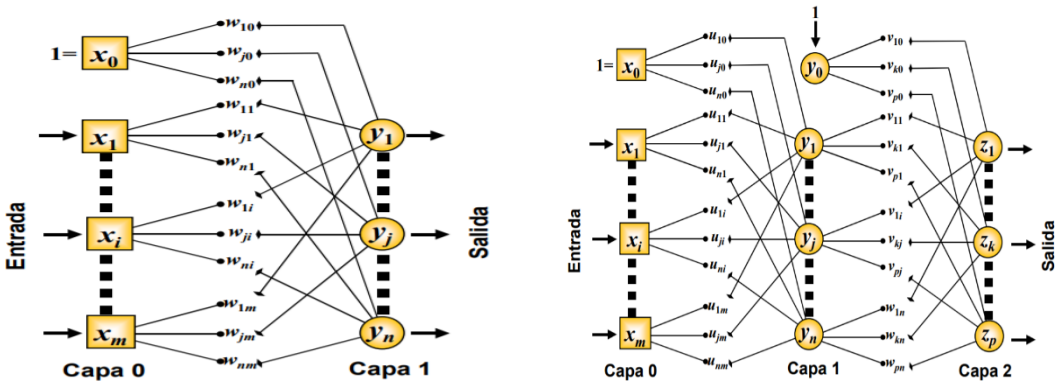

Figura 3. A la izquierda la representación gráfica de una red de capa simple y a la derecha representación gráfica de una multicapa (Hernández, 2014)

En (Bohorquez et al., 2021) se presenta una técnica basada en el análisis de variaciones transitorias de presión que emplea RNA para interpretar cambios rápidos de la señal para identificar, localizar y caracterizar rupturas súbitas en tuberías de agua. El enfoque propuesto se basa en datos y no en información detallada sobre la tubería analizada para la interpretación de la traza de presión transitoria casi en tiempo real. Se utiliza la RNA como herramienta para interpretar los rastros e identificar ráfagas. Esta técnica analiza segmentos de tiempo corto de datos de la señal potencialmente continuo a través de dos procesos diferentes. Un primer análisis para detectar si una ventana de tiempo de la variación transitoria de presión en particular contiene cambios anormales que podrían haber sido producidos por la ocurrencia de una ruptura súbita. Este análisis inicial también determina si la información contenida en la ventana de tiempo es suficiente para localizar y caracterizar el estallido potencial. Luego, una segunda etapa utiliza otra RNA para analizar las ventanas de tiempo anormales detectadas desde la primera y lograr predecir la ubicación y las características de la ráfaga que se produce.

La estructura de RNA más general y ampliamente utilizada no es capaz de capturar adecuadamente los cambios en la presión debido a la presencia de diferentes elementos en una tubería (Bohorquez et al. 2021). Teniendo esto en cuenta, es mejor seleccionar una arquitectura de red convolucional unidimensional (1D), ya que estas redes son más ligeras y menos propensas al sobreajuste. Están diseñadas para funcionar satisfactoriamente tanto en la detección de la ocurrencia de una ráfaga como en la identificación de la ubicación y el tamaño de la ráfaga. El diseño se desarrolla modificando diferentes características de la arquitectura, incluido el número de capas convolucionales, el tipo de función de activación, el número de filtros en cada capa y el tamaño del lote de entrenamiento.

La configuración final de las redes convolucionales 1D incluye un máximo de siete capas convolucionales, el uso de unidad lineal rectificada con fugas (Leaky ReLU) y Softmax como funciones de activación, un número máximo de 12 filtros que incrementa en cada capa convolucional, un tamaño de lote de entrenamiento de 50 muestras, y tres capas densas de tamaños máximos de 21, 9 y 3.

Se requiere un procesamiento adicional de la variación transitoria de presión porque la técnica propuesta está diseñada para funcionar casi en tiempo real. Se aplica el concepto de ventana de tiempo deslizante (Mounce et al. 2011). Una vez que se completa la partición de la señal, las ventanas de tiempo resultantes se pueden clasificar en tres categorías dependiendo de la información de cabeza contenida.

La primera categoría se define como condición de traza normal, o Categoría N, ya que estas ventanas de tiempo solo contienen parte de la supuesta variación de la sinusoidal lenta antes de la ruptura súbita. La segunda categoría se define como condición anormal de la traza con información incompleta para la identificación o Categoría Ab-I. Las ventanas de tiempo en esta categoría capturan la caída de carga inicial debido al estallido, pero no se incluye el reflejo de la onda de estallido. La última categoría se define como condición anormal de la traza con información completa para la identificación, o Categoría Ab-C. Las ventanas de tiempo en esta categoría contienen un reflejo completo de la onda transitoria creada por el estallido en las condiciones de contorno de la tubería.

La duración de cada ventana de tiempo debe ser de al menos 2 segundos para capturar el primer conjunto de reflejos de onda causados por la ocurrencia de la ruptura súbita (P. Huang et al., 2018). Se requiere un transductor de presión para capturar las variaciones de este parámetro en tiempo real, se toman 250 muestras por segundo que están en formatos enteros de 16 bits. Teniendo en cuenta la frecuencia de muestreo y la duración de cada ventana de tiempo, cada traza se transformó en 1328 ventanas de tiempo cada una con una longitud de 562 valores (correspondientes a 2,25 s).

Cada uno de estos valores debe ser almacenado en RAM durante la ejecución del algoritmo para su procesamiento, para lo que se necesitaría ocupar 1,124 Kb de memoria.

MÁQUINA DE SOPORTE VECTORIAL

En (Liu et al. 2019) se propone un método de identificación de fugas basado en una SVM. Con base en las diferencias en las características de tiempo-frecuencia de las señales con fugas y sin fugas, se propone un método que construye matrices de características empleando la función de densidad de espectro, la entropía aproximada y el análisis de componentes principales (PCA) y que utiliza SVM como un clasificador para identificar las fugas. Las pruebas para la comprobación de la efectividad en la detección de rupturas súbitas de este algoritmo se realizan a lo largo de un tubo compuesto de aluminio y plástico expuesto, con un diámetro de 27 mm.

Característica de densidad de espectro

Se ha comprobado que los componentes de los espectros de las señales de fuga se concentran principalmente en bandas específicas. Como resultado, las diferencias entre los espectros de las señales pueden emplearse como características de identificación de fugas en tuberías. Para extraer las diferencias de la densidad espectral de la señal y realizar un análisis de tiempo-frecuencia de las señales de la tubería, se utiliza la descomposición de modo empírico (EMD por sus siglas en inglés de Empiric Mode Decomposition) y una función de dominio de frecuencia para la detección. EMD puede descomponer selectivamente la señal como la suma de un número finito de funciones de modo intrínseco (IMF por sus siglas en inglés de Intrinsic Mode Function).

La figura 4 muestra el espectro de los primeros cuatro grupos de componentes IMF que se obtienen a partir de la EMD de la señal de fuga y de no fuga de la tubería. Comparando el IMF de cada capa de la señal de fuga y sin fuga, se puede ver que el espectro principal de la señal estaba en el IMF de la primera capa. El espectro de la señal de fuga en esta capa se distribuye principalmente entre los 1000 Hz y 2000 Hz. El espectro de la señal sin fugas es más aleatorio y se distribuyó principalmente en toda la banda.

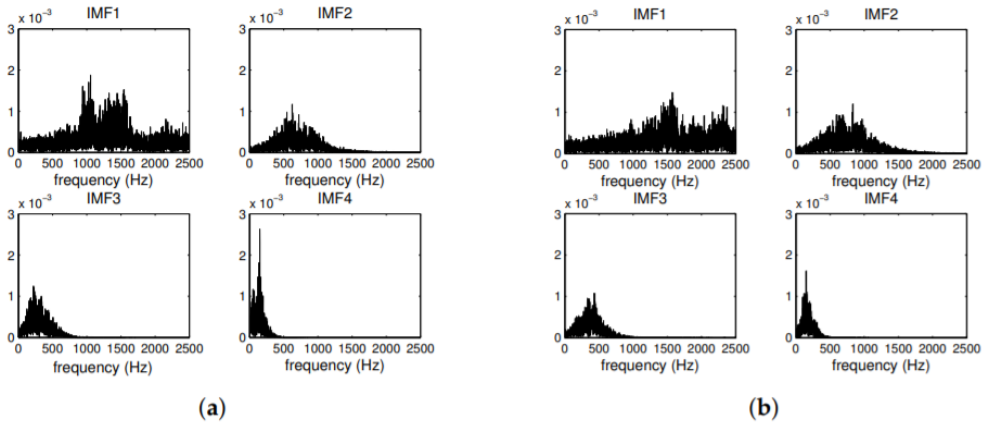

Figura 4. Los primeros cuatro espectros de función de modo intrínseco (IMF) de la señal de fuga y no fuga de la tubería. (a) Señal de fuga. (b) Señal sin fugas (Van Jaarsveldt et al. 2023)

Característica de complejidad de la señal

Debido a que la fuga en la tubería es un evento localizado y de baja probabilidad de ocurrencia, debe haber diferencias en la composición en el dominio del tiempo de las señales de fuga y las señales sin fuga, la composición de las señales de fuga debería ser más compleja. La entropía aproximada (ApEn por sus siglas del inglés de Aproximate Entropy) es la probabilidad condicional cuando se

mantiene la similitud después de que las dimensiones de un vector de similitud aumentan de m a m + 1 y es la probabilidad del nuevo modo cuando cambia el número de dimensiones.

Característica del componente principal de la señal

El análisis de las componentes principales (PCA por sus siglas en inglés de Principal Components Analise) es un método clásico de extracción de características que implica la reducción de la dimensionalidad y convierte las variables en un número menor de variables agregadas. Cada componente principal es una combinación lineal de las variables originales y los componentes principales individuales no están mutuamente correlacionados. Estos pueden transmitir la gran mayoría de la información contenida en las variables originales sin que se superponga entre sí.

Para aumentar la precisión de la detección de fugas, se aprovechan las características de tiempo-frecuencia para construir conjuntos de características de identificación usando SVM para clasificar las características de la señal y, por lo tanto, determinar la fuga de la tubería. El SVM es un medio ventajoso para resolver problemas de muestras pequeñas, problemas no lineales y problemas que involucran datos de alta dimensión.

Para mejorar la precisión de la detección de fugas, se deben usar muestras de entrenamiento y de prueba para optimizar el SVM. Debido a los efectos de los factores ambientales en las tuberías de agua soterrada, es necesario realizar señales de muestreo durante diferentes momentos y en diferentes lugares para compilar conjuntos de muestras que incluyen señales de fuga y señales de no fuga. Al principio, el conjunto de funciones de la muestra de entrenamiento se usa para realizar el entrenamiento de SVM, lo que crea un modelo de identificación preliminar. El conjunto de características de la muestra de prueba se usa luego para probar el modelo SVM entrenado. El modelo SVM se optimiza aún más en función de los resultados de las pruebas hasta que la precisión de la salida de la prueba cumpla con los requisitos, lo que da como resultado un modelo de identificación de fugas de tuberías SVM.

El análisis teórico del modelo de SVM indica que los principales factores que afectan su desempeño incluyen la función del núcleo γ y el factor de penalización. De acuerdo con las características y la capacidad del SVM, se toma el núcleo de base radial como la función kernel.

RENDIMIENTO DE LOS MÉTODOS DE DETECCIÓN DE RUPTURAS SÚBITAS

Para comprobar la efectividad de los algoritmos planteados se realizaron una serie de pruebas donde se utilizaron conjuntos de datos de señales de fuga y de no fuga, evaluándose la capacidad de cada uno en la detección de la ruptura súbita.

Con las RNA se logra clasificar correctamente la mayoría de las ventanas de tiempo, excepto una que pertenece a la Categoría N y fue clasificada como Categoría Ab-I, como se puede observar en la figura 5. Además, algunas otras ventanas de tiempo se clasificaron en la Categoría N, pero pertenecen a la Categoría Ab-I (lo que muestra un retraso en la capacidad de la RNA de detección de patrones para identificar la ocurrencia de una ruptura súbita), y dos ventanas de tiempo que pertenecen a la Categoría Ab-I se clasificaron en la Categoría Ab-C (no visible en el gráfico).

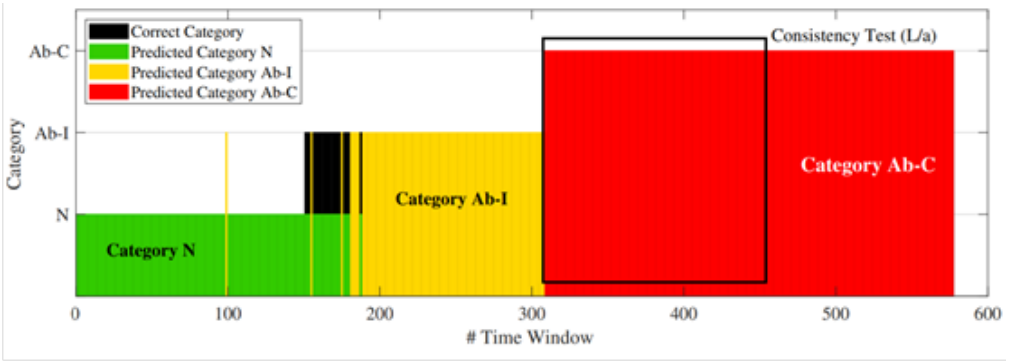

Figura 5. Clasificación de las ventanas de tiempo según la RNA (Bohorquez et al. 2021)

Las RNA de localización de rupturas súbitas brindan diferentes distribuciones de resultados, pero para los tres casos, la ubicación promedio pronosticada está dentro del 1,5 % de error. La predicción más cercana a la ubicación real de la ráfaga se obtuvo para la identificación de la tercera ráfaga RNA en la que se predijo la ubicación a solo 0,06 m de la ubicación real. De manera similar, la distribución en las predicciones del tamaño de la ruptura. Las tres RNA predijeron diferentes tamaños, lo que resultó en un error medio entre el 6 % y el 16 % del tamaño real. Aunque estos resultados son menos precisos que los resultados de ubicación, es importante señalar que el error medio más grande corresponde a un error absoluto de solo 0,32 mm. Además, el tiempo de cálculo necesario para obtener estos resultados fue de unos pocos segundos.

En el caso del modelo SVM su rendimiento está determinado por los parámetros C y γ. En (Liu et al. 2019) se extrajeron 50 conjuntos de datos de cada una de las señales de fuga y de no fuga y se usaron para crear un conjunto de entrenamiento. Las muestras restantes se usaron luego para crear un conjunto de prueba. Los parámetros SVM (C, γ) se establecieron en una potencia entera de dos; el rango de C se estableció como C ∈ [2−5, 215]; y el rango de γ se estableció como γ ∈ [2−15, 25]. Se usó el método de búsqueda en cuadrícula y se usaron 21 × 21 = 441 para combinaciones de (C, γ). La precisión de detección se muestra en la figura 6.

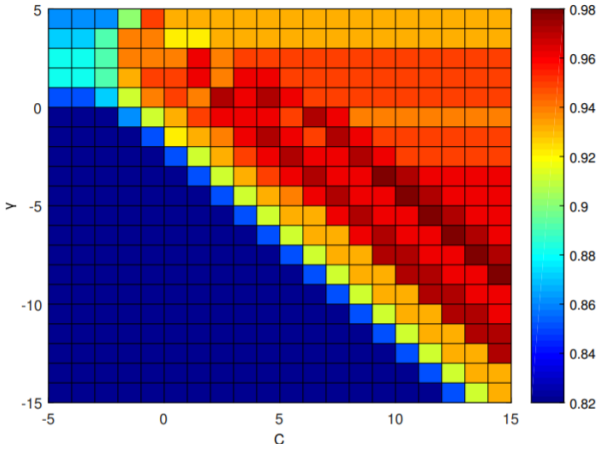

Figura 6. Precisión en la identificación bajo diferentes combinaciones de parámetros (C,γ) (Liu et al. 2019)

Los resultados indicaron que la mayor precisión de identificación lograda por el algoritmo propuesto fue del 98 %. Además, cuando se cumplen las condiciones mostradas en (1), el modelo SVM basado en el kernel de base radial proporciona un buen rendimiento de identificación de señal de fuga de tubería.

$$C \geq 2^2, \gamma \leq 2^0 \text{ y } 2^1 \leq C \times \gamma \leq 2^7 \qquad (1)$$

En (Alves Coelho et al. 2020) se analiza la eficiencia del árbol de decisión, cómo los datos que se ingresan en el algoritmo pueden afectar su precisión. Para esto, se crearon dos conjuntos dentro de los datos a analizar. Uno son los recopilados de acuerdo con la secuencia de sensores en el sistema, y el otro es donde se agruparon los datos para mostrar cómo funciona toda la ruta de las tuberías. Esto se hizo para comprender cuál de los conjuntos de datos presenta los mejores resultados para el escenario y el sistema previstos. Al crear el conjunto de datos, además de la marca de tiempo y los datos del sensor recopilados, se agregaron otras características a cada registro en función de los cálculos y los datos procesados previamente de los valores del sensor.

Para el escenario analizado anteriormente, se realizaron un total de 8 pruebas, cada una con diferentes parámetros, con el objetivo de entrenar el algoritmo y comprender bajo cuales circunstancias presenta la mejor precisión. La tabla 1 muestra todas las pruebas realizadas, identificando el conjunto de datos utilizado, el objetivo y las características no utilizadas

Tabla 1. Escenarios de prueba para obtener la efectividad del árbol de decisión en la detección de rupturas súbitas

Conjunto de datos	N° de Prueba	Características no usadas
Agrupados	1	Promedio de los últimos 5 valores para ese sensor, Diferencia con el sensor anterior, Diferencia del sensor 1
	2	Diferencia con el sensor anterior, Diferencia del sensor 1
	3	Diferencia del sensor 1
	4	_
Normal	5	Promedio de los últimos 5 valores para ese sensor, Diferencia con el sensor anterior, Diferencia del sensor 1
	6	Diferencia con el sensor anterior, Diferencia del sensor 1
	7	Diferencia del sensor 1
	8	_

La tabla 2 muestra los resultados de las pruebas realizadas donde la tendencia es que la precisión aumente con menos características no utilizadas

Tabla 2. Resultados de las pruebas de efectividad del árbol de decisión

Nro. de Prueba	1	2	3	4	5	6	7	8
Efectividad (%)	76,65	79,14	80,04	80,21	74,03	77,06	77,42	84,02

03 CONCLUSIONES

En los métodos basados en datos para la detección de rupturas súbitas en tuberías de agua no es necesario un conocimiento profundo del SDA, ya que estos solo implican análisis estadísticos o de procesamiento de señales de los datos adquiridos. Para SVM los resultados indicaron que la mayor precisión de identificación lograda por el algoritmo propuesto fue del 98 %. El árbol de decisión expuesto aumenta su precisión mientras más información del estado de la red tenga. Con la RNA se logra un error medio entre el 6 % y el 16 % del tamaño real, manteniendo el compromiso con el nivel de procesamiento.

04 REFERENCIAS

Alves Coelho J., Glória A. and Sebastião P. (2020). "Precise Water Leak Detection Using Machine Learning and Real-Time Sensor Data". IoT, 1(2), Article 2. ISSN 474-493.

Arredondo D. J., Gil W. J. y Mora J. J. (2017). "Metodología para la selección de atributos y condiciones operativas para la localización de fallas basada en la máquina de soporte vectorial". Tecnura, 21(51), 15-26. ISSN 0123-921.

Bohorquez J., Simpson A. R., Lamber, M. F. and Alexander B. (2021). "Merging Fluid Transient Waves and Artificial Neural Networks for Burst Detection and Identification in Pipelines". Journal of Water Resources Planning and Management, 147(1), 04020097. ISSN 1943-5452.

Hernández G. (2014). "Implementación numérica de redes neuronales artificiales para el análisis de grietas en placas". Tesis de Maestría, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, México D.F.

Huang P., Zhu N., Hou D., Chen J., Xiao Y., Yu J., Zhang G. and Zhang, H. (2018). "Real-Time Burst Detection in District Metering Areas in Water Distribution System Based on Patterns of Water Demand with Supervised Learning". Water, 10(12), Article 12. ISSN 2073-4441.

Liu Y., Ma X., Li Y., Tie Y., Zhang Y. and Gao J. (2019). "Water Pipeline Leakage Detection Based on Machine Learning and Wireless Sensor Networks". Sensors, 19(23), Article 23. ISSN 1424-8220.

Mounce S. R., Mounce R. B. and Boxall J. B. (2011). "Novelty detection for time series data analysis in water distribution systems using support vector machines". Journal of hydroinformatics, 13(4), 672-686. ISSN 1464-7141.

Rodríguez C. F., Montes E. M. y López R. R. (2021). "Generación de árboles de decisión usando un algoritmo inspirado en la Física". Tesis de Maestría en Computación Aplicada, Laboratorio Nacional de Informática Avanzada, México D.F.

Saravanan R. and Sujatha P. (2018). A State of Art Techniques on Machine Learning Algorithms: A Perspective of Supervised Learning Approaches in Data Classification. 2018 Second International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS), 945-949. ISBN 978-1-5386-2843-0.

Srirangarajan S., Allen M., Preis A., Iqbal M., Lim H. B. and Whittle A. J. (2013). "Wavelet-based Burst Event Detection and Localization in Water Distribution Systems". Journal of Signal Processing Systems, 72(1), 1-16. ISSN 1939-8115

Trutié-Carrero E., Valdés-Santiago D., León-Mecías Á. y Ramírez-Beltrán J. (2018). "Detección y Localización de Ruptura Súbita mediante Transformada Wavelet Discreta y Correlación Cruzada". Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, 15(2), Article 2. ISSN 1697-7912

Van Jaarsveldt C., Peters G. W., Ames M. and Chantler M. (2023). "Tutorial on Empirical Mode Decomposition: Basis Decomposition and Frequency Adaptive Graduation in Non-Stationary Time Series". IEEE Access. ISSN 2169-3536

Zaman D., Tiwari M. K., Gupta A. K. and Sen D. (2020). "A review of leakage detection strategies for pressurised pipeline in steady-state". Engineering Failure Analysis, 109, 104264. ISSN 1350-6307. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104264

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Jaime Ernesto Chiang Cruz https://orcid.org/0009-0001-4899-701X

Trabajó en el diseño de la investigación, búsqueda de información, comparación de algoritmos, interpretación de resultados, redacción y revisión del informe final

Iliover Vega González https://orcid.org/0000-0002-5811-994X

Participó en el diseño de la investigación, supervisión, experiencia, verificación de los resultados, revisión del informe final.

Jorge Ramírez Beltrán https://orcid.org/0000-0002-4125-2656

Participó en el diseño de la investigación, su conceptualización y metodología, supervisión, experiencia, verificación de los resultados, revisión del informe final.