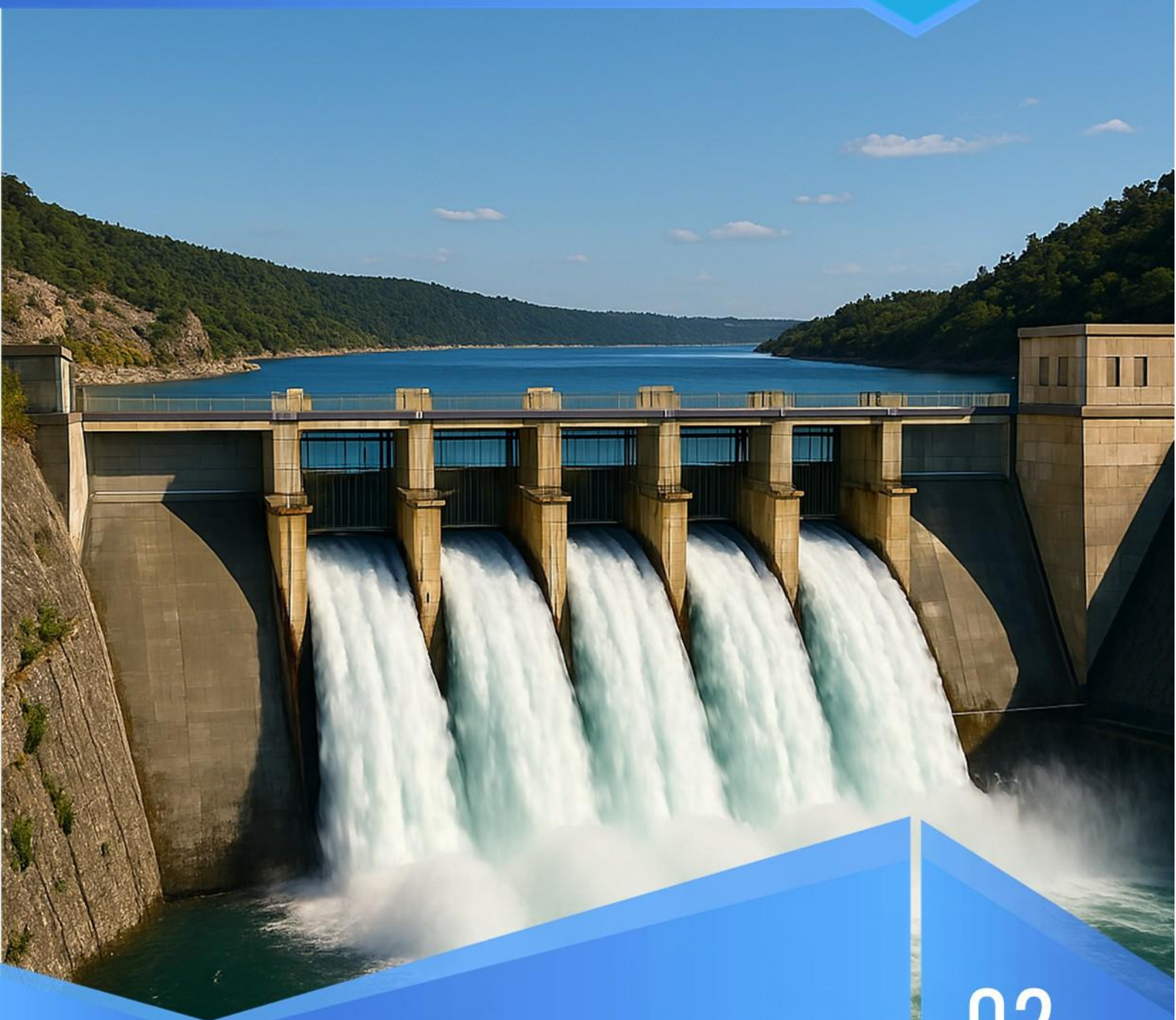


2025 | **INGENIERÍA**  
HIDRÁULICA Y AMBIENTAL



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

ISSN 2788-6050, RNPS 2066

02

XLVI

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. Luis Fermín Córdova López

## **Consejo Editorial**

Dra. Daniela Córdova de Horta (*Directora*)

Msc. Jaime Ernesto Chiang Cruz (*Secretario de la publicación*)

Dr. Yoermes González Haramboure

Dr. Rafael Pardo Gómez

Dr. Norberto Marrero De León

Dr. Alcides Juan Felipe León Méndez

Dr. José Bienvenido Martínez Rodríguez

## **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 Medioambiente (CITMA), Cuba*

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

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

Eduardo López Bastida, *Universidad de Cienfuegos, Cuba*

Javier Orccosupa, *Universidad Tecnológica del Perú, Perú*

Natividad Ramírez, *Universidad de Guanajuato, México*

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

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

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

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

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

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

|    |                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                               |                          |
|----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| 01 | <b>YANETH COROMOTO AZUAJE DE RODRÍGUEZ</b><br><b>LÁZARO OSVALDO RODRÍGUEZ MONTES DE OCA</b><br><b>DAYLON FUNDORA CABALLERO</b>                                                                                                     | <b>CARTOGRAFÍA CLIMÁTICA INTEGRADA PARA LA ADAPTACIÓN Y CONSERVACIÓN DEL GRAN HUMEDAL DEL NORTE DE CIEGO DE AVILA.</b>                                        | <b>3</b><br><b>16</b>    |
| 02 | <b>LUCIO FRAGOSO SANDOVAL</b><br><b>JAIME ROBERTO RUIZ Y ZURVIA FLORES</b>                                                                                                                                                         | <b>REDUCCIÓN DE LA SOCAVACIÓN LOCAL AL PIE DE UNA PILA DE PUENTES EN RÍOS</b>                                                                                 | <b>17</b><br><b>33</b>   |
| 03 | <b>ANTHONY RUIZ CHIPANA</b><br><b>MARCOS RUBEN GUTIÉRREZ RODRÍGUEZ</b><br><b>REYMUNDO JAULIS PALOMINO</b>                                                                                                                          | <b>EVALUACIÓN DE LA SOCAVACIÓN GENERAL Y LOCAL DEL PUENTE SALVADOR MEDIANTE LOS MÉTODOS LISCHTVAN – LEVEDIEV Y MELVILLE Y SUTHERLAND UTILIZANDO IBER 3.0.</b> | <b>34</b><br><b>52</b>   |
| 04 | <b>GABRIEL JESÚS MONTÚFAR CHIRIBOGA</b>                                                                                                                                                                                            | <b>REGULACIÓN DE RECURSOS NATURALES EN PROYECTOS DE INGENIERÍA CIVIL PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE</b>                                                        | <b>53</b><br><b>63</b>   |
| 05 | <b>YASET MARTÍNEZ VALDÉS</b><br><b>FÉLIX RIAÑO VALLE</b>                                                                                                                                                                           | <b>SIMULACIÓN HIDRÁULICA DE SISTEMAS FUENTES POR BOMBEO POR CAMPOS DE POZOS: 2DA PARTE</b>                                                                    | <b>64</b><br><b>79</b>   |
| 06 | <b>ANDRES MAURICIO JOYA DELGADO</b><br><b>ORLANDO CELSO LONGO</b><br><b>LUCIANE ALCOFORADO</b>                                                                                                                                     | <b>EFFECTOS SOCIALES, AMBIENTALES Y ECONÓMICOS EN LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA PEQUEÑA CENTRAL HIDROELÉCTRICA EN COLOMBIA</b>                                     | <b>80</b><br><b>108</b>  |
| 07 | <b>ALEX JHETLI ALVARADO MARGARIN</b><br><b>ELÍAS ANTONIO CORNELIO MILLA</b><br><b>CÉSAR ANTONIO ESPINOZA GÓMEZ</b><br><b>MAILYN ANTHONELA TORRES RISCO</b><br><b>URBANO TAPÍA CORSOBEL</b><br><b>MARGGIE NADIM VELASQUEZ RAMOS</b> | <b>EVALUANDO LA INFRAESTRUCTURA INDUSTRIAL PARA REDUCIR LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE EN CHIMBOTE 2025</b>                                                        | <b>109</b><br><b>119</b> |

## Cartografía climática integrada para la adaptación y conservación del Gran Humedal del Norte de Ciego de Ávila.

**Yaneth Coromoto Azuaje de Rodríguez**E-MAIL:  
yaneth.gal1984@gmail.com

Centro de Ingeniería Ambiental y Biodiversidad de Ciego de Ávila (CIBA-CA)

**Lázaro Osvaldo Rodríguez Montes de Oca**

Centro de Ingeniería Ambiental y Biodiversidad de Ciego de Ávila (CIBA-CA)

**Daylon Fundora Caballero**

Centro de Ingeniería Ambiental y Biodiversidad de Ciego de Ávila (CIBA-CA)

### RESUMEN

El Gran Humedal del Norte de Ciego de Ávila es un ecosistema estratégico por su biodiversidad, regulación hídrica y función como amortiguador ante fenómenos ambientales extremos. Este frágil entorno enfrenta crecientes amenazas debido al cambio climático, incluyendo sequías prolongadas, aumento de temperaturas, intrusión salina en acuíferos y alteración de los patrones de lluvia. Mediante datos georreferenciados, se establecen correlaciones entre fluctuaciones ambientales y la salud del humedal. La cartografía climática es una herramienta indispensable para abordar estos desafíos, permitiendo la visualización espacial y temporal de variables críticas como precipitación, temperatura, humedad, salinidad y dirección del viento. Integra datos satelitales, estaciones meteorológicas y modelos predictivos, contribuyendo a diseñar respuestas adaptativas. Su aplicación prioriza la protección de servicios ecosistémicos y garantiza la sostenibilidad a largo plazo de este patrimonio natural.

**PALABRAS CLAVES:** Cartografía climática, Adaptación, Humedal, Resiliencia, Cambio climático

Integrated Climate Mapping for the adaptation and conservation of the Gran Humedal Del Norte de Ciego de Ávila

### ABSTRACT

The Gran Humedal Del Norte de Ciego de Ávila is a strategic ecosystem due to its biodiversity, water regulation functions, and role as a buffer against extreme environmental events. This fragile environment faces increasing threats from climate change, including prolonged droughts, rising temperatures, saltwater intrusion into aquifers, and altered rainfall patterns. Through georeferenced data, correlations are established between environmental fluctuations and wetland health. Climate mapping is an indispensable tool to address these challenges, enabling the spatiotemporal visualization of critical variables such as precipitation, temperature, humidity, salinity, and wind direction. It integrates satellite data, meteorological stations and predictive models, contributing to design adaptive responses. Its application prioritizes the protection of ecosystem services and ensures the long-term sustainability of this natural heritage

**KEYWORDS:** Climate mapping, Adaptation, Wetland, Resilience, Climate change

## 01 INTRODUCCIÓN

El Gran Humedal del Norte de Ciego de Ávila (GHNCA), fue declarado sitio Ramsar de importancia Internacional (Nº1235) el 18 de noviembre del 2002 (Ramsar Convention Secretariat, 2002). Ubicado en la región septentrional de la provincia cubana de Ciego de Ávila, abarca 2,268.75 km<sup>2</sup>. Como humedal costero desempeña funciones ecológicas vitales reconocidas, como la regulación de inundaciones, la recarga de acuíferos, sostiene biodiversidad endémica (incluyendo aves migratorias y manglares), y provisión de recursos pesqueros. Internacionalmente (Ramsar Convention Secretariat, 2010).

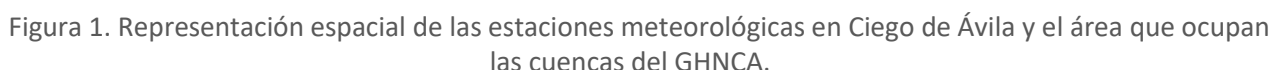
Los sistemas de humedales son vulnerables y particularmente susceptibles a cambios en la cantidad y calidad del suministro de agua. Parece que el cambio climático puede tener su efecto más pronunciado en los humedales a través de alteraciones en los regímenes hidrológicos: específicamente, la naturaleza y variabilidad del hidroperíodo y el número y severidad de eventos extremos, sequías, intrusión salina y ascenso del nivel del mar, (Erwin, 2009). Estas amenazas comprometen tanto su integridad ecológica como los medios de vida de comunidades locales dependientes de sus servicios ecosistémico para actividades agrícolas, pesqueras y turísticas.

Ante este escenario, la cartografía climática integrada constituye una herramienta multidisciplinaria fundamental. Combina datos satelitales, estaciones meteorológicas, modelos predictivos y conocimientos tradicionales para generar análisis espaciotemporales de algunas variables clave (precipitación, intrusión salina e intrusión de costa). Su aplicación permite diagnosticar vulnerabilidades y diseñar respuestas adaptativas basadas en evidencia. Además de garantizar la sostenibilidad del patrimonio natural, traduciendo los hallazgos cartográficos en planes de adaptación que aseguren la conservación del humedal y la viabilidad socioeconómica de las poblaciones vinculadas a él.

Los estudios hidroquímicos realizados hasta el momento en el Gran Humedal Norte de Ciego de Ávila relacionan los cambios de salinidad, que se basan en las precipitaciones para la zona, en las temporadas de seca y lluvia, con lo que se demuestra la influencia que tienen las precipitaciones sobre los niveles de salinidad entre bahía interior -zona inundable –acuífero. (Gonzales et al; 2008).

## 02 MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se desarrolló bajo un enfoque metodológico de análisis espacial integrado, combinando la recopilación, procesamiento y modelado de datos climáticos con técnicas de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Los datos climáticos de precipitación media anual y mensual corresponden a un período de 30 años (1991-2020) y 1961-2020). Estos fueron proporcionados por el Centro de Meteorológico de Provincial (CMP). El conjunto de datos incluyó información de 50 estaciones meteorológicas (figura 1), de ellas 12 pertenecen a la Red Informativa diaria y el resto a la Empresa de Aprovechamiento Hidráulicos de Ciego de Ávila (EAHCA), y garantizan una cobertura adecuada para el análisis espacial del área de estudio. Los mapas de intrusión salina de los suelos e intrusión de la costa en diferentes escenarios (2050; 2100) se realizaron con la información suministrada por el Centro de Meteorológico de Provincial (CMP) de Ciego de Ávila.



### 03 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La comparación cronológica de los mapas de isoyetas (Figuras 2 y 3) para los períodos 1961-2000 y 2001-2020 respectivamente, revela una alteración climática significativa en la región del Gran Humedal del Norte de Ciego de Ávila (GHNCA). Estos mapas son resultados de las Tablas 1 y 2 que muestran los análisis de precipitación en los mismos períodos de tiempo expuestos. El patrón espacial

histórico, donde las mayores precipitaciones (>1800 mm) se concentraban en las zonas elevadas de las cuencas de los ríos Chambas y Calvario (Figura 2), se ha visto drásticamente modificado.

Tabla 1. Ubicación geográfica de la Red Pluviométrica de Ciego de Ávila y sus valores de precipitación media entre en el período 1961-2000.

| Nº | Nombres        | Coordenadas X | Coordenadas Y | Altitud | Precipitación (mm) |
|----|----------------|---------------|---------------|---------|--------------------|
| 1  | La Troza       | 701532        | 224954        | 50      | 354,7              |
| 2  | Ramona         | 714700        | 272600        | 15      | 242,4              |
| 3  | Lola           | 714491        | 207717        | 12      | 434,2              |
| 4  | La Ignacia     | 717885        | 217853        | 33      | 378,8              |
| 5  | La Mariana     | 716500        | 211900        | 22      | 402,0              |
| 6  | Corrales No.3  | 722200        | 280200        | 14      | 212,9              |
| 7  | Dos Hermanas   | 722950        | 272800        | 19      | 245,1              |
| 8  | Batey Adelaida | 727208        | 262127        | 37      | 280,0              |
| 8  | T. Venezuela   | 727788        | 214611        | 24      | 363,6              |
| 10 | Hanoi Heroico  | 731800        | 270100        | 10      | 239,7              |
| 11 | Ceballos       | 733340        | 239179        | 5       | 305,4              |
| 12 | La Esperanza   | 732100        | 212300        | 14      | 358,1              |
| 13 | El Barro       | 735700        | 252100        | 40      | 258,3              |
| 14 | Estación Isaca | 738100        | 231100        | 40      | 300,8              |
| 15 | Bellamar       | 737300        | 216450        | 17      | 342,4              |
| 16 | Mijial         | 740400        | 248350        | 25      | 267,0              |
| 17 | Cacahual       | 744600        | 240950        | 25      | 246,3              |
| 18 | Los Ángeles    | 744100        | 236200        | 30      | 247,1              |
| 19 | Jagueyal       | 743150        | 225570        | 38      | 344,3              |
| 20 | Edden          | 749700        | 245700        | 14      | 233,6              |
| 21 | Colorado       | 746897        | 218409        | 18      | 348,6              |
| 22 | Batey Baraguá  | 745050        | 209150        | 5       | 378,9              |
| 23 | San Isidro     | 759850        | 219950        | 45      | 226,2              |
| 24 | La Victoria    | 767350        | 230500        | 29      | 309,5              |
| 25 | Fco. Roca      | 767950        | 253400        | 10      | 250,2              |

| Nº | Nombres              | Coordenadas X | Coordenadas Y | Altitud | Precipitación (mm) |
|----|----------------------|---------------|---------------|---------|--------------------|
| 26 | San Antonio          | 769600        | 244600        | 10      | 245,5              |
| 27 | Estación Violeta     | 764452        | 237000        | 23      | 223,0              |
| 28 | Santa Mariana        | 776650        | 248050        | 12      | 248,7              |
| 29 | La Rea               | 776950        | 240700        | 20      | 266,7              |
| 30 | Caimito              | 778717        | 230512        | 32      | 233,7              |
| 31 | La Ofelia            | 783300        | 226350        | 40      | 249,5              |
| 32 | Tele-Yarual          | 789051        | 249189        | 6       | 214,0              |
| 33 | La 30 de Manga Larga | 787500        | 241700        | 20      | 248,0              |
| 34 | Rev. Socialista      | 792550        | 222650        | 48      | 230,1              |
| 35 | Capellá              | 747382        | 202298        | 3       | 226,8              |
| 36 | Agrícola Pablo       | 766702        | 222919        | 35      | 282,8              |
| 37 | B. Comandancia       | 752937        | 272645        | 45      | 425,0              |
| 38 | El Salado            | 747253        | 270001        | 15      | 299,2              |
| 39 | Delia                | 756150        | 239600        | 15      | 244,8              |
| 40 | Campamento           | 724950        | 240400        | 110     | 238,7              |
| 41 | Cayo Guanál          | 755914        | 251869        | 5       | 243,2              |
| 42 | Guadalupe            | 710337        | 253400        | 110     | 319,8              |
| 43 | El Caobal            | 705050        | 256750        | 170     | 234,2              |
| 44 | Pozo Cabeza          | 718966        | 257395        | 130     | 253,6              |
| 45 | La Aguadita          | 727000        | 230250        | 68      | 259,3              |
| 46 | El Dátil             | 717850        | 230400        | 80      | 239,1              |
| 47 | Las Mercedes         | 711262        | 238002        | 140     | 364,2              |
| 48 | Santa Martha         | 759950        | 202600        | 45      | 355,0              |
| 49 | El Laurel            | 722900        | 248050        | 110     | 314,4              |
| 50 | Derramadero          | 704739        | 214722        | 25      | 410,6              |

**Fuente:** Empresa de Aprovechamiento Hidráulicos de Ciego de Avila (EAHCA).

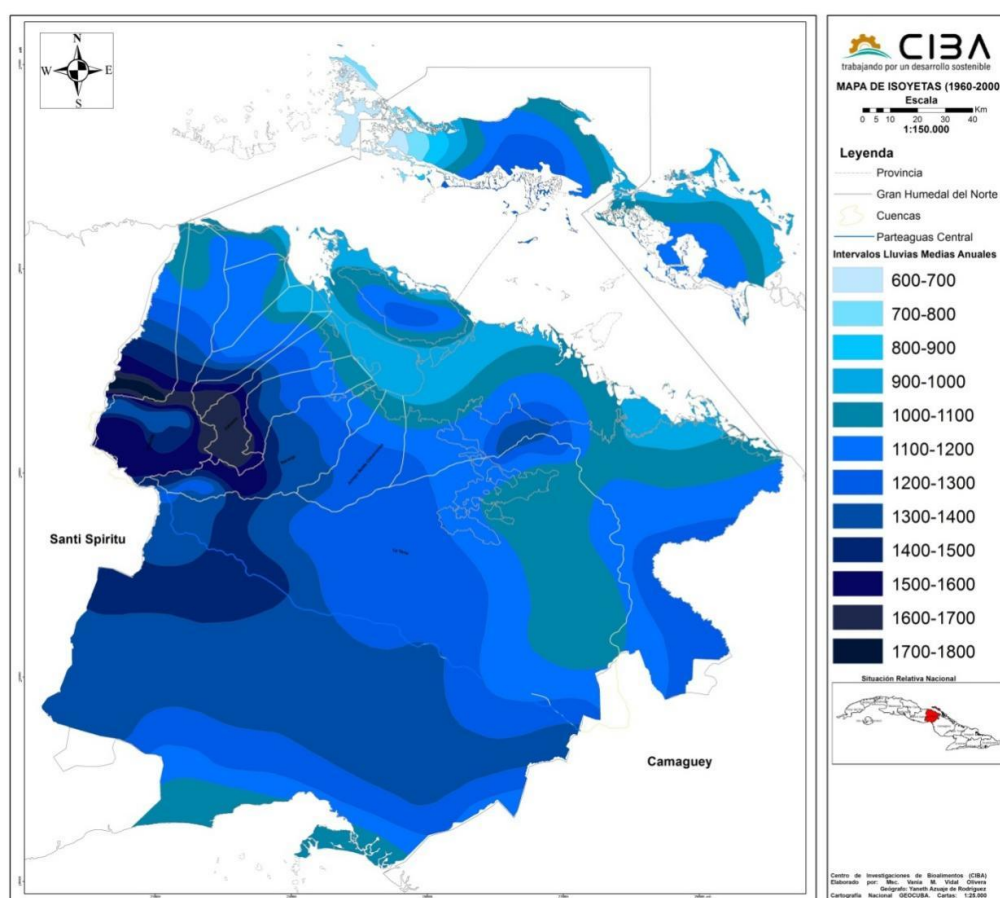


Figura 2. Mapa Isoyético Provincial del comportamiento de las lluvias medias anuales a cada 100mm del período 1961-2000.

El nuevo mapa evidencia una contracción conspicua de las isoyetas hacia el sur, con los máximos acumulados apenas alcanzando los 1500 mm en esas mismas áreas (Figura 3). Este fenómeno no es aislado y concuerda con las proyecciones de cambio climático para la región del Caribe, las cuales anticipan una mayor variabilidad e impredecibilidad en las lluvias, con tendencia a una generalizada reducción de la precipitación media, particularmente en las zonas costeras (IPCC, 2022).

La disminución pluviométrica, especialmente pronunciada en la franja costera norte (ej. estación Tele-Yarual: 214.0 mm), no solo implica un estrés hídrico directo para los ecosistemas del humedal, sino que actúa como un mecanismo amplificador de otras amenazas. La reducción en la recarga de acuíferos disminuye la presión hidrostática del agua dulce subterránea, facilitando la intrusión de la cuña salina, un proceso ya de por sí exacerbado por el ascenso del nivel del mar (Werner & Simmons, 2009).

Tabla 2. Ubicación geográfica de la Red Pluviométrica por los sectores hidrogeológicos del GHNCA y sus valores de precipitación media entre en el período 2001-2020.

| Nº de estaciones | Coordenadas X | Coordenadas Y | Precipitación media (mm) |
|------------------|---------------|---------------|--------------------------|
| CA-39            | 714700        | 272600        | 1118,2                   |

| Nº de estaciones | Coordenadas X | Coordenadas Y | Precipitación media (mm) |
|------------------|---------------|---------------|--------------------------|
| CA-42            | 713100        | 262300        | 1542,4                   |
| CA-57            | 722200        | 280200        | 1138,1                   |
| CA-60            | 722950        | 272800        | 937,1                    |
| CA-77            | 727208        | 262127        | 1378,3                   |
| CA-80            | 731800        | 270100        | 1235,2                   |
| CA-87            | 733340        | 239179        | 1328,3                   |
| CA-96            | 735700        | 252100        | 1378,6                   |
| CA-102           | 738100        | 231100        | 1302,8                   |
| CA-108           | 740400        | 248350        | 1403,5                   |
| CA-109           | 744600        | 240950        | 1224,2                   |
| CA-110           | 744100        | 236200        | 1407,1                   |
| CA-111           | 743150        | 225570        | 1360,1                   |
| CA-124           | 749700        | 245700        | 1131,6                   |
| CA-142           | 752200        | 247500        | 1147,1                   |
| CA-158           | 759850        | 219950        | 1170,1                   |
| CA-163           | 767350        | 230500        | 1221,5                   |
| CA-167           | 767950        | 253400        | 1197,8                   |
| CA-169           | 769600        | 244600        | 1219,3                   |
| CA-171           | 764452        | 237000        | 1170,0                   |
| CA-192           | 770150        | 231450        | 1177,7                   |
| CA-203           | 776650        | 248050        | 1183,1                   |
| CA-204           | 776950        | 240700        | 1308,2                   |
| CA-206           | 778717        | 230512        | 1187,6                   |
| CA-229           | 783300        | 226350        | 1248,9                   |
| CA-246           | 789051        | 249189        | 1020,4                   |
| CA-250           | 787500        | 241700        | 1168,7                   |
| CA-282           | 792550        | 222650        | 1236,9                   |

| Nº de estaciones | Coordenadas X | Coordenadas Y | Precipitación media (mm) |
|------------------|---------------|---------------|--------------------------|
| CA-568           | 766702        | 222919        | 1237,3                   |
| CA-583           | 752937        | 272645        | 1184,5                   |
| CA-584           | 747253        | 270001        | 1153,5                   |
| CA-636           | 756150        | 239600        | 1265,1                   |
| CA-639           | 724950        | 240400        | 1436,7                   |
| CA-644           | 755914        | 251869        | 1166,0                   |
| CA-673           | 710337        | 253400        | 1423,5                   |
| CA-676           | 705050        | 256750        | 1406,6                   |
| CA-679           | 718966        | 257395        | 1270,6                   |
| CA-722           | 727000        | 230250        | 1196,7                   |
| CA-725           | 717850        | 230400        | 1414,0                   |
| CA-756           | 722900        | 248050        | 1418,9                   |
| CA-787           | 733445        | 237919        | 1292,3                   |
| CA-791           | 776801        | 234969        | 1081,0                   |
| CA-792           | 765040        | 237871        | 1121,2                   |
| CA.808           | 736756        | 244706        | 1252,1                   |
| CA-842           | 728468        | 262146        | 1304,6                   |
| CA-843           | 715400        | 263700        | 1342,4                   |
| CA-848           | 744403        | 261835        | 1231,8                   |
| CA-849           | 768150        | 209950        | 1335,6                   |
| CA-853           | 761350        | 242000        | 1229,3                   |
| CA-858           | 714233        | 247301        | 1312,0                   |
| CA-863           | 758200        | 229400        | 1061,4                   |
| CA-866           | 781363        | 239788        | 974,2                    |
| CA-869           | 746779        | 252982        | 1243,6                   |
| CA-871           | 755938        | 300719        | 718,1                    |
| CA-873           | 772847        | 299777        | 722,9                    |

| Nº de estaciones | Coordenadas X | Coordenadas Y | Precipitación media (mm) |
|------------------|---------------|---------------|--------------------------|
| CA-874           | 764212        | 301596        | 936,4                    |
| CA-882           | 728400        | 245700        | 1305,6                   |
| CA-885           | 740580        | 308779        | 808,7                    |
| CA-886           | 712437        | 259088        | 1347,7                   |
| CA-887           | 709150        | 257050        | 1424,8                   |
| CA-888           | 712500        | 255850        | 1437,5                   |
| CA-889           | 784000        | 239100        | 1237,9                   |
| CA-890           | 714800        | 257100        | 1442,4                   |
| CA-892           | 757250        | 256700        | 1151,8                   |
| CA-893           | 721501        | 232991        | 1418,1                   |
| CA-894           | 733098        | 226594        | 1343,5                   |

**Fuente:** La Empresa de Aprovechamiento Hidráulicos de Ciego de Avila (EAHCA).

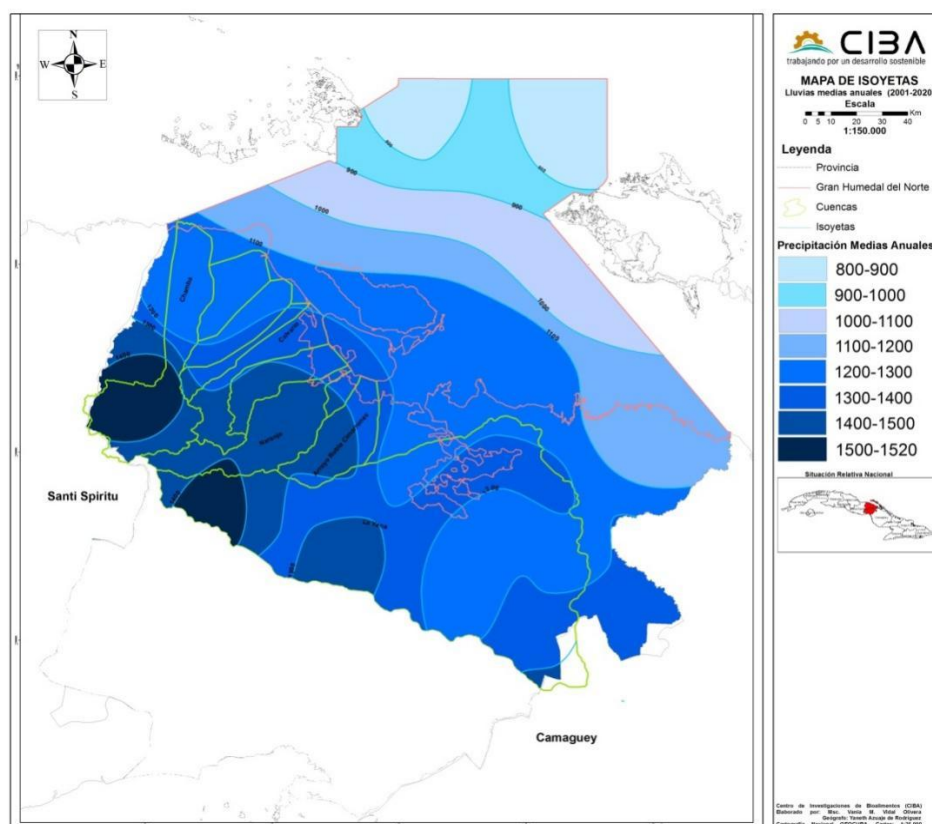


Figura 3. Mapa Isoyético Provincial del comportamiento de las lluvias medias anuales a cada 100mm del período 2001-2020.

El mapa de intrusión salina (Figura 4) y las proyecciones de ascenso del Nivel Medio del Mar (NMM) para 2050 (27 cm) y 2100 (85 cm) (Figura 5) deben interpretarse de forma sinérgica, ya que representan una amenaza combinada y catastrófica para la seguridad hídrica de la región.

El ascenso del NMM ejerce presión hidrostática sobre los acuíferos costeros, impulsando el avance tierra adentro del agua salada (Ferguson & Gleeson, 2012). Este proceso, conocido como intrusión salina, se ve potenciado de manera crítica por la disminución de la recarga de agua dulce proveniente de la precipitación, tal como se ha documentado en el análisis de isoyetas. El resultado es una degradación acelerada de los acuíferos, que son la principal fuente de agua para las comunidades locales (ej. municipios de Morón, Chabmas, Bolivia), así como para la agricultura (Figura 5).

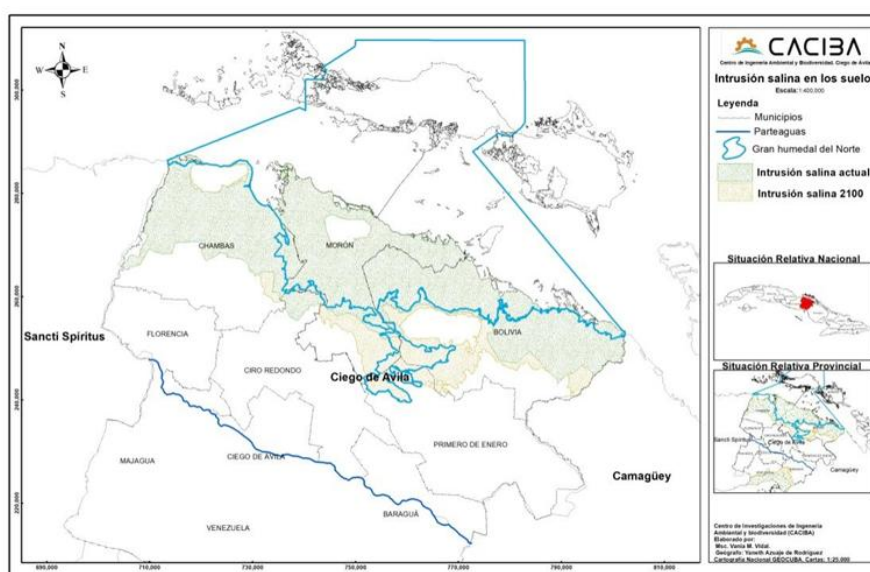


Figura 4. Mapa de intrusión salina actual y para el 2100 en los suelos del GHNCA.

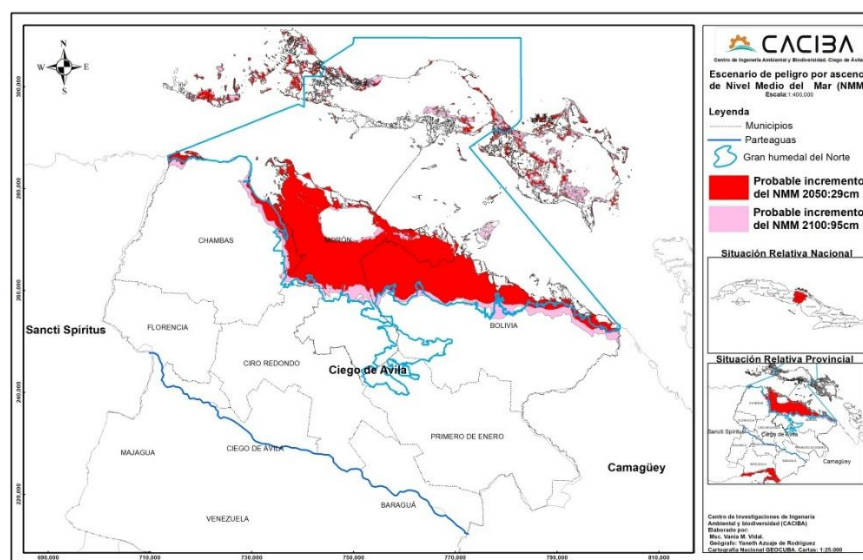


Figura 5. Mapa de peligro por ascenso del Nivel Medio del Mar para el GHNCA en escenarios 2050 y 2100.

Este escenario de "doble presión" (menos lluvia + mar más alto) ha sido observado en otros humedales costeros a nivel global. Por ejemplo, estudios en el Delta del Mekong en Vietnam (Erwin, 2009; Tran et al., 2021) y en los Everglades de Florida, EE.UU. (Pearlstone et al., 2010) demuestran cómo la interacción entre la extracción de agua subterránea, la reducción del flujo de agua dulce continental y el ascenso del nivel del mar conduce a una salinización rápida y extensa de suelos y acuíferos, comprometiendo la viabilidad de los ecosistemas y las economías locales.

## INTRUSIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA Y PÉRDIDA DE ECOSISTEMAS

El mapa de intrusión de la línea de costa (Figura 6) proyecta la pérdida física de territorio debido a la erosión costera acelerada por el ascenso del NMM y el posible aumento en la frecuencia e intensidad de eventos meteorológicos extremos. El retroceso de línea de costa no es solo un problema de espacio, sino de pérdida de servicios ecosistémicos críticos en áreas de extrema vulnerabilidad y especificidad.

Los ecosistemas costeros como los manglares y las praderas de pastos marinos, que caracterizan al GHNCA, son la primera línea de defensa contra la erosión y las inundaciones. Su inundación permanente o retroceso implica entre otras amenazas, pérdida de biodiversidad, reducción de la resiliencia costera y liberación de carbono.

El primer caso implica destrucción de hábitats de cría para peces, refugio para aves migratorias y residentes, y de una biodiversidad única adaptada a condiciones específicas de salinidad. En el caso de la reducción de la resiliencia costera, no existiría la barrera física y de amortiguamiento que proveen los manglares, por lo que el interior del humedal y las comunidades costeras se volverían más vulnerables a la energía del oleaje y a las marejadas asociadas a huracanes (McIvor et al., 2012). Por último, la consecuente liberación de carbono se explica debido a que los suelos de estos ecosistemas, especialmente las turberas en manglares, son sumideros de carbono altamente eficientes. Su inundación y degradación pueden conducir al incremento de la emisión de gases de efecto invernadero, creando un bucle de retroalimentación positiva con el cambio climático (Lovelock et al., 2017).

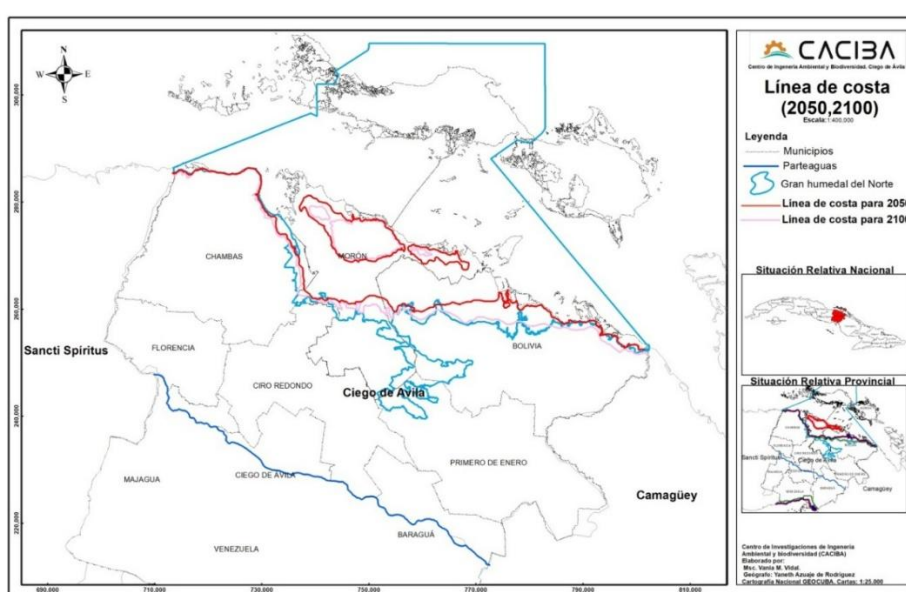


Fig. 6. Mapa de retroceso de línea de costa en el GHNCA para los escenarios 2050 y 2100

La situación documentada para el GHNCA es similar a la que ocurre en otros grandes deltas y humedales costeros del mundo, como el Sundarbans en India/Bangladesh (Rahman et al., 2011) y el ya mencionado Delta del Mekong, donde la combinación de subsidencia, ascenso del nivel del mar y alteraciones hidrológicas aguas arriba, está provocando una pérdida masiva de territorio y la salinización de vastas áreas productivas.

## 04 CONCLUSIONES

- La reducción de las precipitaciones, el ascenso del nivel del mar, la intrusión salina y la erosión costera son fenómenos que actúan en sinergia, acelerando la degradación de los ecosistemas.
- La cartografía climática no es solo una herramienta de diagnóstico, sino que representa la base fundamental para la planificación de la adaptación. La identificación espacialmente explícita de las zonas de máxima vulnerabilidad (áreas costeras bajas y acuíferos del norte) permite priorizar acciones de manera más efectiva.
- Las estrategias de adaptación deben ser multisectoriales e incluir, entre otras, la rehabilitación de manglares para la protección costera y el secuestro de carbono; la implementación de sistemas de monitoreo en tiempo real de la salinidad en acuíferos; el desarrollo de agricultura resiliente a la salinidad; y la planificación de reubicación estratégica de comunidades e infraestructuras críticas en las zonas de mayor riesgo de inundación permanente.
- La replicabilidad de esta metodología de análisis integrado la convierte en un modelo para la conservación de humedales tropicales costeros en toda la región del Caribe, que enfrentan presiones climáticas similares.

## 05 RECONOCIMIENTO

Se le agradece al Centro de Ingeniería Ambiental y Biodiversidad Ciego de Avila (CIBA\_CA) por permitirme realizar la investigación.

Agradecimientos a la Mcs. Vania M, Vidal Olivera por ser la persona que apoyo esta investigación, y quien estuvo en todo momento.

## 05 REFERENCIAS

- Erwin, K. L.** (2009). "Wetlands and global climate change: the role of wetland restoration in a changing world". *Wetlands Ecology and Management*, 17(1), 71-84. <https://doi.org/10.1007/s11273-008-9119-1>
- Ferguson, G., Gleeson, T.** (2012). "Vulnerability of coastal aquifers to groundwater use and climate change". *Nature Climate Change*, 2(5), 342–345. <https://doi.org/10.1038/nclimate1413>
- González, J., Menéndez, H; González, R., Fonseca, J., González, R; Vidal, Vania.** (2008). "Papel regulador de las zonas inundables del humedal en el intercambio salino subterráneo entre las bahías interiores-acuíferos en el Gran Humedal del Norte de Ciego de Ávila". Núm. 2, abril-junio, 2008, pp. 66-74. Centro de Información y Gestión Tecnológica de Santiago de Cuba Santiago de Cuba, Cuba.

- IPCC** (2022). "Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change". Cambridge University Press.
- Lovelock, C. E., Cahoon, D. R., Friess, D. A., Guntenspergen, G. R., Krauss, K. W., Reef, R., Saintilan, N.** (2017). "The vulnerability of Indo-Pacific mangrove forests to sea-level rise". *Nature*, 526 (7574), 559-563. <https://doi.org/10.1038/nature15538>
- McIvor, A. L., Möller, I., Spencer, T., Spalding, M.** (2012). "Reduction of wind and swell waves by mangroves". *Nature Communications*, 3 (1), 1-6. <https://doi.org/10.1038/ncomms2340>
- Pearlstine, L. G., Mazzotti, F. J., & Brandt, L. A.** (2010). "Implications of climate change and sea level rise for Everglades restoration". *Journal of Coastal Research*, 26 (5), 814-825. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-09-00008.1>
- Rahman, M. M., Rahman, S., Islam, K. S.** (2011). "The response of mangrove forest to the climate change: A review". *Indian Journal of Science and Technology*, 4(11), 1492-1496.
- Ramsar** (2007). "El manejo de las aguas subterráneas: Lineamientos para el manejo de las aguas subterráneas a fin de mantener las características ecológicas de los humedales". *Manuales Ramsar para el uso racional de los humedales*, 3ª edición, vol. 9. Secretaría de la Convención de Ramsar, Gland (Suiza).
- Tran, D. A., Tsujimura, M., Pham, H. V., Nguyen, T. M. H., & Le, T. S.** (2021). "Understanding the role of groundwater in a changing climate: A case study in the Mekong Delta, Vietnam". *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 36, 100858. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100858>
- Vidal V. M., González-Abreu R., Jiménez Y., Valdés A. L., Castro M., y Rodríguez D.,** (2015). "Vulnerabilidad a la contaminación del acuífero norte de la provincia Ciego de Ávila". *Revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental*. Vol. XXXVI, N° 2, pp 45-56. CIH. ISJAE. La Habana, Cuba.
- Werner, A. D., Simmons, C. T.** (2009). "Impact of sea-level rise on sea water intrusion in coastal aquifers". *Groundwater*, 47 (2), 197-204. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2008.00535.x>

#### Conflicto de intereses

El autor declara que no existen conflictos de intereses.

#### Contribución de los autores

**Yaneth Coromoto Azuaje de Rodríguez** <https://orcid.org/0009-0007-2040-6891>

Realizó la mayor parte de la interpretación de los datos. Participó en el diseño de la investigación, análisis de los resultados, mapificación y redacción del informe final.

**Lázaro O. Rodríguez Montes de Oca** <https://orcid.org/0009-0007-8456-627>

Contribuyó al análisis estadístico e interpretación de los datos. Participó en la búsqueda de información y en la redacción del informe final.

[Daylon Fundora Caballero](https://orcid.org/0000-0003-0386-3453) <https://orcid.org/0000-0003-0386-3453>

Participó en la búsqueda de información. Trabajó en la revisión de la redacción y en la organización de los datos. Participó en la redacción del informe final.

## Reducción de la socavación local al pie de una pila de puentes en ríos

**Lucio Fragoso Sandoval**

E-MAIL: luciofragosos@gmail.com

Sección de Estudios de Posgrado e investigación. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura. Unidad Adolfo López Mateos. Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México

**Jaime Roberto Ruiz y Zurvia**

E-MAIL: jaruizz@ipn.mx

Sección de Estudios de Posgrado e investigación. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura. Unidad Adolfo López Mateos. Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México

### RESUMEN

Se describe un proyecto cuyo objetivo fue reducir experimentalmente la socavación local al pie de pilas de puentes en ríos, a través de adicionarle a la pila una transición en forma de V, al frente de la pila, se probaron tres diferentes ángulos en el vértice de la "V". Para obtener dicho objetivo, se diseñó, construyó, calibró y operó un modelo físico de una pila circular en un canal de arrastre de arenas y se determinó la geometría que redujo significativamente la socavación al pie de la pila, misma que requirió de otra transición también en V de 40°, aguas abajo de ésta. Con los resultados del proyecto se redujo la profundidad de socavación máxima que causa al pie de una pila una avenida hasta en un 93%.

**PALABRAS CLAVES:** Pilas de puentes, profundidad de socavación local, reducción, transiciones en V.

### Local scouring reduction at foot of a bridges pile in rivers

### ABSTRACT

A project is described, whose objective was experimentally to reduce local scour at the foot of a bridge's piles in rivers, by adding a V shaped transition to the pile. Three different angles were tested at the vertex of the "V", at front of the pile. To obtain this objective, a physical model of a circular pile in a sand drag channel was designed, built, calibrated and operated and the geometry that significantly reduced the scour at the foot of the pile was experimentally determined, which required another transition also in V of 40°, downstream of the pile. With the results of the project, the maximum scour depth caused by a flood at the foot of a pile was reduced until to 93%.

**KEYWORDS:** Bridges piles, local scouring depth, reduction, V transitions.

## 01 INTRODUCCIÓN

Para asegurar la estabilidad de los puentes que interactúan con ríos, el ingeniero civil tiene una gran tarea ante sí; tanto en la ubicación conveniente del puente, como en el cálculo de las profundidades de socavación producidas al pie de las pilas.

Puede afirmarse que la mayoría de colapsos en puentes que cruzan cauces fluviales de lechos formados generalmente por material no cohesivo, son provocados por la socavación local en sus pilas o estribos, que al paso de una avenida pierden apoyo y se asientan provocando la falla de la estructura, (Ettema et al, 2004, Melville and Coleman, 2000 y Fragoso et al, 2023).

Es primordial determinar con precisión la magnitud de socavación máxima al pie de pilas, o bien, obtener cómo reducir significativamente ésta, ya que de ello dependerá la posibilidad de reducir sus efectos y construir puentes más estables, y económicos. Por lo que considerando los buenos resultados que se tuvo para reducir la socavación local al pie de estribos verticales y cortos de puentes utilizando una transición en V, con un ángulo en su vértice de  $20^\circ$ , al frente del estribo, (Fragoso et al, 2023), se decidió realizar este proyecto, para probar los efectos que se tienen al poner una transición en V aguas arriba de la pila y colocando una segunda transición de  $40^\circ$  en su vértice, aguas abajo de la misma, en la socavación local que genera un cierto flujo al pie de dicha pila.

En México, no se tienen estadísticas precisas de fallas en puentes, pero el aumento de casos hace necesario obtener una forma de reducir significativamente la socavación local al pie de pilas de puentes, mediante dos transiciones en V que, al integrarlas a la pila, aumente la seguridad de dichas estructuras al reducir significativamente la socavación máxima que genera un cierto flujo.

Este proyecto se realizó en el Laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Zacatenco, del Instituto Politécnico Nacional, en un canal de arenas. En este se construyó y estudió el modelo físico reducido de una pila y transiciones en V, en el que se han considerado y probado los parámetros de tirante, velocidad, profundidad máxima de socavación y gasto.

El objetivo central fue reducir la socavación local al pie de pilas de puentes, usando dos transiciones en "V", una al frente y otra atrás de la pila; y el objetivo específico fue obtener experimentalmente la geometría de las transiciones que reducen significativamente la socavación máxima local al pie de éstas.

La hipótesis de partida del presente, es que a través del estudio en modelo físico reducido de una pila circular de puente en un río, realizado en un canal con fondo de arena gruesa, al que se somete a diferentes condiciones de flujo y probando cambios en la geometría de las transiciones en V, una aguas arriba de la pila, con ángulos en su vértice de  $40^\circ$ ,  $30^\circ$  y  $20^\circ$ ; y una segunda transición con un ángulo en su vértice de  $40^\circ$  aguas abajo de la pila, se reduce significativamente la profundidad de socavación local al pie de la pila.

Con los resultados de este proyecto de investigación, se reduce la profundidad de socavación máxima al pie de una pila circular, hasta en un 93 %, al instalarle a la pila circular las transiciones en V, una al frente con un ángulo de  $20^\circ$  en su vértice y otra atrás de la misma, con un ángulo de  $40^\circ$  en su vértice.

## 02 ANTECEDENTES

### SOCAVACIÓN LOCAL EN PILAS DE PUENTES

La socavación que se desarrolla al pie de una pila de puente se le denomina socavación local y esta se debe a que cerca de la pila se presentan velocidades locales mayores a la velocidad media de la corriente y a la velocidad crítica o de inicio de movimiento de los sedimentos del lecho del cauce, las velocidades al interactuar con la pila generan vórtices frontales, laterales (de herradura) y de estela detrás de la pila, este sistema de vórtices producen la socavación, ver figura 1, Richarson y Davis (1995).

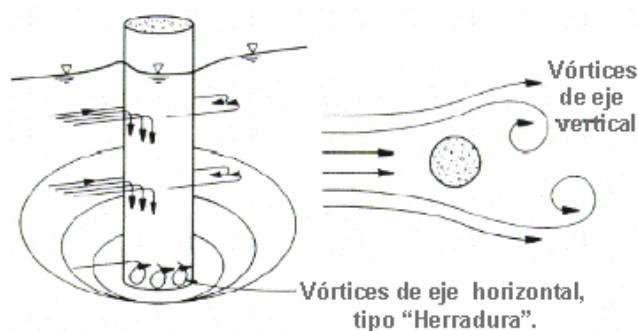


Figura 1. Vórtices alrededor de una pila circular. Richarson y Davis (1995).

Para estudiar el fenómeno de socavación en pilas de puente es necesario tener presente a las variables que interactúan en éste. Se ha probado que la profundidad máxima de socavación es función de los siguientes factores (Melville y Coleman, 2000), (Richarson y Davis, 1995) y publicado por Guevara (2016):

- Densidad del agua ( $\rho$ )
- Velocidad de aproximación del flujo ( $V$ )
- Tirante o profundidad del flujo ( $Y$ )
- Diámetro medio de los sedimentos ( $D$ )
- Diámetro de la pila o ancho efectivo de la pila ( $B$ )
- Aceleración de la gravedad ( $g$ )
- Viscosidad cinemática del flujo ( $\nu$ )
- Peso específico del material del lecho ( $\gamma_s$ )
- Forma de la pila ( $K_f$ )
- Alineación de la pila con la dirección del flujo

La profundidad de socavación al pie de la pila depende del tipo de transporte de sedimentos que se tenga, ya sea de agua clara o de lecho vivo y es el parámetro de ( $V/V_c$ ) el que da la diferencia, donde  $V_c$  es la velocidad crítica o de inicio de movimiento del sedimento.

Una de las fórmulas más utilizada en Estados Unidos para calcular la profundidad de socavación máxima es la de Richarson y Davis (1995), ecuación 1.

$$e = 2.0k_1k_2B_0^{0.65}y_1^{0.35}Fr_1^{0.42} \quad (1)$$

**Donde:** e: erosión máxima (m),  $B_0$ : ancho o diámetro de la pila,  $k_1$ : constante de forma de la pila,  $k_2$ : constante de ángulo de ataque,  $y_1$ : tirante o profundidad del flujo,  $Fr_1$ : Número de Froude del flujo aguas arriba.

#### PARÁMETROS CONSIDERADOS EN EL ESTUDIO

- Velocidad del flujo de aproximación.
- Tirante o profundidad.
- Dimensiones de la pila.
- Tamaño, granulometría y peso específico del material del fondo.
- Gasto.
- Número de Froude del flujo (F).
- Tiempo de duración de los ensayos.

#### METODOLOGÍA

La metodología considerada en este proyecto fue integrada por las siguientes actividades:

1. Recopilación y análisis bibliográfico sobre socavación local al pie de pilas de puentes en ríos.
2. Preparación del canal de arrastre de arena del Laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la ESIA Unidad Zacatenco (LIHESIAZ).
3. Diseño y construcción del modelo de la pila y de sus transiciones en V.
4. Instrumentación, calibración del modelo y diseño del programa de ensayos.
5. Desarrollo de los ensayos en cinco series, las 4 primeras con tiempo de duración de 30 minutos y la última (5ª serie), con un tiempo de 60 minutos.

Serie 1.-Pila original

Serie 2.-Pila con transición en V al frente con un ángulo interior de 40°

Serie 3.-Pila con transición al frente con ángulo interior de 30° y otra transición atrás con ángulo de 40°

Serie 4.-Pila con transición al frente con un ángulo interior de 20° y otra atrás con ángulo de 40°.

Serie 5.-Igual que serie 4, pero con un tiempo de duración de 60 minutos.

6. Procesamiento y análisis de resultados.
7. Formulación de conclusiones y recomendaciones del estudio
8. Redacción y elaboración de reporte final.

### 03 DESARROLLO

#### EQUIPO E INSTRUMENTACIÓN

La etapa experimental del presente trabajo de investigación, se realizó en las instalaciones del Laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Zacatenco (ESIA-UZ), del Instituto Politécnico Nacional. La instalación en la que se construyó el modelo es el canal de arenas (ver figura 2), de sección rectangular, de fondo plano, de 16.50 m de largo, 2.00 m de ancho y 0.60 m de profundidad.

El suministro del agua al canal es a través de dos tuberías, una de 8" y otra de 6" de diámetro, controladas con válvulas de compuerta de igual diámetro y alimentada desde el tanque elevado de carga constante, que a su vez se le suministra de agua a través, de dos bombas, una de 30 HP y otra de 20 HP; desde la cisterna de almacenamiento, ubicada abajo de dicho tanque. El rango del gasto de operación y disponible es de:  $Q_{\text{máx}} = 131.32$  lps y  $Q_{\text{min}} = 51.42$  lps. Este rango de gasto cubre con las necesidades para proporcionar las velocidades requeridas en la experimentación programada.



Figura 2. Canal de arenas del Laboratorio de Hidráulica.

#### INSTRUMENTOS PARA MEDIR LA PROFUNDIDAD DE SOCAVACIÓN

Las mediciones de la profundidad del foso de socavación, se efectuaron utilizando un limnómetro de punta móvil, ver figura 3.

#### INSTRUMENTOS PARA MEDIR EL GASTO

El gasto se midió con un vertedor de pared delgada tipo Rehbock, de 2 m de largo y 0.20 m de carga máxima, cubriendo el rango de gastos requeridos. El vertedor se colocó en el extremo final del canal de arenas. La carga sobre el vertedor se midió con un limnómetro de gancho, con una aproximación de  $\pm 0.1$  mm, instalado dentro del canal de arenas a 2 m, aguas arriba del vertedor, ver figura 4.

### INSTRUMENTOS PARA MEDIR EL TIRANTE

El tirante también se midió con el limnómetro de gancho, descrito en el párrafo anterior, mismo que está colocado en la pared izquierda del canal, ver figura 4.



Figura 3. Limnómetro móvil, para medir la profundidad de socavación.



Figura 4. Limnómetro de gancho.

### INSTRUMENTOS PARA MEDIR LA VELOCIDAD

Para medir la velocidad, se utilizó un velocímetro electrónico digital de mini hélice de 1 cm de diámetro.

## MODELO FÍSICO HIDRÁULICO

### ESCALA DEL MODELO

Generalmente la selección de la escala de líneas, se hace en forma independiente, buscando que el modelo resulte lo más grande posible (Vergara, 1993), siempre y cuando lo permita el presupuesto, el espacio, el tiempo, la instrumentación, las rugosidades a reproducir, así como la alimentación de agua. En la selección de la escala es recomendable tomar en consideración que, durante la operación del modelo, el efecto de escala sea lo más reducido posible.

El efecto de escala se puede definir como la diferencia resultante entre las condiciones del modelo y las del prototipo, causadas por la imposibilidad práctica de lograr que actúen simultáneamente todas las fuerzas del prototipo en el modelo.

Por lo anterior y, teniendo en cuenta proyectos previos realizados, se seleccionó la escala de longitudes,  $E_L$ , de 1:20, para la construcción del modelo, que está dentro del rango de escalas recomendadas, (Vergara, 1993); para este tipo de estudios en modelos sin distorsión.

Ahora bien, como la socavación al pie de pilas es un fenómeno de flujo a superficie libre, las fuerzas que predominan en él son: las fuerzas de inercia y de gravedad, por lo que otras escalas se obtuvieron aplicando el Criterio de Similitud de Froude, resultando las siguientes escalas requeridas en el estudio:

$$E_L = 20 ; E_V = 4,472 ; E_T = 4,472 \text{ y } E_Q = 1778,85$$

Mismas que son la escala de líneas, de velocidades, de tiempos y de gastos; respectivamente.

### CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

La geometría y dimensiones de la pila, que, en sí, consistieron propiamente el modelo, corresponden a una tubería de PVC hidráulico, de sección circular de 16.8 cm de diámetro (Fragoso et al, 2017). Esta dimensión se eligió en función del ancho del canal, considerando, de manera conservadora, que es la mayor permisible para evitar efectos de escala y fenómenos perturbadores ocasionados por el rebote de las estelas del agua en la pared del canal. Ver figura 5.

En el caso de la construcción de las transiciones en “V” en madera tratada, sus dimensiones estuvieron en función del ángulo interior de éstas y del diámetro de la pila, ver figura 6.



Figura 5. Modelo hidráulico de la pila.

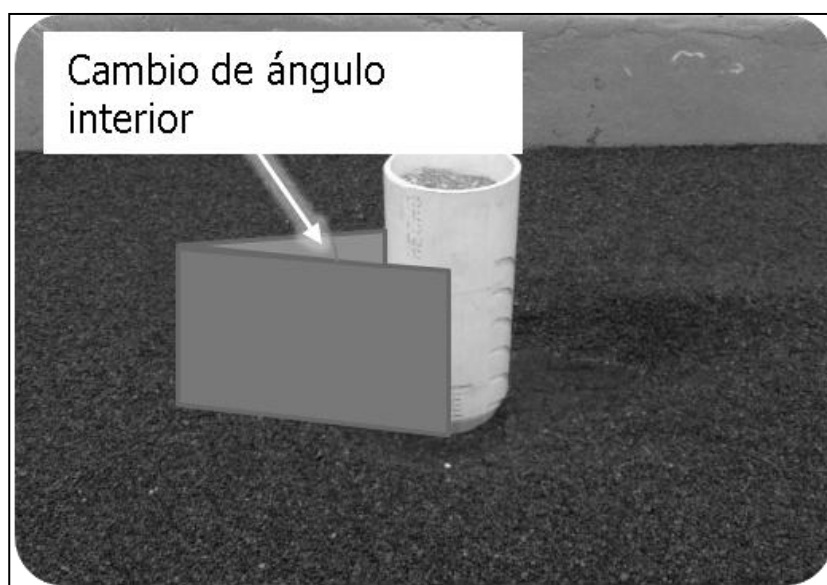


Figura 6. Modelo de la pila con la transición propuesta.

**Determinación de la granulometría del material del fondo:** la granulometría del material seleccionado para representar el fondo erosionable, se determinó mediante un análisis mecánico.

Los diámetros característicos obtenidos son:

- $D_{90} = 4,190 \text{ mm}$
- $D_{70} = 2,896 \text{ mm}$
- $D_{50} = 2,120 \text{ mm}$

Su peso específico relativo seco es de:

- $\gamma' = 1,302$

**Determinación de la velocidad crítica o de inicio de movimiento del material del fondo:** la velocidad crítica o de inicio de movimiento del material del fondo, se obtuvo experimentalmente en un canal de pendiente variable, resultando una velocidad de inicio de movimiento de 0,28 m/s.

### **CALIBRACIÓN DEL MODELO**

Esta consistió en verificar que el equipo de bombeo y la instalación en que se estudió el modelo, estuviese en condiciones de proporcionar el flujo de agua requerido para los ensayos, en un rango de gastos comprendido entre 51,42 a 135,5 l/s y además el tiempo de duración de los ensayos, de 30 minutos, se tomó de un estudio anterior, que se realizó en la misma instalación y en general muy similar a éste, Fragoso et al (2023), de forma tal, que se pudiera determinar la profundidad de socavación máxima al pie de la pila, solo con “lecho vivo” (con velocidades medias mayores a la velocidad crítica), en el modelo.

Primero se efectuó la calibración de las dos válvulas, con las que se controlaba la alimentación de agua al modelo, de 6” y 8” de diámetro, y se verificó que el vertedor rectangular, de pared delgada, tipo Rehbock, previamente calibrado en el laboratorio cumpliera con la ecuación 2.

$$Q = 1,85(H)^{3/2} \quad (2)$$

### **PROGRAMA DE ENSAYOS**

Una cuestión importante es la del número total de ensayos. Es evidente de que cuantas más pruebas adecuadas se realicen, mayor es la precisión de las conclusiones a que se lleguen y de las leyes matemáticas que se obtengan. Así que se eligió un número que fuera representativo utilizando al máximo los recursos disponibles.

Se efectuarán 10 ensayos por serie; con duración de 30 minutos cada ensayo para las series 1 a 4 y la serie 5 sus 10 ensayos tuvieron una duración de 60 minutos, todos en un modelo de fondo plano y lecho vivo. Como ya se mencionó anteriormente, los ensayos se realizaron en 5 series, resultando un total de 50 ensayos.

### **METODOLOGÍA DE LOS ENSAYOS**

La metodología para llevar a cabo los ensayos de laboratorio, está basada en las siguientes dos consideraciones: i) todos los ensayos se efectuaron en condiciones de lecho vivo; ii) con el fin de tener un rango aceptable de valores del número de Froude, se estableció un mínimo de diez tirantes y diez gastos por serie, estos se fueron incrementando gradualmente (Fragoso et al 2017).

Por lo que la metodología para el desarrollo de cada uno de los ensayos está integrada por las siguientes actividades:

- a) Nivelar con auxilio de un escantillón y una regla metálica, la zona de lecho móvil.
- b) Colocar y asegurar la verticalidad, en el centro de la zona de arena (lecho móvil), la pila modelo.
- c) Cerrar completamente la válvula de desfogue y poner en funcionamiento las bombas de 20 y 30 HP.

- d) Después de 5 minutos, se establece el gasto del ensayo abriendo las válvulas de alimentación y se procede a establecer el tirante del ensayo lo más rápido posible, manipulando la válvula de desfogue.
- e) Al llegar al nivel del tirante del ensayo, inicia la cuenta del tiempo de duración del ensayo (30 minutos series 1 a 4 y de 60 minutos para ensayos de la serie 5).
- f) Durante la duración del ensayo, se efectúan lecturas del tirante de ensayo a 5, 15 y 25 minutos, impresión de placas fotográficas y/o toma de vídeo, mantener el gasto y tirante constantes, y tomar nota de las observaciones de importancia.
- g) Al finalizar el tiempo de ensayo: cerrar rápido la válvula de desfogue e, inmediatamente después cerrar las válvulas de alimentación y parar el funcionamiento del equipo de bombeo.
- h) Vaciar lentamente el canal, evitando el movimiento del material del lecho, mediante el manejo de la válvula de desfogue.
- i) Esperar 30 minutos al menos después de vaciar el canal, con el fin de que los encharcamientos que puedan quedar se vacíen y la zona de experimentación quede libre de agua.
- j) Una vez completamente libre de agua la zona de experimentación, se procede a efectuar la medición de la profundidad del foso de socavación con el limnómetro de punta viajero.

## ENSAYOS

**Primera serie.** Se realizaron 10 ensayos con una pila circular, ver tabla 1 y figuras 7 y 10. Esta serie de ensayos se efectuaron con el objeto de conocer la magnitud de la socavación máxima al pie de la pila, al variar el flujo (tirante, velocidad y Número de Froude). Presentando profundidades de socavación desde 0.66 m hasta 2.70 m en prototipo, ver tabla 1 y figura 10; cuyos valores son muy altos, por lo que en la segunda serie se probó la pila con una transición en V al frente con 40° en su vértice, para reducir dicha socavación.

Tabla 1. Ensayos con pila circular original.

| No. Ensayo | Tirante del flujo (d) m | Velocidad media (V) m/s | Número de Fr del flujo | Profundidad socavación (ds) m |
|------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------------|
| 1          | 2.42                    | 1.61                    | 0.36                   | 0.66                          |
| 2          | 2.52                    | 1.92                    | 0.39                   | 0.72                          |
| 3          | 2.76                    | 2.15                    | 0.41                   | 0.80                          |
| 4          | 3.08                    | 2.53                    | 0.46                   | 1.38                          |
| 5          | 3.20                    | 2.68                    | 0.48                   | 1.60                          |
| 6          | 3.30                    | 2.86                    | 0.505                  | 1.80                          |
| 7          | 3.44                    | 2.95                    | 0.51                   | 1.96                          |

| No. Ensayo | Tirante del flujo (d) m | Velocidad media (V) m/s | Número de Fr del flujo | Profundidad socavación (ds) m |
|------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------------|
| 8          | 3.50                    | 3.04                    | 0.52                   | 2.50                          |
| 9          | 3.52                    | 3.13                    | 0.53                   | 2.60                          |
| 10         | 3.56                    | 3.22                    | 0.54                   | 2.70                          |

**Segunda serie.** En ésta, se realizaron otros 10 ensayos con la pila circular con una transición en V con un ángulo de  $40^\circ$  en su vértice, al frente de la pila. Presentando una socavación de 0.40 a 2.90 m. De lo cual se puede observar, que para velocidades igual o menores a 2.95 m/s, si se reduce la socavación que generó la pila original, pero para velocidades mayores a dicho valor la socavación se incrementó. Lo cual pudo ser debido, a que se requería también de otra transición en V, aguas abajo de la pila. Ver tabla 2 y figuras 8 y 10.



Figura 7. Vista de la pila circular original después de un ensayo.

**Tercera serie.** En ésta, se realizaron otros 10 ensayos con la pila circular, pero con una transición en V al frente de la pila con un ángulo de  $30^\circ$  en su vértice y otra transición en V aguas abajo con  $40^\circ$  en su vértice. Generando una reducción en la socavación máxima promedio, de un 57 %, pues presentó profundidades de socavación de 0.34 a 1.48 m, en prototipo. Ver tabla 3 y figura 10.

Tabla 2. Ensayos con pila circular con transición en V, al frente a  $40^\circ$  en su vértice

| No. Ensayo | Tirante del flujo "d" en m | Velocidad media "V" m/s | Número de Fr del flujo | Profundidad socavación "ds" en m |
|------------|----------------------------|-------------------------|------------------------|----------------------------------|
| 1          | 2.40                       | 1.61                    | 0.33                   | 0.40                             |
| 2          | 2.50                       | 2.01                    | 0.40                   | 0.50                             |
| 3          | 2.76                       | 2.37                    | 0.45                   | 0.60                             |

| No. Ensayo | Tirante del flujo "d" en m | Velocidad media "V" m/s | Número de Fr del flujo | Profundidad socavación "ds" en m |
|------------|----------------------------|-------------------------|------------------------|----------------------------------|
| 4          | 2.90                       | 2.64                    | 0.49                   | 1.10                             |
| 5          | 3.20                       | 2.86                    | 0.50                   | 1.40                             |
| 6          | 3.30                       | 2.95                    | 0.51                   | 1.90                             |
| 7          | 3.36                       | 3.00                    | 0.52                   | 2.40                             |
| 8          | 3.40                       | 3.04                    | 0.53                   | 2.64                             |
| 9          | 3.42                       | 3.09                    | 0.53                   | 2.82                             |
| 10         | 3.44                       | 3.13                    | 0.54                   | 2.90                             |

**Cuarta serie:** En ésta se realizaron otros 10 ensayos con la pila y con una transición en V al frente con  $20^\circ$  en su vértice y otra transición en V atrás con  $40^\circ$  en su vértice. Presentando una reducción en la socavación máxima promedio de un 93 %, con respecto a la presentada por la pila original, en la etapa uno, pues presentó socavaciones de 0.1 a 0.22 m en prototipo. Ver tabla 4 y figura 10.



Figura 8. Antes y después de la realización de un ensayo de la segunda serie, pila con transición en V al frente con ángulo de  $40^\circ$  en su vértice.

Tabla 3. Ensayos con pila circular con transición en V al frente con  $30^\circ$  y otra atrás de  $40^\circ$ .

| No. Ensayo | Tirante del flujo "d" en m | Velocidad media "V" m/s | Número de Fr del flujo | Profundidad socavación "ds" en m |
|------------|----------------------------|-------------------------|------------------------|----------------------------------|
| 1          | 2.40                       | 1.65                    | 0.3410                 | 0.34                             |
| 2          | 2.50                       | 1.74                    | 0.3522                 | 0.364                            |
| 3          | 2.76                       | 2.10                    | 0.4039                 | 0.38                             |

| No. Ensayo | Tirante del flujo "d" en m | Velocidad media "V" m/s | Número de Fr del flujo | Profundidad socavación "ds" en m |
|------------|----------------------------|-------------------------|------------------------|----------------------------------|
| 4          | 2.98                       | 2.41                    | 0.4466                 | 0.43                             |
| 5          | 3.16                       | 2.77                    | 0.4980                 | 0.46                             |
| 6          | 3.28                       | 2.95                    | 0.5203                 | 0.74                             |
| 7          | 3.40                       | 3.13                    | 0.5420                 | 0.92                             |
| 8          | 3.48                       | 3.31                    | 0.5664                 | 1.14                             |
| 9          | 3.50                       | 3.35                    | 0.5724                 | 1.30                             |
| 10         | 3.52                       | 3.40                    | 0.5784                 | 1.48                             |

Tabla 4. Ensayos con pila circular con transición en V al frente con 20° y otra atrás de 40°.

| No. Ensayo | Tirante del flujo "d" en m | Velocidad media "V" m/s | Número de Fr del flujo | Profundidad socavación "ds" en m |
|------------|----------------------------|-------------------------|------------------------|----------------------------------|
| 1          | 2.40                       | 1.65                    | 0.3410                 | 0.10                             |
| 2          | 2.50                       | 1.74                    | 0.3522                 | 0.12                             |
| 3          | 2.66                       | 2.10                    | 0.4039                 | 0.14                             |
| 4          | 2.98                       | 2.42                    | 0.4466                 | 0.15                             |
| 5          | 3.16                       | 2.77                    | 0.4980                 | 0.16                             |
| 6          | 3.28                       | 2.95                    | 0.5203                 | 0.17                             |
| 7          | 3.40                       | 3.13                    | 0.5420                 | 0.18                             |
| 8          | 3.48                       | 3.31                    | 0.5664                 | 0.20                             |
| 9          | 3.50                       | 3.35                    | 0.5724                 | 0.21                             |
| 10         | 3.60                       | 3.40                    | 0.5784                 | 0.22                             |

**Quinta serie.** En esta etapa se realizaron otros 10 ensayos con la pila y con una transición en V al frente con un ángulo de 20° en su vértice y otra atrás con 40° en su vértice, la misma estructura de la etapa anterior, pero en esta serie se ensayó con un tiempo de duración de 60 minutos, con el objetivo de ver si se había alcanzado ya la profundidad de equilibrio o no. Presentando aún una significativa reducción en la socavación máxima en promedio de un 80 %, con respecto a la presentada por la pila original, en la serie uno, pues presentó socavaciones de 0.18 a 0.52 m en prototipo y de qué aún no se había alcanzado la profundidad de equilibrio. Ver tabla 5 y figuras 9 y 10.



Figura 9. Vista de la pila con transición en V de 20° al frente y otra de 40° atrás de ésta, en pleno ensayo y después del mismo.

Tabla 5. Ensayos con pila circular con transición en V al frente con 20° y otra transición atrás de 40°; y tiempo de duración de ensayos de 60 minutos.

| No. Ensayo | Tirante del flujo "d" en m | Velocidad media "V" m/s | Número de Fr del flujo | Profundidad socavación "ds" en cm |
|------------|----------------------------|-------------------------|------------------------|-----------------------------------|
| 1          | 0.48                       | 1.65                    | 0.3410                 | 0.18                              |
| 2          | 0.50                       | 1.74                    | 0.3522                 | 0.25                              |
| 3          | 0.552                      | 2.10                    | 0.4039                 | 0.30                              |
| 4          | 0.596                      | 2.41                    | 0.4466                 | 0.33                              |
| 5          | 0.632                      | 2.7                     | 0.4980                 | 0.38                              |
| 6          | 0.652                      | 2.95                    | 0.5203                 | 0.40                              |
| 7          | 0.68                       | 3.13                    | 0.5420                 | 0.50                              |
| 8          | 0.696                      | 3.31                    | 0.5664                 | 0.51                              |
| 9          | 0.70                       | 3.35                    | 0.5724                 | 0.51                              |
| 10         | 0.74                       | 3.40                    | 0.5784                 | 0.52                              |

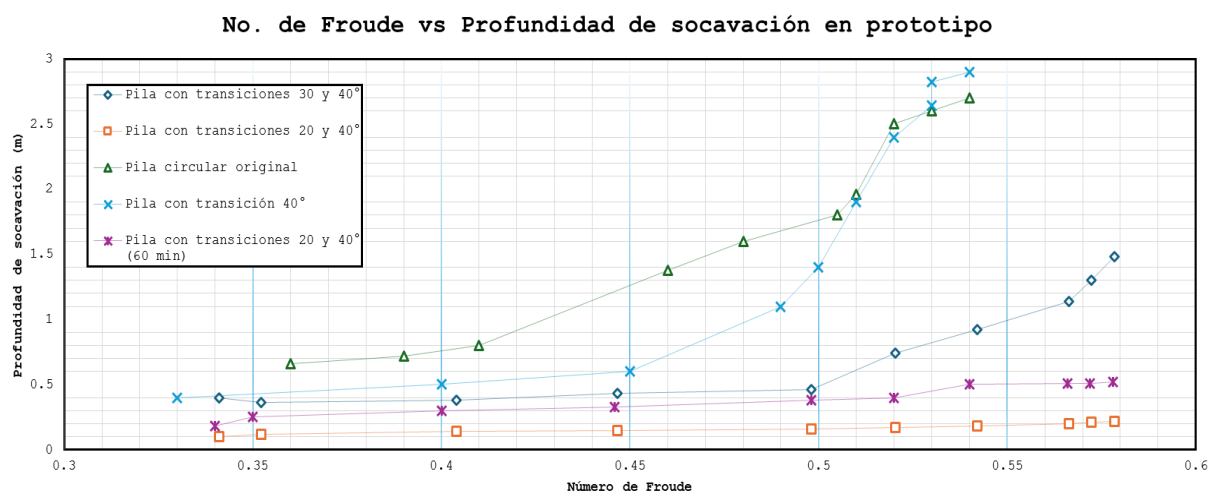


Figura 10. Gráficas de la profundidad de socavación Vs. Número de Froude del flujo, en prototipo.

## 04 RESULTADOS

### REDUCCIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE SOCAVACIÓN.

Los resultados obtenidos, en este proyecto fueron altamente satisfactorios, pues en la serie de ensayos uno, con la pila circular original, la socavación máxima al variar el flujo (velocidad, gasto, Número de Froude, tirante), presentó socavaciones (de 0.60 a 2.70 m en prototipo), ver tabla 1 y figuras 7 y 10.

En la segunda serie de ensayos se probó la misma pila, pero con una transición en V al frente, con un ángulo en su vértice de  $40^\circ$ , la socavación obtenida resultó (de 0.4 a 2.90 m en prototipo). De lo cual se pudo observar, que en velocidades menores a 2.95 m/s, si reduce la socavación que presentó la pila original, pero con velocidades mayores, la profundidad de socavación resultó mayor a las generadas por la pila original. Ver tablas 1 y 2 y figuras 8 y 10. Es decir la pila requería de otra transición aguas abajo, para reducir la socavación.

En la serie de ensayos tres, con pila original con una transición en V, al frente con un ángulo de  $30^\circ$  en su vértice y otra transición en V, atrás con un ángulo de  $40^\circ$  en su vértice, la socavación máxima que produjo la pila original se reduce aproximadamente en promedio a un 57 %, pues presentó socavaciones de 0.34 a 1.48 m en prototipo (ver tablas 1 y 3; y figura 10).

En la serie de ensayos cuatro, con pila original con una transición en V al frente, con un ángulo de  $20^\circ$  en su vértice y otra transición en V, atrás con un ángulo de  $40^\circ$  en su vértice, la socavación máxima obtenida se reduce en promedio en un 93 %, con respecto a la que generó la pila original (serie uno), pues presentó socavaciones (de 0.10 a 0.22 m en prototipo), ver tabla 1 y 4 y figura 10.

En la serie de ensayos cinco, con la misma estructura de la etapa anterior, pero incrementando el tiempo de duración de los ensayos de 30 a 60 minutos, la profundidad de socavación máxima obtenida con la pila original (serie 1), aún se reduce en promedio en un 80 %, pues presentó socavaciones (de 0.18 a 0.52 m en prototipo), ver tablas 1 y 5; y figuras 9 y 10.

## 05 CONCLUSIONES

- Con la pila original con transición en V, al frente con un ángulo de  $40^\circ$  en su vértice, se reduce la profundidad de socavación máxima que presento la serie 1 hasta con una velocidad menor o igual a 2.95 m/s ( $Fr = 0.51$ ), con velocidades mayores se incrementa la profundidad de socavación. Lo que indicaba que requería de otra transición aguas abajo, ver tablas 1 y 2 y figuras 8 y 10.
- Con la pila original con una transición en V, al frente con un ángulo de  $30^\circ$  en su vértice y otra transición en V aguas abajo, con un ángulo de  $40^\circ$  en su vértice, la profundidad de socavación máxima que presentó la serie 1, se reduce en promedio a un 57 %, ver tablas 1 y 3 y figura 10.
- Con la pila original con una transición en V al frente, con un ángulo de  $20^\circ$  y otra transición en V, aguas abajo con un ángulo de  $40^\circ$  en su vértice, la profundidad de socavación máxima obtenida en la serie 1, se reduce en un 93 %, (ver tablas 1 y 4 y figura 10). Es decir, se cumple la hipótesis de partida.

- Con la pila original con una transición en V al frente con un ángulo de  $20^\circ$  en su vértice y otra transición aguas abajo en V, con un ángulo de  $40^\circ$  en su vértice, con un tiempo de duración de 60 minutos, se demostró que no se alcanzó la profundidad de socavación de equilibrio en 30 minutos; y se obtuvieron valores de profundidades de socavación máximas moderadas en prototipo (de 0,18 m a 0,52 m) con Números de Froude del flujo, de 0,34 a 0,58; y velocidades medias desde 1,65 m/s a 3,40 m/s, ver tabla 5 y figuras 9 y 10.

## 06 REFERENCIAS

- Ettema R., Yoon B., Nakato T. and Muste M.; (2004).** "A review of scour condition and scour estimation difficulties for bridge abutments". KSCE Journal of Civil Engineering, vol. 8 no. 6, pp 643-650, ISSN 1976-3808.
- Fragoso S. L., Ruiz y Z. F. J. y Rosales F. G. V.; (2023);** "Reducción de la socavación local al pie de estribos cortos y verticales de puentes"; Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Vol XLIV No. 2, pp. 72-84, ISSN 2788-6050, Centro de Investigaciones Hidráulicas, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE), Cuba.
- Fragoso S. L., Ruiz y Z. F. J. R., Vigueras, M. L. P., Silva R. I. y Teoyotl F. J. C.; (2017).** "Socavación al pie de pilas de puentes en ríos". Reporte final de investigación, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Zacatenco, Número de registro 20171535, Secretaría de Investigación y Posgrado, del Instituto Politécnico Nacional de México.
- Guevara A. M. E. (2016);** "Socavación en puentes. Teoría y Práctica". Facultad de Ingeniería, Lemoine Editores, Universidad del Cauca, Pp. 155-160, ISBN 978-958-590-354-8. Popayán, Colombia.
- Melville, B.W. and Coleman, S.E., (2000).** "Bridge Scour", USA/Canada; Water Resources Publications, LLC. Pp. 193-209, ISBN 1887-201-18-1. Highland Ranch, Colorado, USA.
- Richarson E. U. and Davis S. R. (1995).** "Evaluating scour at bridges". Federal Highway Administration. Hydraulic Engineering. Circular No. 18 (HEC-18), Washington, USA, 1995.
- Vergara S. M. A.; (1993).** "Técnicas de Modelación en Hidráulica"; Editorial Alfa Omega, pp. 163 y 164; ISBN 968-6223-76-2. Ciudad de México, México.

### Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses

### Contribución de los autores

Lucio Frago Sandoval

<https://orcid.org/0009-0005-5092-9066>

Realizó la dirección del proyecto de investigación, participó en el análisis de resultados, en la redacción del informe final, y en la formulación de las conclusiones.

Jaime Roberto Ruiz y Zurvia Flores

<https://orcid.org/0009-0005-0676-4858>

Participó en la planeación y desarrollo de la investigación, en el procesamiento de datos haciendo contribuciones en su análisis e interpretación y en la redacción final.

## Evaluación de la socavación general y local del puente Salvador mediante los métodos Lischtván – Levediev y Melville y Sutherland utilizando Iber 3.0.

**ANTHONY RUIZ CHIPANA**

EMAIL: anthonyruiz@upeu.edu.pe

Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruana Unión. Lima-Perú

**MARCOS RUBEN GUTIÉRREZ RODRÍGUEZ**

EMAIL: marcosgr94@outlook.com

Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruana Unión. Lima-Perú

**REYMUENDO JAULIS PALOMINO**

EMAIL: reymundojaulis@upeu.edu.pe

Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruana Unión. Lima-Perú

### RESUMEN

El estudio tuvo como objetivo determinar la influencia de la socavación general del puente y la socavación local de un pilar del puente afectado por un fluido. Para efectuar el estudio, se utilizaron imágenes satelitales AsterDem V3, de tamaño de celda de  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  con un intervalo de 1 arcosegundo (30 m). Se elaboró el enmallado en Iber considerando que en los pilares sería de 0.50 m, en el río sería de 1.00 m y en los márgenes del río de 2.00 m, obteniendo datos de velocidad de aproximación, número de Froude y tirante. Se aplicaron los métodos de Lischtván-Levediev y Melville y Sutherland, obteniendo valores para la socavación general de 0.00 m y socavación local de 11.736 m en ambos pilares, respectivamente.

**PALABRAS**

Socavación general, Socavación local, Velocidad de aproximación, Tirante.

**CLAVES:**

Evaluation of the general and local scour of the Salvador Bridge by the Lischtván - Levediev and Melville and Sutherland methods using Iber 3.0

### ABSTRACT

The objective of the study was to determine the influence of the general scour of the bridge and the local scour of a bridge abutment affected by a fluid. To carry out the study, AsterDem V3 satellite images of  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  cell size with an interval of 1 arc-second (30 m, discarding zeros with a 20-year data (MTC, 2016)). The netting in Iber was elaborated considering that in pillars it would be 0.50, in the river it would be 1m and in the river banks 2 m, obtaining data of approach velocity, Froude number, and scour. The Lischtván - Levediev and Melville and Sutherland methods were applied, obtaining values for the general scour of 0.00 m. and local scour of 11.736 m. in both pillars, respectively.

**KEYWORDS**

:

General scour, Local scour, Approach velocity, Tie rod

## 01 INTRODUCCIÓN

La socavación es un proceso natural causado por la erosión del agua en los cauces de ríos y canales. La socavación local implica la eliminación de sedimentos alrededor de elementos estructurales en el flujo del agua, lo que resulta en la disminución del nivel del lecho del río debido a la acción erosiva. Con el tiempo, esta erosión puede exponer las bases de los puentes. A medida que la socavación progresa, puede debilitar los cimientos de la estructura, lo que eventualmente puede llevar a su colapso. (Khawairakpam & Mazumdar, 2009)

Generalmente, la socavación es un proceso de larga duración, por lo que se producen fallos catastróficos en el puente. Según la estadística mundial, alrededor del 80 % de los fallos de los puentes se deben a la socavación (Ju, 2013). Por lo tanto, la estimación de la socavación alrededor de un pilar de puente es una práctica importante en la ingeniería.

Los tres mecanismos principales de la socavación local son: el aumento de las velocidades medias del flujo y de los gradientes de presión en las proximidades de la estructura, la creación de flujos secundarios en forma de vórtices y el aumento de la turbulencia en el campo de flujo local (Mehaladevi & Venkatesh, 2020). La socavación local se divide en dos regímenes de socavación diferentes que dependen de las condiciones del flujo y de los sedimentos aguas arriba de la estructura. La socavación en aguas claras se refiere a la socavación local que tiene lugar en condiciones en las que el sedimento no está en movimiento en un lecho plano, aguas arriba de la estructura. Si el sedimento aguas arriba de la estructura está en movimiento, la socavación local se denomina socavación de lecho vivo (Martín-Vi de et al., 2019).

Varias investigaciones han optado por estudios experimentales y estudios numéricos para comprender el mecanismo de la socavación, patrones y métodos para medir la profundidad de la socavación, considerando diferentes parámetros. La mayoría de los estudios se centran en la socavación local alrededor de un muelle o de grupos de muelles (Malik et al., 2021). También se dispone de algunas investigaciones que estudian el mecanismo de socavación y la profundidad alrededor del puente, muelle y estribos (Malik et al., 2021). Los datos necesarios para las investigaciones numéricas suelen obtenerse de estudios experimentales y de campo. Varios investigadores han utilizado diferentes herramientas de modelado como HEC-RAS, IBER, SSIIM y RANS (Bressan et al., 2011) para simular el patrón de socavación y calcular la profundidad de socavación. La estimación precisa de la profundidad de la socavación y la simulación del proceso de socavación son muy difíciles en un modelo a escala de laboratorio debido a la complejidad del fenómeno de la socavación y del campo de flujo (Perez et al., 2020).

En el presente estudio, se utilizó la herramienta computacional IBER para predecir la profundidad de socavación general y local del puente Salvador mediante los métodos Lischtván – Levediev y Melville y Sutherland utilizando Iber 3.0.

## 02 MATERIALES Y MÉTODOS

Para calcular la socavación general y local del puente Salvador mediante los métodos Lischtván – Levediev y Melville y Sutherland, se utilizaron distintos materiales como imágenes satelitales, registros pluviométricos y la metodología para el análisis estadístico que se describe en el manual de hidrología, hidráulica y drenaje del MTC, manuales MODIPE, suelos FAO e imágenes NDVI.

### ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca de la zona de estudio sobre el río Huallaga se ubica en la parte central de Perú, entre los departamentos de Pasco y Huánuco (ver figura 1), la cual abarca dos regiones geográficas, con alturas que van desde los 551.27 m.s.n.m. hasta los 5686 m.s.n.m. en la zona de la cordillera de los Andes. Cuenta con una superficie de 14,467.427 km<sup>2</sup>. Se ubica en las coordenadas 8° 55' 14.102" S y 76° 7' 18.815" O. La precipitación promedio aerea es de 94.54 mm, con climas que van desde fríos en las zonas altas hasta tropicales en la mayor parte de la cuenca.

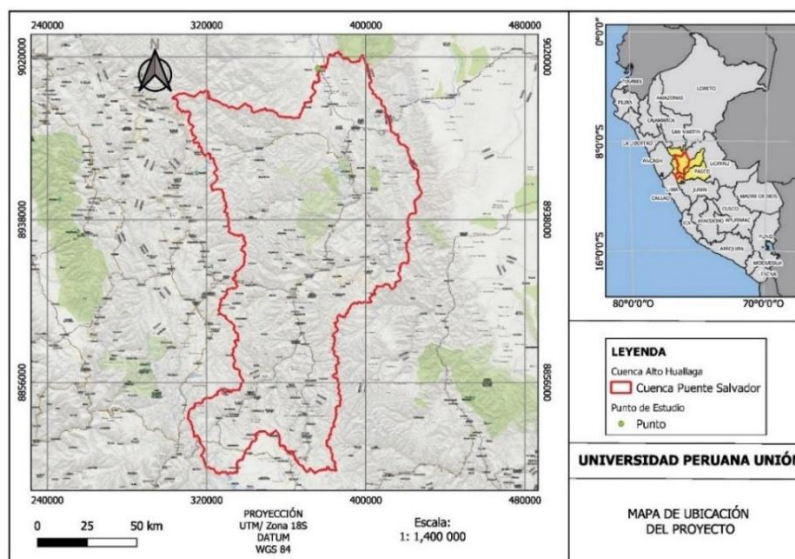


Figura 1. Plano de ubicación cuenca de estudio, región Pasco y Huánuco

## CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS E HIDRÁULICAS DEL PUENTE

Consiste en un puente continuo de 3 tramos, con una viga cajón de concreto postensado apoyada sobre 2 pilares intermedios de concreto armado y sobre estribos en ambos márgenes del río.

El puente tiene una longitud total de 300 m (una luz central de 160 m y tramos laterales de 70 m). El ancho del tablero es de 12.60 m y está distribuido en: calzada de 6.60 m, berma de 1.20 m, barrera tipo New Jersey de 0.40 m, ancho de vereda de 1.20 m y baranda de 0.20 m en cada vía.

Los estribos izquierdo y derecho son de concreto armado tipo cajón, y los pilares centrales también son de concreto armado, conformados por 2 columnas paralelas de 1.40 m de ancho con una separación de 1.60 m.

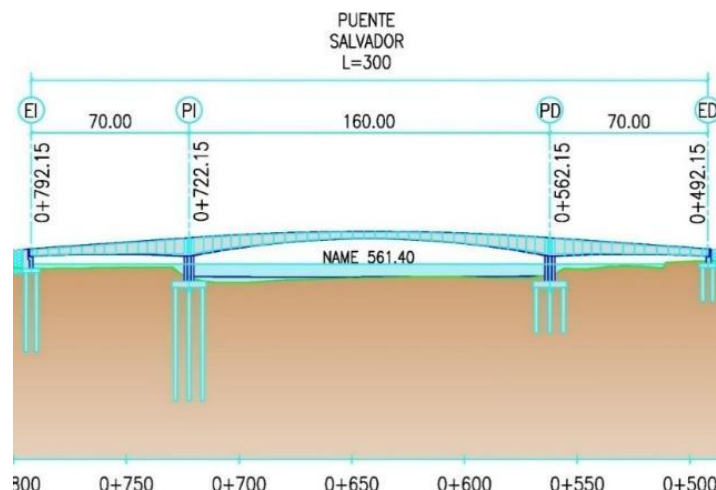


Figura 2. Características geométricas del puente Salvador Fuente: Consorcio HYC/MAB.



| Profundidad |          | Descripción Petrográfica                                                                                                                                                                                                                                                              |
|-------------|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Desde(m)    | Hasta(m) |                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|             |          | arena de grano medio a fino, que contienen raíces y fragmentos de materia orgánica. No se observan pátinas de oxidación.<br>Clasificación: ML                                                                                                                                         |
| 0.50        | 1.00     | Limo algo arenoso, de color marrón grisáceo a gris, húmedo, ligeramente compacto, moderadamente plástico, con arena de grano medio y algunas gravas. No se observan pátinas de oxidación.<br>Clasificación: ML                                                                        |
| 1.00        | 1.50     | Arcilla limosa, de color marrón grisáceo a gris, húmeda, ligeramente compacta, plástica, con arena de grano medio y algunas gravas. No se observan pátinas de oxidación.<br>Clasificación: ML-CL                                                                                      |
| 1.50        | 2.20     | Limos de baja compresibilidad, de color marrón grisáceo a gris, húmedos, ligeramente compactos, altamente plásticos, con algo de arena de grano medio a fino. No se observan pátinas de oxidación.<br>Clasificación: ML                                                               |
| 2.20        | 25.00    | Grava: Arena limosa de color beige claro a gris verdoso, de grano fino, en estado seco a ligeramente húmedo, medianamente compacta a compacta, ligeramente plástica, con un diámetro máximo de 5.0 cm. Presenta fragmentos de cuarcitas y andesitas porfíricas.<br>Clasificación: GP. |

### PILAR IZQUIERDO

Tabla 2. Descripción geológica de la zona. Fuente: Consorcio HYC/MAB

| Profundidad |          | Descripción Petrográfica                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-------------|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Desde(m)    | Hasta(m) |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 0.00        | 0.60     | Grava, arena limosa de color beige claro a gris verdoso, de grano fino, en estado seco a ligeramente húmedo, medianamente compacta a compacta, ligeramente plástica, con un diámetro máximo de 9.0 cm. Presenta fragmentos de cuarcitas y andesitas porfíricas.<br>Clasificación: GP |
| 0.60        | 3.00     | Grava, arena limosa de color beige claro a gris verdoso, de grano fino, en estado seco a ligeramente húmedo, medianamente compacta a compacta, ligeramente plástica, con un diámetro máximo de 8.0 cm. Presenta fragmentos de cuarcitas y andesitas porfíricas.<br>Clasificación: GP |
| 3.00        | 28.00    | Grava, arena limosa de color beige claro a gris verdoso, de grano fino, en estado seco a ligeramente húmedo, medianamente compacta a muy compacta, ligeramente plástica, con un diámetro máximo que oscila entre                                                                     |

| Profundidad |          | Descripción Petrográfica                                                                                         |
|-------------|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Desde(m)    | Hasta(m) |                                                                                                                  |
|             |          | 2.00 y 10 cm. Presenta fragmentos de cuarcitas, andesitas, riolitas y andesitas porfíricas.<br>Clasificación: GP |

### PILAR DERECHO

Tabla 3: Descripción geológica de la zona. Fuente: Consorcio HYC/MAB

| Profundidad |          | Descripción Petrográfica                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-------------|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Desde(m)    | Hasta(m) |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 0.00        | 3.50     | Grava, arena limosa de color beige claro a gris verdoso, de grano fino, en estado seco a ligeramente húmedo, medianamente compacta a compacta, ligeramente plástica, con un diámetro máximo que oscila entre 6.50 y 10.00 cm. Presenta fragmentos de cuarcitas y andesitas porfíricas.<br>Clasificación Visual Manual: GP                                                                  |
| 3.50        | 27.00    | Estratos decimétricos a centimétricos de limolitas de color pardo rojizo a bruno claro a gris bruno, de grano fino, en estado seco a ligeramente húmedo, medianamente compactos a muy compactos, ligeramente plásticos, con un tamaño máximo que oscila entre 5.00 y 94.00 cm.<br>RQD: < 25 - muy mala, 30 – mala, 87 – muy buena, 94 - excelente<br>Clasificación: Limo arenitas lutaceas |

### ESTRIBO DERECHO

Tabla 4: Descripción geológica de la zona. Fuente: Consorcio HYC/MAB

| Profundidad |          | Descripción Petrográfica                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-------------|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Desde(m)    | Hasta(m) |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 0.00        | 1.20     | Arena limosa de color beige claro a gris amarillento, de grano fino, en estado seco a ligeramente húmedo, medianamente compacta a compacta, moderadamente plástica, con un diámetro máximo que alcanza la fracción arcilla. Presenta fragmentos de raíces y algunas ramas.<br>Clasificación: SM - SC           |
| 1.20        | 2.00     | Arena arcillosa de color beige claro a gris verdoso, de grano fino, en estado seco a ligeramente húmedo, medianamente compacta a compacta, ligeramente plástica, con un diámetro máximo que alcanza la fracción arcilla. No se observa la presencia de fragmentos de materia orgánica.<br>Clasificación: CL-ML |
| 2.00        | 3.00     | Arcilla limosa de color beige claro a gris verdoso, de grano fino, en estado húmedo, medianamente compacta a compacta, plástica, con un diámetro máximo que alcanza la fracción arcilla. Presenta algunos fragmentos de gravas.<br>Clasificación: CL-ML                                                        |

| Profundidad |          | Descripción Petrográfica                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-------------|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Desde(m)    | Hasta(m) |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 3.00        | 4.00     | Arena limosa con arcilla de color beige claro a gris claro, de grano fino, en estado húmedo, medianamente compacta a compacta, ligeramente plástica, con un diámetro máximo que alcanza la fracción arena.<br>Clasificación: Areniscas limosas                                                                                           |
| 2.20        | 16.20    | Estratos decimétricos a centimétricos de areniscas de color gris claro a beige, de grano fino, en estado seco a ligeramente húmedo, medianamente compactos a muy compactos, ligeramente plásticos, con un tamaño máximo que oscila entre los 8.50 y 90.00 cm.<br>RQD: 26 - mala, 51 – regular, 83 - <muy buena Clasificación: Areniscas. |

En el siguiente cuadro se muestran los resultados del análisis granulométrico del material del cauce principal y de la llanura de inundación, a la altura del estribo izquierdo.

Tabla 5: Análisis granulométrico del material del cauce. Fuente: Consorcio HYC/MAB.

| Zona                                                           | D95  | D75  | D50  | D35    | D15      |
|----------------------------------------------------------------|------|------|------|--------|----------|
| Cauce Principal (mm)                                           | 64.6 | 38.0 | 15.8 | 8.0    | 0.5      |
| Llanura (mm)                                                   | 39.5 | 32.0 | 24.5 | 21.2   | 1.3      |
| Diámetro medio en el cauce principal                           |      |      |      | Dmedio | 17.08 mm |
| Diámetro medio en la llanura a la altura del estribo izquierdo |      |      |      | Dmedio | 22.1 mm  |

## DELIMITACIÓN DE LA CUENCA

Se procesaron las imágenes satelitales ASTER DEM utilizando ArcGIS 10.4 para determinar los límites de la cuenca. En la delimitación, solo se consideró el cauce principal del río Huallaga y se descartaron los ríos tributarios con el fin de obtener el caudal del tributario principal. (ver figura 4) A partir del procesamiento de las imágenes satelitales, se obtuvieron los datos representados en la tabla 6.

Tabla 6: Parámetros Geomorfológicos de la cuenca Alto Huallaga obtenidas del ArcGIS 10.4.

| Parámetros Geomorfológico      | Simbología | Unidad             | Cuencas SIG |
|--------------------------------|------------|--------------------|-------------|
| Área                           | a          | km <sup>2</sup>    | 14467.427   |
| Perímetro                      | P          | km                 | 1215.78     |
| Longitud Axial                 | La         | km                 | 351.207     |
| Ancho Promedio                 | Ap         | km                 | 41.193      |
| Coeficiente de Compacidad      | C          | -                  | 2.850       |
| Factor de forma                | F          | -                  | 0.117       |
| Densidad de drenaje            | D          | km/km <sup>2</sup> | 0.272       |
| Pendiente media de la Cuenca   | Sc         | m/m                | 0.455       |
| Pendiente media longitud axial | S          | %                  | 1.508       |
| Cota Máxima                    | Zmáx       | m.s.n.m.           | 5065        |
| Cota Mínima                    | Zmin       | m.s.n.m.           | 551.272     |
| Centroide (WGS84 UTM Zona 18S) |            |                    |             |
| X centroide                    | -          | m                  | 367211.273  |
| Y centroide                    | -          | m                  | 8921226.539 |

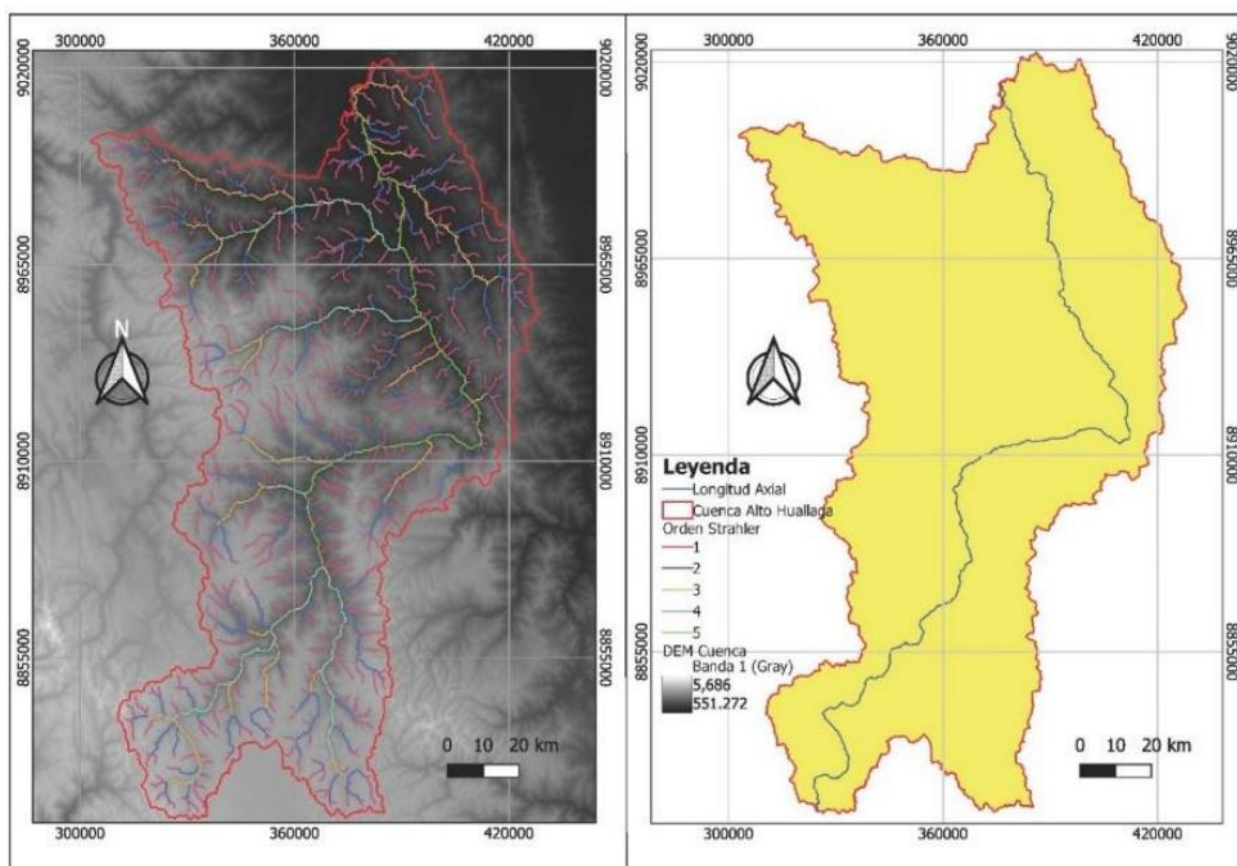


Figura 4. Izquierda: Modelo de elevación digital (DEM) con todos los aportantes. Esc. 1:1,200 000. Derecha: Cuenca sobre el río Huallaga, Pasco y Huánuco.

Entre los parámetros observamos pendientes pronunciadas, lo que indica un relieve accidentado; por lo tanto, el tiempo de concentración es menor. Para definir el tiempo de concentración, se revisó la bibliografía de los autores mencionados en el Manual de Hidrología e Hidráulica del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC, 2016). Sin embargo, ninguna de las metodologías propuestas cumplía con los parámetros obtenidos, ya que el área de la cuenca es muy grande. Por ello, se optó por la metodología de Giandiotti, ya que esta se ajusta mejor a los datos obtenidos en la cuenca.

En la curva hipsométrica (ver figura 5), se observan cotas muy elevadas, superiores a 5500 m.s.n.m., con una pendiente del 45,50%. La curva muestra una tendencia a mantener pendientes de valores altos.

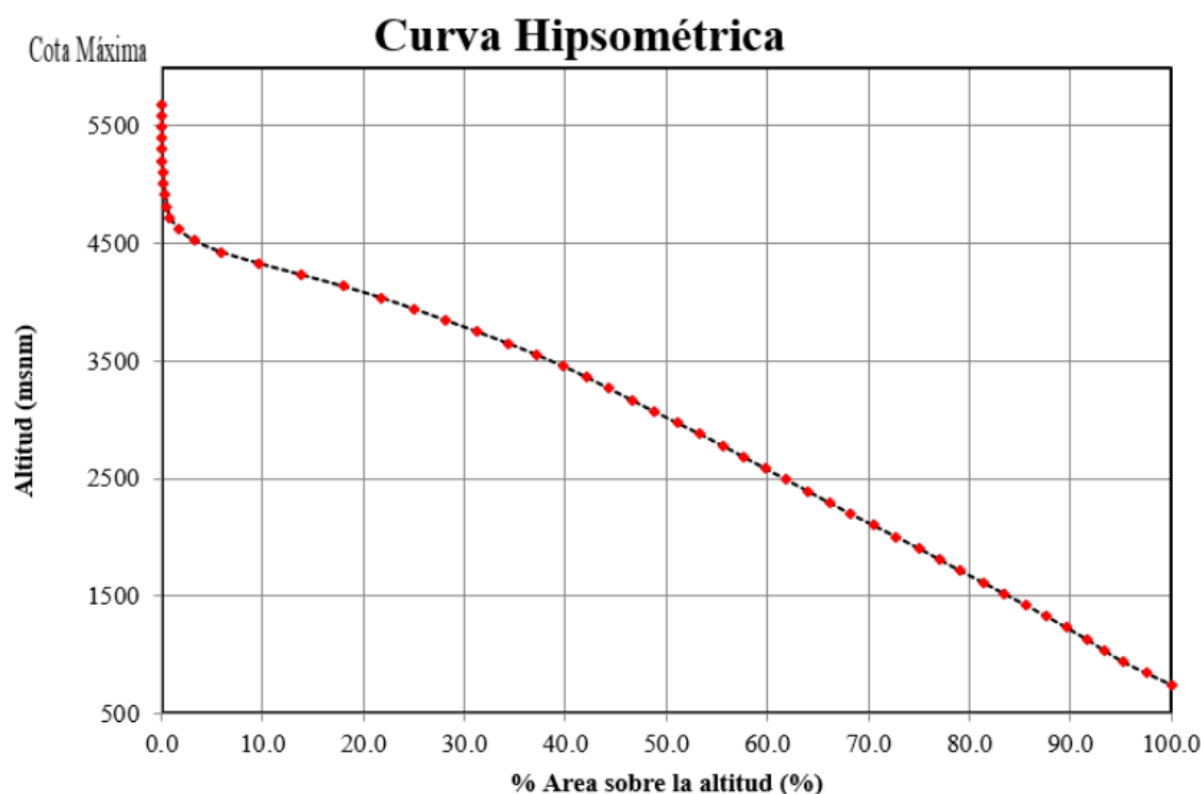


Figura 5. Curva hipsométrica de la cuenca Alto Huallaga la cual demuestra que es un río viejo.

## ANÁLISIS DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS

Se analizaron 13 estaciones pluviométricas: Aucayacu, Canchan, Carpish, Chaglla, Huánuco, Jacas Chico, Oxapampa, Pomabamba, San Rafael, Sihuas, Tingo María, Tulumayo y Yanahuanca. En la figura 6 se representan las estaciones mencionadas. Los datos se obtuvieron de la página web del ANA (SENAMHI), donde se seleccionaron datos de precipitaciones máximas de 24 horas. A partir de esto, se obtuvo el registro de precipitaciones máximas medidos en las estaciones del área de estudio, que se presenta en la tabla 7.

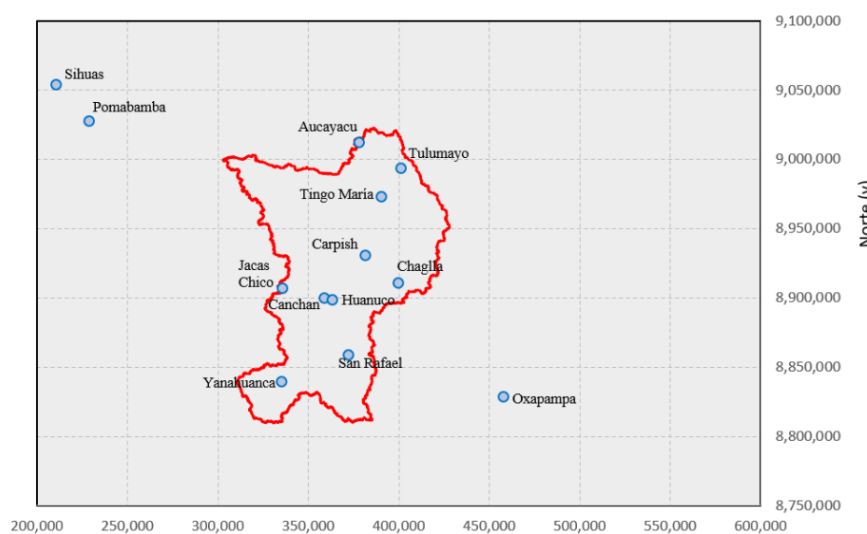


Figura 6. Ubicación de las estaciones meteorológicas de la cuenca Alto Huallaga

Tabla 7. Precipitaciones máximas en 24 horas por año

| Año      | Aucayacu | Canchan | Carpish | Chaglla | Huánuco | Jacas Chico | La Divisoria | Oxapampa | Pomabamba | San Rafael | Sihuas | Tingo María | Tulumayo | Yanahuanca |
|----------|----------|---------|---------|---------|---------|-------------|--------------|----------|-----------|------------|--------|-------------|----------|------------|
| 1964     |          |         |         |         |         |             |              | 40.0     |           |            | 23.7   |             |          |            |
| 1965     |          |         |         |         | 19.5    |             |              | 45.5     |           |            | 27.6   |             |          |            |
| 1966     |          |         |         |         | 25.2    |             |              | 47.0     |           |            | 29.4   | 65.0        |          |            |
| 1967     |          |         |         |         | 40.0    |             |              |          |           |            | 27.3   | 70.5        |          |            |
| 1968     |          |         |         |         | 20.4    |             |              |          |           | 15.0       | 21.9   | 90.4        | 94.7     |            |
| 1969     |          |         |         |         | 27.4    |             |              |          |           | 22.0       | 30.4   | 132.5       | 78.9     |            |
| 1970     |          |         |         |         | 20.0    |             |              | 43.2     |           | 14.4       | 49.1   | 124.1       | 84.0     |            |
| 1971     |          |         |         |         | 15.1    |             |              | 93.0     |           | 26.5       |        | 141.0       | 112.8    |            |
| 1972     |          |         |         |         | 16.5    |             |              | 43.2     |           |            | 28.1   | 102.2       | 112.0    |            |
| 1973     |          |         |         |         | 26.1    |             |              |          |           | 34.5       | 31.0   | 121.1       | 154.5    |            |
| 1974     |          |         |         |         | 25.6    |             |              | 31.6     |           |            | 24.0   | 84.7        | 99.8     |            |
| 1975     | 86.8     |         |         |         | 29.2    | 33.7        |              | 23.2     |           | 35.0       | 20.8   | 86.4        | 65.1     |            |
| 1976     | 60.4     |         |         |         |         | 26.4        |              | 26.6     |           |            | 20.8   | 128.0       | 71.7     |            |
| 1977     | 37.2     |         |         |         | 31.4    |             |              | 51.7     |           |            | 30.1   | 125.7       | 95.0     |            |
| 1978     | 16.0     |         |         |         | 16.8    | 23.3        |              | 52.5     |           | 25.3       | 24.3   | 61.8        | 92.0     |            |
| 1979     |          |         |         |         |         | 49.0        |              |          |           | 40.0       | 27.0   | 75.3        | 57.3     | 40.4       |
| 1980     |          |         |         |         |         | 22.4        |              |          |           |            | 26.6   | 81.4        | 88.0     | 37.4       |
| 1981     |          |         |         |         |         | 30.0        |              |          |           |            |        | 134.0       | 133.5    | 38.1       |
| 1982     |          |         |         |         | 42.9    | 19.7        |              |          |           |            | 24.1   | 99.7        | 116.7    | 19.6       |
| 1983     |          |         |         |         |         | 25.5        |              |          |           |            | 23.4   | 109.0       | 86.0     |            |
| 1984     |          |         |         |         |         | 22.6        |              |          |           |            | 26.0   | 80.0        | 74.7     |            |
| 1985     |          |         |         |         |         | 19.2        |              |          |           |            | 43.7   | 100.0       | 95.5     |            |
| 1986     | 102.0    |         |         |         | 18.5    | 21.5        |              |          |           |            |        |             | 97.1     |            |
| 1987     |          |         |         |         | 18.6    |             |              |          |           |            |        | 85.7        | 78.5     |            |
| 1988     |          |         |         |         | 20.1    | 25.0        |              |          |           |            |        | 89.0        |          | 25.8       |
| 1989     |          |         |         |         | 27.4    | 21.3        |              |          |           |            |        | 94.4        |          | 16.7       |
| 1990     |          | 18.1    |         |         | 21.3    | 22.4        |              |          | 17.0      |            |        | 86.3        |          |            |
| 1991     | 83.5     | 17.5    |         |         | 28.8    | 26.1        |              |          | 14.9      |            |        | 98.4        |          |            |
| 1992     | 77.0     |         |         |         | 38.4    | 22.4        |              |          | 13.0      |            | 30.8   | 98.3        |          | 20.4       |
| 1993     | 75.3     | 27.3    |         |         | 18.0    | 28.0        |              |          |           |            | 32.4   | 104.0       |          |            |
| 1994     | 131.4    |         |         | 25.5    | 24.0    | 26.0        |              |          |           | 38.5       | 52.5   | 149.2       |          | 2.6        |
| 1995     | 103.4    | 16.7    | 81.0    | 28.1    | 18.9    |             | 55.0         |          | 21.7      | 36.8       | 35.3   | 98.4        |          | 2.1        |
| 1996     | 136.5    | 17.7    | 52.7    | 20.4    | 17.1    |             | 26.0         | 55.0     | 22.4      | 22.8       | 26.9   | 78.0        | 102.9    | 21.0       |
| 1997     | 96.7     | 22.7    | 64.0    | 17.7    | 11.4    | 28.8        | 50.2         | 76.0     | 34.2      |            | 38.3   | 99.8        | 136.0    | 22.0       |
| 1998     | 95.0     | 24.8    | 57.2    | 20.4    | 27.5    | 41.5        | 49.2         | 60.0     | 25.6      |            | 46.9   | 156.0       | 113.3    | 37.7       |
| 1999     | 76.4     | 25.1    | 55.9    | 33.6    | 33.0    | 43.2        | 80.5         |          | 33.0      | 21.6       | 68.3   | 116.5       | 113.8    | 32.0       |
| 2000     | 102.0    | 28.1    | 56.2    | 41.5    | 20.3    | 36.4        | 92.6         | 63.0     | 34.8      | 25.1       | 25.2   | 88.5        | 96.6     | 19.2       |
| 2001     | 84.0     | 60.5    | 60.3    | 28.7    | 48.7    | 30.1        | 61.3         | 42.0     |           | 41.8       | 25.8   | 95.9        | 90.7     | 28.3       |
| 2002     | 87.0     | 29.6    | 81.0    | 24.6    | 27.2    | 24.2        | 82.0         | 40.0     |           | 29.9       | 25.0   | 123.1       | 103.5    | 18.2       |
| 2003     | 104.0    | 29.0    | 60.1    | 48.0    | 23.0    | 27.5        | 98.0         | 53.0     | 37.0      |            |        | 149.7       | 126.0    | 54.8       |
| 2004     | 93.2     | 33.2    | 48.9    | 45.0    | 17.6    | 29.8        | 85.0         | 62.0     | 32.5      | 29.6       | 34.4   | 80.0        | 102.4    | 23.4       |
| 2005     | 102.0    | 33.0    | 55.0    | 35.5    | 25.5    | 40.0        | 77.2         | 37.0     |           |            | 31.8   | 97.5        | 142.0    | 30.7       |
| 2006     | 96.0     | 31.6    | 54.2    | 41.5    | 28.0    | 42.7        | 128.0        | 41.0     | 28.3      | 28.8       | 27.7   | 108.0       | 118.6    | 22.5       |
| 2007     | 73.6     | 37.1    | 54.2    | 38.8    | 27.3    | 32.1        | 88.0         |          | 39.5      | 31.9       | 34.3   | 70.5        | 76.8     | 35.3       |
| 2008     | 95.0     | 29.6    | 77.3    | 32.8    | 33.1    | 39.0        | 88.0         | 38.0     | 35.1      |            | 23.6   | 95.8        | 68.3     | 23.3       |
| 2009     | 72.5     | 27.0    | 88.4    | 28.6    | 19.6    | 47.3        | 80.6         | 58.0     | 28.8      | 25.5       | 31.0   | 78.2        | 97.6     | 31.5       |
| 2010     | 74.5     | 28.6    | 45.4    | 49.2    | 22.6    | 36.9        | 114.3        | 46.0     | 32.0      | 25.1       | 23.3   | 69.9        | 108.5    | 31.3       |
| 2011     | 123.0    | 24.4    | 69.5    | 24.4    | 36.2    | 30.1        | 79.1         | 52.0     | 25.5      | 21.8       | 21.7   | 105.0       | 89.0     | 28.0       |
| 2012     | 87.2     | 23.7    | 67.7    | 40.8    | 30.7    | 40.8        | 85.8         | 60.0     | 36.0      | 33.5       | 34.6   | 103.7       | 80.0     | 33.0       |
| 2013     | 96.9     | 21.7    | 76.4    | 27.4    | 19.9    | 41.7        | 125.0        | 62.0     | 23.9      |            | 26.9   | 121.0       | 118.3    | 19.2       |
| 2014     | 73.8     | 27.4    | 61.7    | 35.0    | 24.8    | 38.3        | 100.0        | 56.1     | 36.6      | 25.7       | 32.6   | 148.0       | 95.0     | 19.2       |
| 2015     | 89.6     | 24.5    | 71.7    | 40.6    | 31.7    | 43.4        | 94.0         |          | 37.6      | 16.4       | 43.8   | 122.5       | 104.2    |            |
| 2016     | 110.4    |         | 97.6    |         | 18.0    |             | 103.0        | 63.5     | 53.6      |            | 28.8   | 89.3        |          |            |
| 2017     | 109.2    | 41.8    | 47.1    | 28.6    | 38.2    | 38.2        | 94.2         | 47.0     | 26.5      | 28.6       | 34.1   | 103.5       | 77.8     | 30.0       |
| 2018     | 91.5     | 20.8    | 66.2    | 28.6    | 22.9    | 26.7        | 122.8        | 56.5     | 30.8      | 32.7       | 31.4   | 143.2       | 81.4     |            |
| 2019     | 94.0     | 19.3    | 54.0    |         | 23.7    | 29.0        | 99.3         | 50.1     | 44.8      | 29.3       | 39.8   | 72.1        | 70.1     | 25.7       |
| 2020     | 104.2    | 19.6    | 47.6    | 27.4    | 15.3    | 28.7        |              |          | 42.3      |            |        |             | 92.3     | 14.8       |
| 2021     | 89.2     |         | 47.4    | 39.0    | 32.9    | 32.3        |              | 43.0     | 34.0      |            | 25.0   |             | 72.9     | 22.3       |
| 2022     | 116.8    | 24.5    | 75.0    | 29.0    | 24.0    | 34.8        |              | 65.0     | 43.3      | 30.6       | 26.2   | 96.0        | 74.5     | 19.1       |
| 2023     |          |         | 64.7    |         |         |             |              |          |           |            |        |             |          |            |
| N° datos | 37.0     | 29.0    | 29.0    | 27.0    | 51.0    | 43.0        | 25.0         | 34.0     | 28.0      | 28.0       | 49.0   | 54.0        | 46.0     | 33.0       |

Posteriormente, se ejecutó el software Hidroesta para calcular las precipitaciones máximas en 24 horas para diferentes períodos de retorno, como se muestra en la tabla 8. Para cada distribución, se realizaron las pruebas de bondad de Smirnov-Kolmogorov.

Tabla 8. Registro de precipitaciones máximas de 24h para diferentes periodos de retorno.

| Estación    | Distribución           | TR2    | TR5    | TR10   | TR20   | TR25   | TR50   | TR100  | TR140  | TR200  | TR500  |
|-------------|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Aucayacu    | Gamma 2 Parámetros     | 94.27  | 107.85 | 115.43 | 121.96 | 123.90 | 129.57 | 134.82 | 137.23 | 139.71 | 145.74 |
| Canchan     | LogNormal 2 Parámetros | 25.97  | 32.90  | 37.24  | 41.24  | 42.49  | 46.26  | 49.95  | 51.71  | 53.57  | 58.32  |
| Carpish     | LogNormal 3 Parámetros | 68.31  | 82.33  | 92.26  | 102.20 | 105.43 | 115.64 | 126.20 | 131.45 | 137.14 | 152.28 |
| Chaglla     | LogNormal 3 Parámetros | 35.47  | 44.49  | 50.19  | 55.51  | 57.16  | 62.21  | 67.14  | 69.52  | 72.04  | 78.47  |
| Huánuco     | Gamma 3 Parámetros     | 27.35  | 35.38  | 40.34  | 44.85  | 46.23  | 50.38  | 54.32  | 56.18  | 58.12  | 62.92  |
| Jacas Chico | LogNormal 2 Parámetros | 34.32  | 42.53  | 47.60  | 52.22  | 53.65  | 57.97  | 62.14  | 64.14  | 66.23  | 71.54  |
| Oxapampa    | LogNormal 3 Parámetros | 56.04  | 69.55  | 77.41  | 84.34  | 86.45  | 92.66  | 98.54  | 101.28 | 104.14 | 111.26 |
| Pomabamba   | Normal                 | 35.71  | 44.51  | 49.12  | 52.93  | 54.04  | 57.21  | 60.07  | 61.36  | 62.68  | 65.85  |
| San Rafael  | Normal                 | 31.83  | 38.59  | 42.13  | 45.04  | 45.90  | 48.33  | 50.52  | 51.52  | 52.52  | 54.95  |
| Sihuas      | LogNormal 3 Parámetros | 32.01  | 40.74  | 47.93  | 55.87  | 58.60  | 67.71  | 77.80  | 83.08  | 88.96  | 105.50 |
| Tingo María | LogNormal 2 Parámetros | 112.67 | 136.92 | 151.61 | 164.93 | 169.04 | 181.33 | 193.15 | 198.76 | 204.63 | 219.48 |
| Tulumayo    | Gamma 3 Parámetros     | 106.63 | 128.35 | 141.15 | 152.49 | 155.94 | 166.12 | 175.72 | 180.19 | 184.81 | 196.22 |
| Yanahuanca  | Gamma 3 Parámetros     | 28.85  | 38.00  | 43.91  | 49.41  | 51.12  | 56.29  | 61.28  | 63.64  | 66.12  | 72.32  |

## TORMENTA DE DISEÑO

A partir de las precipitaciones máximas de 24 horas, se dedujeron las precipitaciones máximas de diseño para duraciones menores a 24 horas y diferentes tiempos de retorno, utilizando el método de Dick y Peschke. (ver tabla 9).

Tabla 9. Intensidades (mm/h) para duraciones menores de 24 horas en diferentes periodos de retorno

| Alto Huallaga |        |                           |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------|--------|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Duración      |        | Período de retorno (años) |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| h             | Min.   | 2                         | 5     | 10    | 20    | 25    | 50    | 100   | 140   | 200   | 500   |
| 1.00          | 60.00  | 24.24                     | 29.63 | 32.93 | 34.99 | 35.90 | 38.66 | 41.28 | 42.53 | 45.01 | 45.94 |
| 2.00          | 120.00 | 14.41                     | 17.62 | 19.58 | 20.81 | 21.34 | 22.99 | 24.55 | 25.29 | 26.77 | 27.31 |
| 3.00          | 180.00 | 10.63                     | 13.00 | 14.45 | 15.35 | 15.75 | 16.96 | 18.11 | 18.66 | 19.75 | 20.15 |
| 4.00          | 240.00 | 8.57                      | 10.47 | 11.64 | 12.37 | 12.69 | 13.67 | 14.60 | 15.04 | 15.91 | 16.24 |
| 5.00          | 300.00 | 7.25                      | 8.86  | 9.85  | 10.47 | 10.74 | 11.56 | 12.35 | 12.72 | 13.46 | 13.74 |
| 6.00          | 360.00 | 6.32                      | 7.73  | 8.59  | 9.13  | 9.36  | 10.08 | 10.77 | 11.09 | 11.74 | 11.98 |

| Alto Huallaga |         |                           |      |      |      |      |      |      |      |       |       |
|---------------|---------|---------------------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| Duración      |         | Período de retorno (años) |      |      |      |      |      |      |      |       |       |
| 7.00          | 420.00  | 5.63                      | 6.88 | 7.65 | 8.13 | 8.34 | 8.98 | 9.59 | 9.88 | 10.46 | 10.67 |
| 8.00          | 480.00  | 5.10                      | 6.23 | 6.92 | 7.36 | 7.55 | 8.13 | 8.68 | 8.94 | 9.46  | 9.66  |
| 9.00          | 540.00  | 4.66                      | 5.70 | 6.34 | 6.73 | 6.91 | 7.44 | 7.95 | 8.18 | 8.66  | 8.84  |
| 10.00         | 600.00  | 4.31                      | 5.27 | 5.86 | 6.22 | 6.38 | 6.87 | 7.34 | 7.56 | 8.00  | 8.17  |
| 11.00         | 660.00  | 4.01                      | 4.90 | 5.45 | 5.79 | 5.94 | 6.40 | 6.83 | 7.04 | 7.45  | 7.61  |
| 12.00         | 720.00  | 3.76                      | 4.60 | 5.11 | 5.43 | 5.57 | 6.00 | 6.40 | 6.60 | 6.98  | 7.12  |
| 13.00         | 780.00  | 3.54                      | 4.33 | 4.81 | 5.11 | 5.24 | 5.65 | 6.03 | 6.21 | 6.57  | 6.71  |
| 14.00         | 840.00  | 3.35                      | 4.09 | 4.55 | 4.83 | 4.96 | 5.34 | 5.70 | 5.88 | 6.22  | 6.35  |
| 15.00         | 900.00  | 3.18                      | 3.89 | 4.32 | 4.59 | 4.71 | 5.07 | 5.42 | 5.58 | 5.91  | 6.03  |
| 16.00         | 960.00  | 3.03                      | 3.70 | 4.12 | 4.37 | 4.49 | 4.83 | 5.16 | 5.32 | 5.63  | 5.74  |
| 17.00         | 1020.0  | 2.89                      | 3.54 | 3.93 | 4.18 | 4.29 | 4.62 | 4.93 | 5.08 | 5.38  | 5.49  |
| 18.00         | 1080.00 | 2.77                      | 3.39 | 3.77 | 4.00 | 4.11 | 4.42 | 4.72 | 4.87 | 5.15  | 5.26  |
| 19.00         | 1140.00 | 2.66                      | 3.26 | 3.62 | 3.85 | 3.94 | 4.25 | 4.54 | 4.67 | 4.95  | 5.05  |
| 20.00         | 1200.00 | 2.56                      | 3.13 | 3.48 | 3.70 | 3.80 | 4.09 | 4.37 | 4.50 | 4.76  | 4.86  |
| 21.00         | 1260.00 | 2.47                      | 3.02 | 3.36 | 3.57 | 3.66 | 3.94 | 4.21 | 4.34 | 4.59  | 4.68  |
| 22.00         | 1320.00 | 2.39                      | 2.92 | 3.24 | 3.44 | 3.53 | 3.81 | 4.06 | 4.19 | 4.43  | 4.52  |
| 23.00         | 1380.00 | 2.31                      | 2.82 | 3.14 | 3.33 | 3.42 | 3.68 | 3.93 | 4.05 | 4.29  | 4.37  |
| 24.00         | 1440.00 | 2.24                      | 2.73 | 3.04 | 3.23 | 3.31 | 3.57 | 3.81 | 3.92 | 4.15  | 4.24  |

### 03 RESULTADOS

#### ESTUDIO DE HIDROLOGÍA

Las máximas avenidas del río Huallaga se han calculado a partir de datos de precipitaciones máximas de 24 horas. Los caudales presentados corresponden a diferentes períodos de retorno.

Tabla 10. Máximos caudales obtenidos en HEC-HMS.

| Periodo de retorno TR | Q máx. (m³/s) |
|-----------------------|---------------|
| 500                   | 8709.80       |
| 200                   | 7656.50       |
| 140                   | 7278.20       |
| 100                   | 6936.70       |
| 50                    | 6277.90       |
| 25                    | 5675.70       |
| 20                    | 5493.20       |
| 10                    | 4959.40       |
| 5                     | 4473.20       |
| 2                     | 3898.80       |

Para los cálculos de socavación, se utiliza un caudal correspondiente a un período de retorno de 500 años. En consecuencia, el caudal hidráulico a emplear es:  $Q_{500} = 8709.80 \text{ m}^3/\text{s}$ .

### COEFICIENTES DE RUGOSIDAD DE MANNING CONSIDERADOS

Se utilizaron los siguientes números de Manning, obtenidos del procesamiento del polígono del puente en el software ArcMap, para delimitar mejor las diferentes superficies presentes en nuestro cauce. Se obtuvieron 15 números de Manning, que se detallan a continuación:

Tabla 11. Valores de Manning según Ven Te Chow.

| ID | Descripción                   | "n"   |
|----|-------------------------------|-------|
| 1  | Rio                           | 0.032 |
| 2  | Vía                           | 0.018 |
| 3  | Arboles sauces                | 0.15  |
| 4  | Arbustos y Malezas densos     | 0.1   |
| 5  | Arbustos y Malezas escasos    | 0.06  |
| 6  | Áreas cultivadas con cultivos | 0.04  |
| 7  | Áreas cultivadas sin cultivo  | 0.03  |
| 8  | Infraestructura               | 0.02  |
| 9  | Pastizales altos              | 0.035 |
| 10 | Pastizales bajos              | 0.03  |
| 11 | Tierra con algo de vegetación | 0.027 |
| 12 | Tierra grava                  | 0.025 |
| 13 | Tierra nueva                  | 0.018 |
| 14 | Tierra recto y uniforme grava | 0.025 |
| 15 | Tierra sin vegetación         | 0.025 |

### MODELO IBER (MODELO BIDIMENSIONAL)

La superficie generada a partir de las curvas de nivel constituirá nuestro polígono base para importarlo en Iber. Posteriormente, se asignarán las superficies a todo el polígono, sin omitir ninguna área, ya que es allí donde se realizará el modelado. A continuación, se procederá a ingresar los datos de entrada y salida del modelo.

Se ingresarán los caudales obtenidos del hidrograma para un período de retorno de 500 años y se seleccionará la zona de ingreso del fluido (ver figura 7). Luego, se considerarán los datos de salida, en los cuales se simulará que al salir el fluido se tendrá un régimen subcrítico (ver figura 8).

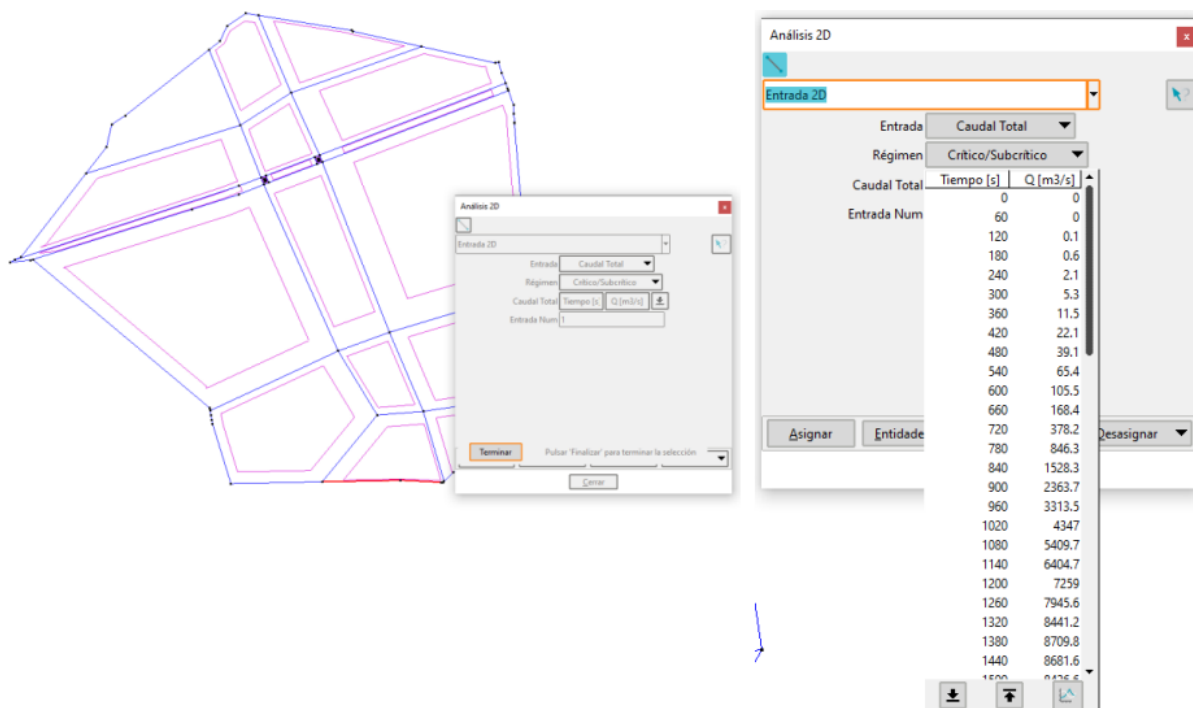


Figura 7. Datos de Entrada para el modelamiento en Iber.

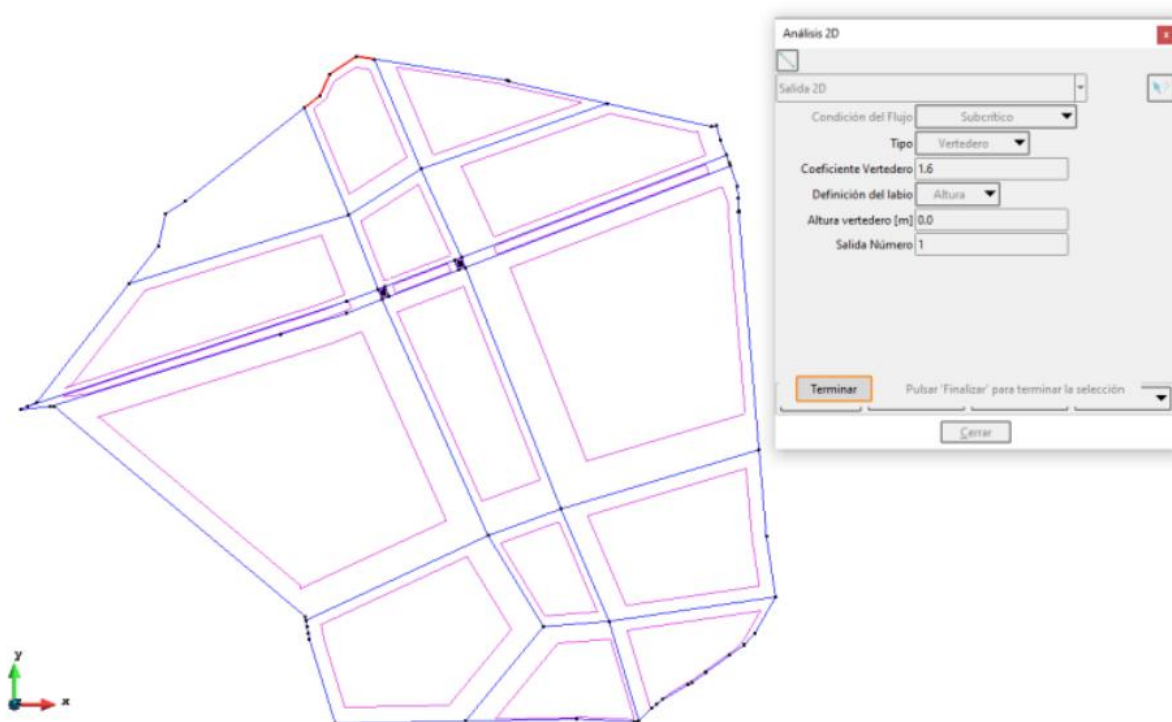


Figura 8. Datos de Salida para el modelamiento en Iber.

Para obtener los resultados del modelado, se consideraron los pilares de forma hueca, lo que permitió un procesamiento más rápido sin sacrificar la precisión de los resultados. Se emplearon tres

tamaños de malla: 0.5 m para el área de los pilares, 1.0 m para la zona del río y el eje de la vía, y 2.0 m en los márgenes del río.

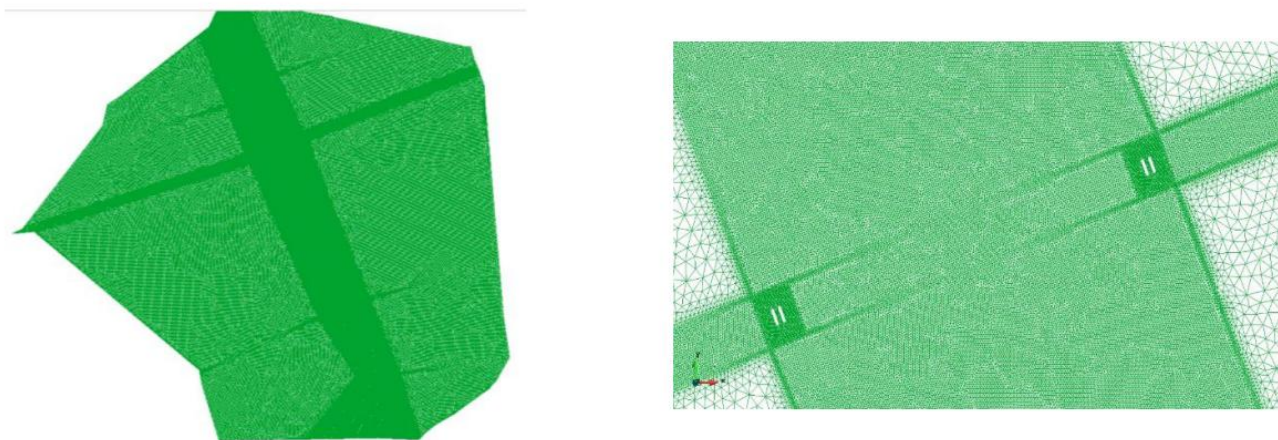


Figura 9. Malla generada para el modelamiento en Iber

Los valores de los números de Manning se deben introducir de acuerdo con Ven Te Chow, utilizando los datos de la Tabla 11.

A continuación, se debe ingresar la topografía del relieve del terreno generado a partir de la superficie de la zona de estudio. Esto permitirá obtener las cotas respectivas con referencia a la topografía en los informes generados.

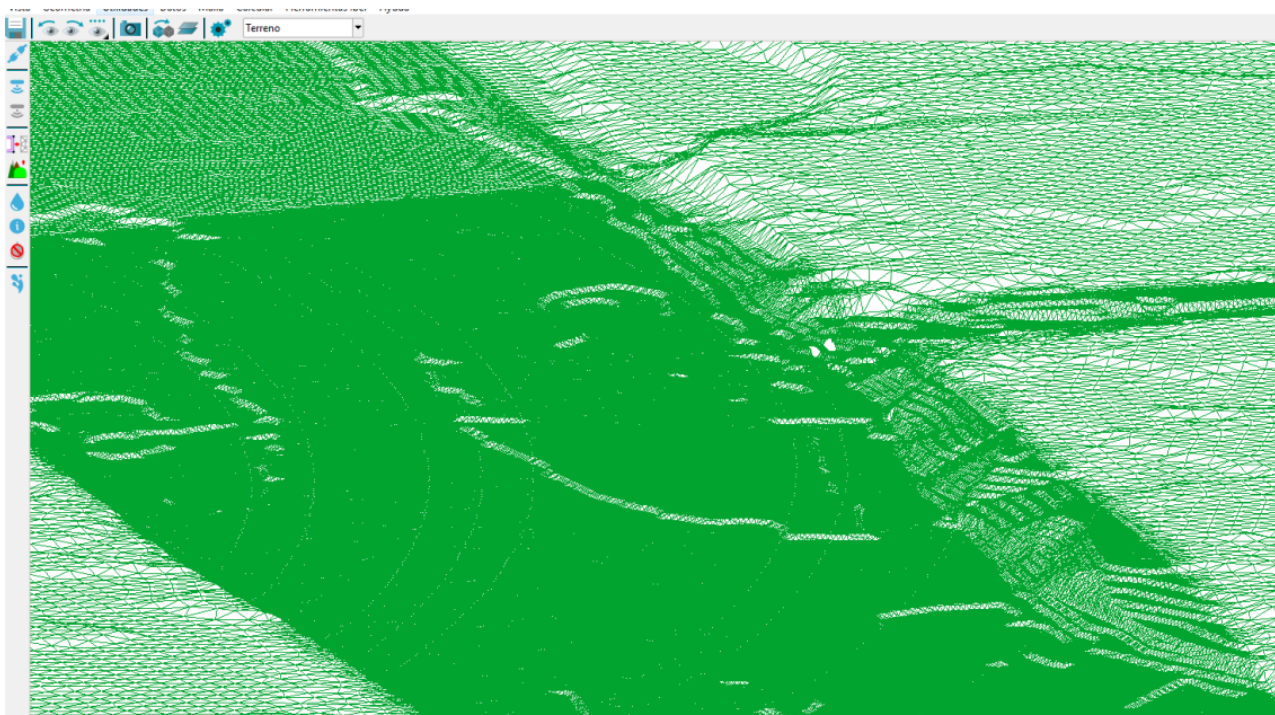


Figura 10: Topografía ingresada para el modelamiento en Iber

El procesamiento de los datos se llevó a cabo en Iber, simulando un tiempo total de 4800 segundos y generando resultados cada 10 segundos para la visualización de los informes. A continuación, se presentan los resultados del modelado para el parámetro velocidad. Se observa que la velocidad fluctúa entre 2 m/s y 4 m/s, lo que indica una capacidad erosiva tanto para el cauce como para los pilares.

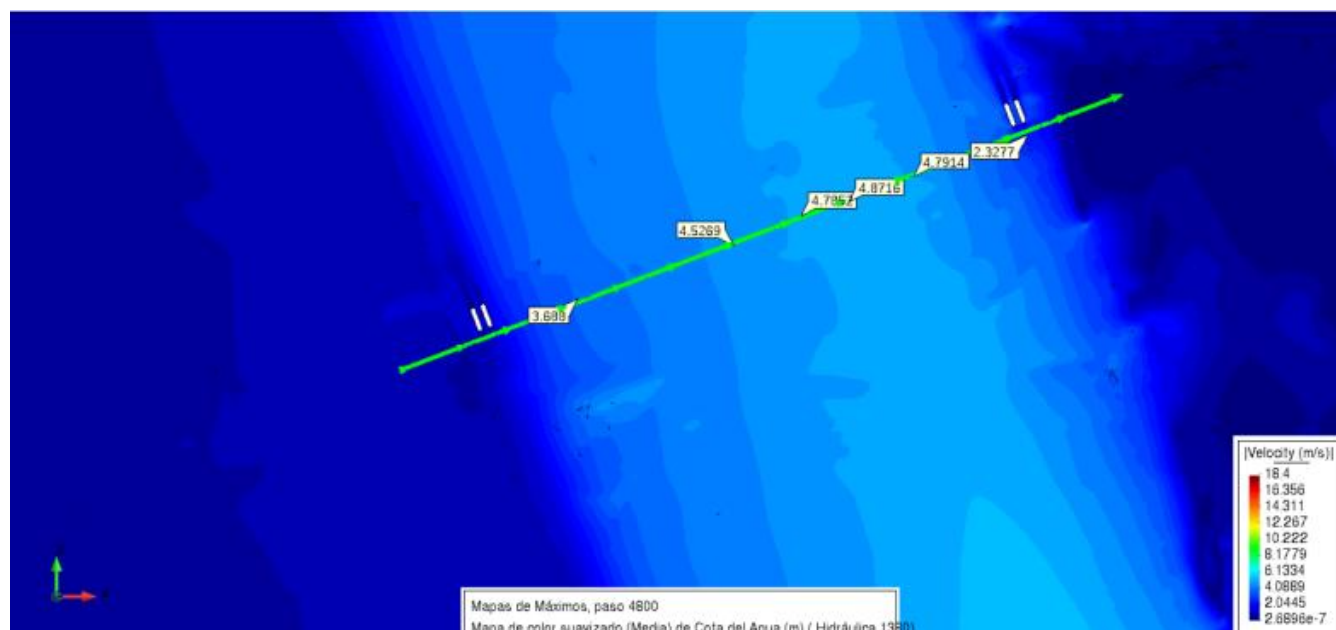


Figura 11. Resultados del parámetro velocidad del modelamiento en Iber.

## SOCAVACIÓN GENERAL

Para el cálculo de socavación general se utilizó el método de Lischtnan-Levediev para un periodo de retorno de 500 años, simulando el tiempo de 4800 segundos.

Tabla 12. Socavación general por el método de Lischtnan-Levediev, usando hoja de Excel.

| Parámetros Hidráulicos                              | Valor       |
|-----------------------------------------------------|-------------|
| Sección Transversal                                 | 1           |
| Q (m <sup>3</sup> /s)                               | 8709.8      |
| A (m <sup>2</sup> )                                 | 469.3313    |
| V (m/s)                                             | 4.8748      |
| Dm (mm)                                             | 17.08       |
| Luz (mínima para $\mu$ )                            | 67.05       |
| Tiempo de Retorno (TR)                              | 500         |
| Peso específico muestra de agua (T/m <sup>3</sup> ) | 1.8         |
| $\mu$                                               | 0.98094     |
| $\alpha$                                            | 0.7         |
| $\beta$                                             | 1.06        |
| $\varphi$                                           | 2.19        |
| z                                                   | 0.33        |
| Prof. Socav. (ds) (m)                               | <b>0.00</b> |

Esta sección se ubica aguas arriba del puente. De acuerdo con los resultados del modelado hidrodinámico, el fluido generará una socavación de 0.00 m en dicha sección para un caudal de 8709.80 m<sup>3</sup>/s, como se detalla en la Tabla 13.

Cabe mencionar que, según Gómez Cunya (2010), los valores positivos en los resultados del modelado indican socavación, mientras que los valores negativos indican sedimentación. En este caso, el valor de 0.00 m para la socavación en la sección aguas arriba del puente se asume como el nivel del cauce en las inmediaciones del pilar.

## SOCAVACIÓN POR CONTRACCIÓN

Esta erosión se produce debido a la contracción del cauce provocada por la presencia del puente, lo que genera un aumento de la velocidad del flujo en los tramos estrechos. En la siguiente tabla, se presenta la contracción calculada para diferentes longitudes del puente.

Tabla 13. Socavación por Contracción, usando el Método de Laursen, usando hoja de Excel.

| Parámetros Hidráulicos | Valor       |
|------------------------|-------------|
| Q1 (m <sup>3</sup> /s) | 8709.8      |
| Q2 (m <sup>3</sup> /s) | 8709.8      |
| B1 (m)                 | 211.15      |
| B2 (m)                 | 189.39      |
| h1                     | 12.97       |
| h2                     | 12.74       |
| k1                     | 0.59        |
| Hs                     | 13.83       |
| Hs-h2(Socavación en m) | <b>1.10</b> |

## SOCAVACIÓN LOCAL

Para determinar la socavación local, se empleó el método de Melville y Sutherland, tomando en cuenta el pilar que experimenta la mayor velocidad del flujo, ya que este generará un mayor grado de erosión debido a la acción del fluido. El cálculo de la socavación se realizó considerando un período de retorno de 500 años y una simulación de 4800 segundos.

Los parámetros utilizados son:

a = Ancho de la pila

K<sub>f</sub> = Factor de corrección por la forma de la pila.

K<sub>φ</sub> = Factor de corrección por ángulo de ataque del flujo.

K<sub>i</sub> = Factor de corrección por intensidad del flujo

K<sub>h</sub> = Factor de corrección por profundidad del flujo

K<sub>D</sub> = Factor de corrección por tamaño de sedimento

K<sub>σ</sub> = Factor de corrección por gradación de sedimento

Tabla 14. Socavación local del pilar

| Parámetros de cálculo para pilares                                    | TR500 |
|-----------------------------------------------------------------------|-------|
| a = Ancho de la pila                                                  | 1.4   |
| K <sub>f</sub> = Factor de corrección por la forma de la pila.        | 1.03  |
| K <sub>φ</sub> = Factor de corrección por ángulo de ataque del flujo. | 3.39  |
| K <sub>i</sub> = Factor de corrección por intensidad del flujo        | 2.40  |

| Parámetros de cálculo<br>para pilares                   | TR500            |
|---------------------------------------------------------|------------------|
| $K_h$ = Factor de corrección por profundidad del flujo  | 1.00             |
| $K_D$ = Factor de corrección por tamaño de sedimento    | 1.00             |
| $K_G$ = Factor de corrección por gradación de sedimento | 1.00             |
| $d_s$ = Profundidad de socavación local                 | <b>11.736 m.</b> |

Se observa en la Tabla 14, que la profundidad de socavación en los pilares será de 11.736m.

## 05 CONCLUSIONES

- En relación con el primer objetivo, se determinó que, al utilizar un tamaño de celda de  $1^\circ \times 1^\circ$  con un intervalo de 1 arcosegundo (30 m), fue necesario aplicar una corrección de forma NADIR (ortogonal) mediante el software ENVI. Esto permitió obtener la imagen más vertical del hexaedro al procesar el cuadrante Sur $09^\circ$  - Oeste $76^\circ$  de la zona de estudio. Este procedimiento proporcionó parámetros más calibrados de la cuenca de estudio.
- En relación con el segundo objetivo, se determinó la lluvia neta mediante el método del Hidrograma Unitario SCS. Esta lluvia neta depende de la Curva Número (CN), la cobertura vegetal y el tipo de suelo. El procesamiento de estos datos reveló que los caudales aumentan significativamente en la cuenca. Para un T20, el aumento es del 44.557%; para un T50, el aumento es del 65.207%; para un T100, el aumento es del 82.545%; y para un T500, el aumento es del 129.205%.
- En relación con el tercer objetivo, se analizaron los datos recabados de la topografía procesada, la obtención del número de Manning, la distribución de malla en la zona de estudio y el hidrograma para un T500 años. Se determinó que la socavación general no tiene un efecto erosivo, con un valor de 0.00 m. Sin embargo, en el caso de la socavación local, se genera una erosión de 11.736 m para ambos pilares.

## 06 REFERENCIAS

- Fragoso S. L., Ruiz y Z. F. J. Bressan, F., Ballio, F., & Armenio, V. (2011). Turbulence around a scoured bridge abutment. *Journal of Turbulence*, 12, 1–24. <https://doi.org/10.1080/14685248.2010.534797>
- Chow, V. Te, & Saldarriaga, J. G. (1994). Hidráulica de canales abiertos. McGraw Hill.
- Ju, S. H. (2013). Determination of scoured bridge natural frequencies with soil-structure interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 55, 247–254. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2013.09.015>

- Khwairakpam, P., & Mazumdar, A.** (2009). Local Scour Around Hydraulic Structures. In International Journal of Recent Trends in Engineering (Vol. 1, Issue 6). <https://www.researchgate.net/publication/237472042>
- Malik, A., Singh, S. K., & Kumar, M.** (2021). Experimental analysis of scour under circular pier. Water Science and Technology: Water Supply, 21(1), 422–430. <https://doi.org/10.2166/ws.2020.318>
- Martínez, Mongil, & del Río.** (2003). Pequeña guía de uso del modelo MODIPE.
- Martín-Vide, J. P., Capape, S., & Ferrer-Boix, C.** (2019). Transient scour and fill. The case of the Pilcomayo River. Journal of Hydrology, 576, 356–369. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.06.041>
- Mehaladevi, P., & Venkatesh, A.** (2020). Scour Around the Bridge Structure-Review. In Article in International Journal of Civil Engineering and Technology. <https://www.researchgate.net/publication/339999269>
- MTC.** (2016). MANUAL DE HIDROLOGÍA, HIDRÁULICA Y DRENAJE. Ministerio de transportes y Comunicaciones.
- Perez, D. R., Yataco Manrique, G., & Hurtado, S. S.** (2020, September 30). Comparative Analysis of the Total Scour in the Pillars and Abutments of a Bridge, between a 1D and 2D Model. 2020 Congreso Internacional de Innovación y Tendencias En Ingeniería, CONIITI 2020 - Conference Proceedings. <https://doi.org/10.1109/CONIITI51147.2020.9240248>

### Conflicto de intereses

Las autoras declaran que no existen conflictos de intereses en la realización de esta investigación.

### ORCID de los autores

Anthony Ruiz Chipana <https://orcid.org/0009-0009-3346-8703>

Marcos Ruben Gutiérrez Rodríguez <https://orcid.org/0009-0002-2953-9002>

Reymundo Jaulis Palomino <https://orcid.org/0000-0003-1330-2801>

## Regulación de recursos naturales en proyectos de ingeniería civil para el desarrollo sostenible

**Gabriel Jesús Montúfar Chiriboga**

E-MAIL: gabriel.montufar@up.ac.pa

Universidad de Panamá, Facultad de Ingeniería

### RESUMEN

La regulación de los recursos naturales en proyectos de ingeniería civil constituye uno de sus principales pilares para el desarrollo sostenible, especialmente en aquellos espacios donde la extracción y uso de recursos como la arena, los sedimentos y los residuos de la construcción son capaces de propiciar altos impactos ambientales. Esta revisión sistemática indaga en investigaciones recientes en gobernanza sobre la extracción de arena, la economía circular de la construcción, las prácticas de dragado, las compras públicas ecológicas y las evaluaciones de impacto ambiental, con el objetivo de determinar alternativas que concilien el avance económico con la protección/conciencia ecológica. Se incorporan veintinueve artículos seleccionados en función de los criterios de inclusión criterios de idoneidad temáticas y robustez metodológica para regiones como Ghana, Malasia, Vietnam y otras partes del mundo. Los resultados destacan que la extracción ilegal de la arena degrada la fertilidad del suelo y las comunidades agrícolas; la economía circular genera menos desperdicio debido al reciclado de materiales; las políticas de compras públicas ecológicas extreman los criterios ambientales aplicados a las licitaciones; y la evaluación de impacto ambiental demanda simplificaciones de los modelos de forma coherente para no provocar un cierto retraso, pero, a la vez, sin limitar una cierta protección.

**PALABRAS CLAVES:** Desarrollo sostenible; recursos naturales; ingeniería civil; gestión ambiental; evaluación del impacto ambiental

Regulation of natural resources in civil engineering projects for sustainable development

### ABSTRACT

The regulation of natural resources in civil engineering projects constitutes one of the main pillars for sustainable development, especially in those areas where the extraction and use of resources such as sand, sediments, and construction waste can lead to significant environmental impacts. This systematic review investigates recent research on governance regarding sand extraction, the circular economy of construction, dredging practices, eco-public procurement, and environmental impact assessments, with the aim of identifying alternatives that reconcile economic progress with ecological protection/awareness. Twenty-nine articles are included, selected based on the inclusion criteria of thematic suitability and methodological robustness for regions such as Ghana, Malaysia, Vietnam, and other parts of the world. The results highlight that illegal sand extraction degrades soil fertility and farming communities; the circular economy generates less waste due to the recycling of materials; eco-public procurement policies strengthen environmental criteria applied to tenders; and environmental impact assessment requires coherent simplifications of models so as not to cause delays but, at the same time, without limiting certain protections.

**KEYWORDS:** Sustainable development; natural resources; civil engineering; environmental management; environmental impact assessment

## 01 INTRODUCCIÓN

La ingeniería civil se posiciona como uno de los pilares fundamentales del avance de las sociedades actuales, ya que le procura la elaboración de infraestructuras para la promoción del crecimiento económico y el bienestar de las personas. Pero, esta disciplina, evidencia que el uso abusivo de los recursos naturales como arena, agua y agregados genera enormes problemas ambientales. En un mundo signado por el cambio climático y el deterioro de los ecosistemas, la gestión adecuada de este tipo de recursos es una necesidad para el desarrollo sostenible. Algunos autores informan de que la extracción sin control de arena, por ejemplo, causa erosión de márgenes ribereños y pérdida de biodiversidad, repercutiendo en las propias comunidades locales (Essaw et al., 2023; Hemmler et al., 2024).

El desarrollo sostenible, que se entiende como la búsqueda del equilibrio entre las necesidades presentes y futuras, requiere marcos normativos que tengan en cuenta aspectos ambientales en los proyectos de ingeniería civil. En lugares como el delta del Mekong o en Ghana, la minería de arena para la construcción ha generado conflictos entre los usos agrícolas y urbanos, subrayando la necesidad de una gobernanza participativa (Yuen et al., 2024; Asare et al., 2024). De una forma equivalente, el tratamiento de los residuos procedentes de la construcción y la demolición (RCD) se configura como otro de los casos críticos, donde la economía circular se presenta como estrategia para reducir el desperdicio y hacer un uso alternativo del material, limitando el uso de recursos naturales (Papamichael et al., 2023; Andersson y Buser, 2022).

La revisión sistemática que tenemos como objetivo persigue en última instancia sintetizar la evidencia científica sobre la gobernanza de los recursos naturales en los proyectos de la ingeniería civil, abordando cuestiones que puedan ir desde la gobernanza de la extracción de arena, dragado ambiental, las compras públicas verdes como las valoraciones de impactos ambientales. El propósito último es identificar prácticas que favorezcan la sostenibilidad, cubriendo las lagunas existentes en la literatura. Se postula que una buena regulación no sólo reduce daños medioambientales, sino que mejora el uso de los recursos, contribuyendo así a finalidades planetarios como los que se encuentran detrás de la Agenda 2030 de la ONU. Esta revisión es producto de una revisión estricta, de tipo estructurado, en la que se han seleccionado sólo los estudios que sitúan en relación las expectativas de daños en la naturaleza con aquellos impactos sabidos que ofrecen respuestas posibles, optando por casos que tienen en común consideraciones de países en vías de desarrollo donde la presión sobre los recursos es más fuerte.

El tema se complica en iniciativas de gran escala, como las represas o las infraestructuras de comunicación, las que producen una extracción de materiales que dan lugar a cambios en los ecosistemas acuáticos y terrestres. Un caso es el dragado para el mantenimiento de puertos que genera una fase de turbidez que daña la calidad del agua y la fauna de los mares (De Padova et al., 2022; Muñoz et al., 2022). Asimismo, la evaluación de impacto ambiental se perfila como uno de los instrumentos regulatorios por excelencia, cuya simplificación debe equilibrarse para que no existan demoras en la obtención del consentimiento, tampoco en la obtención de permisos, todo ello sin que la protección sea en ningún modo perjudicada (Enríquez-de-Salamanca, 2021; Fischer et al., 2023), de donde surgen las demandas y elementos de la introducción de adquisiciones públicas ecológicas que fomentan la elección de materiales de construcción sostenibles, generando una influencia potencial de la adquisición pública verde -"green public procurement"- en la cadena de suministro de la ingeniería civil (Ahmed et al., 2024; Montalbán-Domingo et al., 2023).

La revisión trata sobre estos aspectos con el auxilio de un análisis sistemático, encontrando que la falta de responsabilidad social y una regulación inadecuada producen impactos negativos (Tran et al., 2023); además, se reitera la importancia de enfoques gestionados por los sistemas sociales-ecológicos para el manejo de los riesgos de inundaciones urbanas mediante soluciones naturales, integrando la regulación de recursos humanos con la planificación civil (Zhou et al., 2024), pero se finaliza hablando de cómo la compensación por pérdida de biodiversidad y la restauración de los ecosistemas acuáticos pueden mitigarse por los efectos de los proyectos de ingeniería, pero alcanzar sus resultados finales de equilibrio sostenible (Mancini et al., 2024; Ciscato & Harris, 2025).

Esta primera sección introductoria acaricia la parte del marco conceptual, predefiniendo, pues, el escenario para la metodología de revisión empleada, reconociendo que la ingeniería civil tiene que aproximarse a prácticas regladas que propongan de una u otra forma la conservación, y asegurando de esa manera que la planificación civil no obstaculice la disponibilidad de recursos naturales en el tiempo.

## 02 METODOLOGÍA

La metodología de esta revisión sistemática sigue un enfoque ordenado para asegurar la validez y la reproducibilidad, adaptando guías para revisiones sistemáticas. Se planteó la pregunta de investigación utilizando la PICO: Población (proyectos de ingeniería civil), Intervención (regulación de recursos naturales), Comparación (prácticas no reguladas o convencionales) y Resultado (sostenibilidad del desarrollo). La pregunta de investigación centrales fue: ¿Cuáles son las estrategias regulatorias efectivas para la gestión de recursos naturales en proyectos de ingeniería civil que promuevan el desarrollo sostenible?

Se realizaron búsquedas exploratorias en bases de datos como Scopus, Web of Science y Google Scholar para validar la idea y evitar repeticiones. Los criterios de inclusión tomaron en consideración estudios que habían sido publicados entre 2021 y 2025, centrados en la regulación de recursos naturales, como arena, sedimentos y residuos en el ámbito de la ingeniería civil, dando la importancia correspondiente a aspectos como los efectos ambientales y métodos sostenibles. Se descartaron los estudios irrelevantes, duplicados o que no tenían el texto completo accesible y también, por supuesto, se excluyeron las revisiones narrativas que no aportaban información original o estudios en idiomas diferentes a los del inglés o español.

La estrategia de búsqueda se realizó a partir de palabras clave como "regulación de recursos naturales", "ingeniería civil sostenible", "minería de arena", "economía circular en construcción", "dragado ambiental" y "evaluación de impacto ambiental" y se llevaron a cabo las adaptaciones a cada base de datos y con integración de operadores booleanos para intentar maximizar la relevancia de los resultados. Inicialmente se recuperaron más de 100 artículos, de los cuales veintinueve de ellos fueron seleccionados tras la realización de un cribado de los títulos, resúmenes y textos completos por parte de dos revisores independientes que discutieron las discrepancias.

Se llevó a cabo una búsqueda manual en las referencias de los artículos que fueron seleccionados para incluir artículos adicionales. La extracción de datos se realizó a partir de una hoja estructurada en la que fueron capturados autores, año, metodología, principales hallazgos y conclusiones al respecto de la regulación sostenible. La calidad de los estudios revisados fue analizada utilizando herramientas de evaluación como el instrumento de la National Institutes of Health para estudios observacionales y asegurando que solo se incluyeron aquellos que presentaban un bajo riesgo de sesgo.

El análisis fue cualitativo, que consistió en sintetizar temas comunes como la gobernanza de arena o las evaluaciones de impacto, sobre las que se pondrá más énfasis en lo que hace relación con la ingeniería civil. No se llevaron a cabo meta-análisis cuantitativos debido a la heterogeneidad de los estudios revisados. Esta metodología garantiza una revisión exhaustiva y libre de sesgos, a la vez que es coherente con los estándares internacionales para las revisiones sistemáticas.

### 03 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### GOBERNANZA DE LA EXPLOTACIÓN DE ARENA

Los resultados reflejan que la gobernanza de la explotación de arena representa un reto prominente a la hora de identificar intervenciones en la regulación de recursos naturales aplicadas a proyectos de infraestructura en ingeniería civil. Múltiples investigaciones han evidenciado que la extracción no regulada suele beneficiarse de las tasas de oferta natural al ser mayor con en el proceso de erosión costera o con episodios de restablecimiento de ecosistemas a los asociados al hábitat fluvial (Yuen et al., 2024); además, en estatus como Ghana, la financiación y el apropiamiento a nivel local generan inseguridades alimentarias de personas que dependen de la agricultura (Essaw et al., 2023), y es que la explotación de la tierra al nivel de la extracción de la arena también conlleva un deterioro de fertilidad del terreno las zonas urbanas, tal como en el caso de Accra, que también generaron una disminución de las extensiones cultivadas o bien conflictos sociales (Hemmler et al., 2024).

Por último, cabe destacar la dimensión internacional existente en la cadena de suministro de arena y el hecho de que la falta de regulación reforzara prácticas no sostenibles. Las investigaciones evidencian que, en el delta del Mekong, los volúmenes ilegales de extracción propician la subsidencia del suelo y aumentan la vulnerabilidad ante las inundaciones (Yuen et al., 2024). En el caso de Malasia, la minería offshore requiere estrategias que incluyan la monitorización tecnológica que permita equilibrar las demandas de infraestructura con la protección marina (Ali et al., 2025). Estos resultados ponen de manifiesto la necesidad de enfoques colaborativos que incluyan a gobiernos, comunidades y las empresas residuales de la extracción.

El conocimiento comunitario aparece como factor importante, pues las encuestas indican bajos niveles de conocimiento relacionado con los efectos de la erosión ribereña (Tran et al., 2023). En contextos periurbanos, la relación entre seguridad de la arena y medios de vida pone de manifiesto la necesidad de políticas integradas para la atención de aspectos sociales y económicos (Asare et al., 2023); y, finalmente, se identifica que una buena gobernanza sostenible requiere de límites basados en evaluaciones científicas que promuevan la restauración de sitios minados en el marco de atenuar los efectos a largo plazo (Yasmin et al., 2024). Dicho de otra manera, estos resultados demuestran que una gobernanza deficiente mantiene los ciclos de degradación y, por tanto, es necesaria una reforma que priorice la equidad y la sostenibilidad de su extracción para la construcción civil.

#### ECONOMÍA CIRCULAR DE LOS RESIDUOS DE LA CONSTRUCCIÓN

La economía circular en la gestión de los residuos de la construcción y la demolición es, de acuerdo a la literatura revisada, una estrategia clave para la reducción del impacto de los recursos naturales en la ingeniería civil. Los estudios revisados muestran que el reciclaje de los agregados a la vez que sirve para minimizar las emisiones de carbono, sirve para conservar los depósitos naturales, si bien estos tienen un coste que restringe de forma importante la aplicación del reciclaje de los agregados

(Papamichael et al., 2023). En revisiones de los estudios de la literatura se constata que los marcos circulares permiten la transición de los marcos lineales a pliegos cerrados reutilizando los materiales para nuevas construcciones (Finamore & Oltean-Dumbrava, 2024).

Otro hallazgo relevante es el papel del trabajo institucional en la legitimación de prácticas circulares, observándose que en países como Suecia los intentos de integración de valores económico resultan ineficaces para cambiar inercias culturales tradicionales (Andersson & Buser, 2022), lo que implica que la regulación tiene que servir de aliciente para la innovación en gestión de residuos, por tanto, debemos considerar asociaciones entre el sector público y privado para escalar soluciones. Por otro lado, hay evidencias de que los principios circulares contribuyen a disminuir la cantidad de residuos enviados a vertederos, con la consecuencia de tener un menor impacto en la preservación de suelos y agua (Papamichael et al., 2023). Los contextos mundiales en los que tales enfoques se apliquen a normativas de obra civil deberían ayudar a mitigar la presión sobre recursos no renovables y fomentar economías locales a partir del reciclaje.

Y finalmente, los resultados del estudio sugieren que la evaluación del ciclo de vida es necesario para cuantificar los beneficios y que la economía circular debería ser entendida ya no sólo a modo conceptual, sino también de forma operativa en lo que hace referencia a proyectos de ingeniería.

## EFFECTOS DEL DRAGADO Y RESTAURACIÓN DE ECOSISTEMAS

Desde la infraestructura medioambiental civil de dragado para mantenimiento genera impactos en el medioambiente que requieren una estricta regulación. En el contexto del dragado se ha observado que la turbidez del agua obtiene impactos negativos en la biodiversidad marina, se estableció un umbral mediante el monitoreo empirista necesario para mitigar el daño (De Padova et al., 2022). En los estuarios ya transformados, se demuestra que, a corto plazo, el comunitarismo bentónico es alterado, por lo que es necesario generar planes de mitigación (Donázar-Aramendía et al., 2024).

Por último, la interacción incorporada con factores que también provocan una gran presión, por ejemplo, el incremento del nivel del agua del mar o inundaciones en los humedales, y la disminución de la navegabilidad (Muñoz et al., 2022). Estos resultados resaltan la importancia de fomentar protocolos que incorporen información ambiental a las operaciones de dragado. La restauración de los ecosistemas acuáticos se presenta como método antagónico, en donde el marco regulador, como la Directiva Marco del Agua permite concurrencias para mejorar el hábitat (Ciscato & Harris, 2025). En el marco de los proyectos de construcción civil se realizan avisos previos para evitar un impacto irreparable. Por último, dicen los resultados, se debe enfatizar la naturaleza basada en enfoques de gestión del riesgo que incorporen dragado e integración de soluciones ecológicas con planificación urbana (Zhou et al., 2024).

## LAS ADQUISICIONES PÚBLICAS ECOLÓGICAS

Las adquisiciones públicas ecológicas promueven la sostenibilidad en ingeniería civil al incluir criterios ambientales en la licitación. Estudios sistemáticos revelan que alrededor de noventa por ciento de los contratos incluyen indicadores tales como reducción en emisiones, que varían de acuerdo a la naturaleza de la infraestructura (Montalbán-Domingo et al., 2023). Esto promueve la selección de materiales reciclados y procesos eficientes. Otros hallazgos encuentran que se ha demostrado que las empresas destacadas incluso han tenido un impacto positivo en su desempeño

ambiental corporativo (Zheng & Wen, 2024). En lo que se refiere a la construcción de infraestructuras, estas prácticas regularán el uso de recursos, priorizando los que sean eco-sustentables.

Además, las revisiones mencionan barreras como la falta de estandarización, sugiriendo, por lo general, unas guías para la integración de la ecología en las adquisiciones (Ahmed et al., 2024). Esto promueve que los proyectos de obras civiles minimicen las huellas ambientales. Las políticas ecológicas en adquisiciones públicas refuerzan cadenas de suministro y contribuyen a metas de desarrollo sostenible.

## EVALUACIONES DE IMPACTO AMBIENTAL

Las evaluaciones de impacto ambiental son herramientas reguladoras en el sector de la construcción, aunque están en busca de ser eficientes sin omitir protección. Algunas encuestas internacionales han puesto de manifiesto que algunas extensiones incluyen complejidades como cambio climático, dando peso al equilibrio de los costos (Fischer et al., 2023). Dentro de los límites de áreas protegidas, algunos principios eco-céntricos priorizan la evitación de impactos (Retief et al., 2025). Otro aspecto es que la mayor parte de las demoras no proviene precisamente de la evaluación, sino más bien de factores que son de postevaluación dentro de la gestión forestal y minera (Struthers et al., 2023; Collard et al., 2024). Por ello, esto sugiere reformas que tiendan a la agilidad.

Además, enfoques como Changeology han comenzado a pilotear sobre la base de pruebas en evaluaciones, mejorando su efectividad (Onyango & Gazzola, 2024). Integran consideraciones socio-ecológicas a los proyectos civiles. Por último, los resultados enfatizan propuestas para simplificaciones que puedan mantener su rigurosidad a fin de evitar sesgos en las decisiones regulatorias (Enríquez-de-Salamanca, 2021). En la discusión de estos resultados se articulan los temas, planteando que la regulación es holística para poder afrontar aspectos como, la problemática de la extracción ilícita o la complejidad procedimental cuya regulación debe integrar dichas temáticas, siguiendo a Da y Le Billon (2022); Enríquez-de-Salamanca (2021). También en ingeniería civil esto se traduce en incorporar soluciones naturales a riesgos relevantes como el riesgo de inundaciones o la regulación integrada de recursos hídricos (Zhou et al., 2024).

También la compensación de biodiversidad muestra deficiencias respecto a las formas actuales de abordarla, proponiendo cambios que benefician a las poblaciones y a la naturaleza, a través de políticas de ganancia neta en biodiversidad que remediarían brechas de gobernanza (Mancini et al., 2024; Rampling et al., 2024). Igualmente, se debate de qué forma la ausencia de consciencia en las condiciones en las que se encuentran las comunidades pertenecientes al delta del Mekong va conllevando a un proceso de erosión de dichas comunidades y cómo hacen de la educación y de la participación del propio nivel local un recurso necesario para la regulación de estas comunidades (Tran et al., 2023). Dentro de los contextos africanos, la interconexión de la minería de arena y de la seguridad alimentaria ha puesto de manifiesto la necesidad apremiante de construir puentes legislativos entre las políticas agrarias y extractivas para contribuir a que no se deterioren los medios de subsistencia (Asare et al., 2023; Anokye et al., 2023).

La economía circular genera beneficios en términos de reducción de residuos al mismo tiempo que también crea oportunidades económicas, aunque se necesita de incentivos regulatorios para hacer frente a las resistencias institucionales (Finamore & Oltean-Dumbrava, 2024; Andersson & Buser, 2022). Con respecto al dragado, la fusión de la vigilancia en tiempo real y la restauración normativa, como en la directiva europea, ofrece modelos transferibles a las regiones en desarrollo a fin de mitigar la turbidez y proteger a los ecosistemas (De Padova et al., 2022; Ciscato & Harris, 2025). Las

adquisiciones ecológicas, a través de sus efectos en las cadenas de valor, generan innovaciones sobre materiales sostenibles, pero requieren estándares de medición que permita determinar adecuadamente los efectos reales (Ahmed et al., 2024; Zheng & Wen, 2024).

Las evaluaciones de impactos deben volver al enfoque adaptativo que integre auditorías económicas y principios de mejores prácticas para que la regulación no cause demoras en los proyectos sin justificaciones (Collard et al., 2024; Retief et al., 2025). Para resumir, esta discusión ampliada pone de relieve la relación entre los temas tratados y aboga por regulaciones multi-categorías que fomenten la resiliencia, debido a los proyectos de ingeniería civil sostenible. Añadido por la autora antes de empezar la tabla 1 Descripción del contenido de la tabla: Tabla 1 recoge las contribuciones de los trabajos más destacados en gobernanza de la minería de arena, señalando impactos ambientales y sociales, así como regulaciones. También, se incluyen referencias para dar contexto a los aportes hacia la sostenibilidad en ingeniería civil.

Tabla 1. Resumen de estudios sobre gobernanza de minería de arena

| Estudio        | Impactos principales                                             | Estrategias regulatorias                                     | Referencia             |
|----------------|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------|
| Essaw et al.   | Falta de coordinación institucional; deterioro de medios de vida | Alianzas entre agencias para refuerzo y compensación         | (Essaw et al., 2023)   |
| Yuen et al.    | Extracción ilegal excede reservas; erosión costera               | Monitoreo científico y límites basados en reposición natural | (Yuen et al., 2024)    |
| Ali et al.     | Degradación marina; conflictos sociales                          | Fortalecimiento institucional y tecnología flexible          | (Ali et al., 2025)     |
| Hemmler et al. | Reducción de fertilidad del suelo; abandono de campos            | Reclamación obligatoria y compensación                       | (Hemmler et al., 2024) |
| Tran et al.    | Baja conciencia comunitaria de erosión                           | Educación y participación local en monitoreo                 | (Tran et al., 2023)    |
| Tran et al.    | Baja conciencia comunitaria de erosión                           | Educación y participación local en monitoreo                 | (Tran et al., 2023)    |

Desde luego, en la tabla 1 se hace alusión a los recursos naturales relacionados a la minería de arena, destacando estrategias donde hay un esfuerzo en cuanto a la colaboración y en el seguimiento con tal de minimizar el daño ambiental o bien se reconoce estrategias que ajustan la extracción en los proyectos civiles y en las que se da un énfasis hacia la restauración y la igualdad social. Previo a la tabla 2, se hace referencia al siguiente texto: Esta tabla recoge investigaciones sobre las evaluaciones de impacto ambiental, centrándose en atributos de áreas naturales protegidas y en las simplificaciones e instrumentalizados para la eficiencia.

Tabla 2. Resumen de estudios sobre evaluaciones de impacto ambiental

| Estudio           | Características únicas                                           | Implicaciones para regulación                        | Referencia                |
|-------------------|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|---------------------------|
| Retief et al.     | Enfoque eco-céntrico; evitación como mitigación primaria         | Principios para áreas protegidas: evitación estricta | (Retief et al., 2025)     |
| Fischer et al.    | Simplificaciones reducen costos; extensiones agregan complejidad | Equilibrio entre eficiencia y protección integral    | (Fischer et al., 2023)    |
| Onyango & Gazzola | Falta de epistemología científica en cambios                     | Uso de Changeology para reformas evidencia-basadas   | (Onyango & Gazzola, 2024) |
| Struthers et al.  | EIA no causa demoras principales en gestión forestal             | Enfoque en barreras post-EIA para implementación     | (Struthers et al., 2023)  |
| Collard et al.    | Demoras económicas superan regulatorias en minería               | Auditorías obligatorias de beneficios económicos     | (Collard et al., 2024)    |

La tabla 2 explica cómo las evaluaciones regulan impactos en recursos, con énfasis en principios adaptados para sostenibilidad. Estas herramientas aseguran que proyectos civiles minimicen daños, integrando evidencia para decisiones informadas.

04CONCLUSIONES

Esta revisión sistemática concluye que la regulación de recursos naturales en proyectos de ingeniería civil es indispensable para el desarrollo sostenible, atenuando impactos como la erosión, la pérdida de biodiversidad y el despilfarro. Estrategias como la gobernanza colaborativa en minería de arena, una economía circular para residuos y adquisiciones ecológicas fortalecen la sostenibilidad, evitan demoras a través de evaluaciones de impacto equilibradas y no comprometen la protección. Se recomienda marcos integrados que incorporen interesados para refuerzo efectivo, de prácticas que equilibren el crecimiento económico con la conservación ambiental.

Dentro de regiones vulnerables como son los deltas o aquellas periurbanas, la restauración eco sistémica se debe priorizar para mitigar riesgos climáticos y garantizar que infraestructuras civiles permanezcan resilientes, hasta que la circularidad, además de conservar recursos, también sea la oportunidad para generar empleo verde y contribuir a la equidad social. Por otra parte, las conclusiones enfatizan la necesidad de reformas en evaluaciones de impacto, en simplificación de procesos que no sacrifiquen la rigurosidad, y en fomento de adquisiciones que premien innovaciones sostenibles. Esto es colaboración internacional para compartir mejores prácticas, adaptándolas a los contextos locales.

Y entonces se concluye que la regulación proactiva en ingeniería civil convierte los desafíos ambientales en oportunidades, alineándose a los objetivos mundiales y asegurando legados sostenibles para las próximas generaciones. Otras investigaciones futuras deberían ser sobre métricas cuantitativas con el fin de evaluar la efectividad regulatoria y así fortificar la evidencia que puede llevar a una política informada.

## 05 REFERENCIAS

- AHMED, M. Z.; O'DONOGHUE, C.; y MCGETRICK, P.** Green public procurement in construction: A systematic review. *Cleaner and Responsible Consumption*, 2024, 15, art. 100234. <https://doi.org/10.1016/j.clrc.2024.100234>
- ALI, P. F.; GAN, G. G. G.; y ASMAWI, A.** Strategies for Achieving Sustainable Management of Offshore Sand Mining in Malaysia. *Sustainability*, 2025, 17(4), 1679. <https://doi.org/10.3390/su17041679>
- ANDERSSON, R.; y BUSER, M.** From waste to resource management? Construction and demolition waste management through the lens of institutional work. *Construction Management and Economics*, 2022, 40(6), p. 477-496. <https://doi.org/10.1080/01446193.2022.2081989>
- ANOKYE, N. A.; MENSAH, J. V.; POTAKEY, H. M. D.; BOATENG, J. S.; ESSAW, D. W.; y TENKORANG, E. Y.** Sand mining and land-based livelihood security in two selected districts in the Central Region of Ghana. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 2023, 34(1), p. 21-36. <https://doi.org/10.1108/MEQ-11-2021-0263>
- ASARE, K. Y.; DAWSON, K.; y HEMMLER, K. S.** A sand-security nexus: Insights from peri-urban Accra, Ghana. *The Extractive Industries and Society*, 2023, 15, art. 101322. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2023.101322>
- ASARE, K. Y.; HEMMLER, K. S.; BUERKERT, A.; y MENSAH, J. V.** Scope and governance of terrestrial sand mining around Accra, Ghana. *Social Sciences & Humanities Open*, 2024, 9(1), art. 100894. <https://doi.org/10.1016/j.ssaho.2024.100894>
- CISCATO, E.; y HARRIS, M. E.** The Nature Restoration Regulation and the Water Framework Directive: Enhancing restoration of freshwater ecosystems, or muddying the waters? *Restoration Ecology*, 2025, publicación anticipada. <https://doi.org/10.1111/rec.70233>
- COLLARD, R.; DEMPSEY, J.; AL BOUCHI, Y.; y BAWAAN, N.** Does regulation delay mines? A timeline and economic benefit audit of British Columbia mines. *FACETS*, 2024, 9, p. 1-12. <https://doi.org/10.1139/facets-2024-0083>
- DA, S.; y LE BILLON, P.** Sand mining: Stopping the grind of unregulated supply chains. *The Extractive Industries and Society*, 2022, 10, art. 101070. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2022.101070>
- DE PADOVA, D.; ATTOLICO, A.; UNGARO, N.; y MOSSA, M.** Environmental Management of Dredging Activities: Monitoring System and an Empirical Approach to Estimating Values of Background and Limit Turbidity. *Environmental Sciences Proceedings*, 2022, 21(1), art. 12. <https://doi.org/10.3390/environsciproc2022021012>
- DONÁZAR-ARAMENDÍA, I.; MEGINA, C.; MIRÓ, J. M.; FLORIDO, M.; REYES-MARTÍNEZ, M. J.; OLAYA-PONZONE, L.; y GARCÍA-GÓMEZ, J. C.** Environmental effects of maintenance dredging

works in a highly modified estuary: A short-term approach. *Ocean & Coastal Management*, 2024, 258, art. 107394. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2024.107394>

**ENRÍQUEZ-DE-SALAMANCA, Á.** Simplified environmental impact assessment processes: Review and implementation proposals. *Environmental Impact Assessment Review*, 2021, 90, art. 106640. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2021.106640>

**ESSAW, D. W.; MENSAH, J. V.; ANOKYE, N. A.; TENKORANG, E. Y.; BOATENG, J. S.; y POTAKY, H. M. D.** Governance for Sustainable Sand Mining in Two Selected Local Government Areas in the Central Region of Ghana. *Society & Natural Resources*, 2023, 38(4), p. 394-413. <https://doi.org/10.1080/08941920.2023.2169799>

**FINAMORE, M.; y OLTEAN-DUMBRAVA, C.** Circular economy in construction—findings from a literature review. *Heliyon*, 2024, 10(15), e34647. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34647>

**FISCHER, T. B.; FONSECA, A.; GEIßLER, G.; JHA-THAKUR, U.; RETIEF, F.; ALBERTS, R.; y JIRICKA-PÜRRER, A.** Simplification of environmental and other impact assessments – results from an international online survey. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 2023, 41(3), p. 181-189. <https://doi.org/10.1080/14615517.2023.2198839>

**HEMMLER, K. S.; ASARE, K. Y.; TENKORANG, E. Y.; et al.** Sand mining deteriorates soil fertility and farming livelihoods around Accra, Ghana. *Scientific Reports*, 2024, 14, 17063. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-66656-z>

**MANCINI, M. C.; COLLINS, R. M.; ADDICOTT, E. T.; BALMFORD, B. J.; BINNER, A.; BULL, J. W.; DAY, B. H.; EIGENBROD, F.; ZU ERMGASSEN, S. O. S. E.; FACCIOLI, M.; FEZZI, C.; GROOM, B.; MILNER-GULLAND, E. J.; OWEN, N.; TINGLEY, D.; WRIGHT, E.; y BATEMAN, I. J.** Biodiversity offsets perform poorly for both people and nature, but better approaches are available. *One Earth*, 2024, 7(12), p. 2165-2174. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.10.002>

**MONTALBÁN-DOMINGO, L.; TORRES-MACHI, C.; SANZ-BENLLOCH, A.; PELLICER, E.; y MOLENAAR, K. R.** Green public procurement in civil infrastructure construction: Current performance and main project characteristics. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2023, 149(9), art. 04023089. <https://doi.org/10.1061/JCEMD4.COENG-13502>

**MUÑOZ, D. F.; MOFTAKHARI, H.; KUMAR, M.; y MORADKHANI, H.** Compound effects of flood drivers, sea level rise, and dredging protocols on vessel navigability and wetland inundation dynamics. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 9, art. 906376. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.906376>

**ONYANGO, V.; y GAZZOLA, P.** Change-making in Environmental Impact Assessment (EIA): piloting changeology approach using England as a case study. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 2024, 42(3), p. 251-266. <https://doi.org/10.1080/14615517.2024.2345492>

**PAPAMICHAEL, I.; VOUKKALI, I.; LOIZIA, P.; y ZORPAS, A. A.** Construction and demolition waste framework of circular economy: A mini review. *Waste Management & Research*, 2023, 41(12), p. 1728-1740. <https://doi.org/10.1177/0734242X231190804>

- RAMPLING, E. E.; ZU ERMGASSEN, S. O. S. E.; HAWKINS, I.; y BULL, J. W.** Achieving biodiversity net gain by addressing governance gaps underpinning ecological compensation policies. *Conservation Biology*, 2024, 38(2), e14198. <https://doi.org/10.1111/cobi.14198>
- RETIEF, F. P.; ALBERTS, R. C.; CILLIERS, D.; ROOS, C.; MOOLMAN, J.; y BOND, A.** Unique features of environmental impact assessment (EIA) in protected areas (PAs) – towards best practice principles. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 2025, 43(3), p. 171-178. <https://doi.org/10.1080/14615517.2025.2470936>
- STRUTHERS, C. L.; MURENBEELD, K. J.; y WILLIAMSON, M. A.** Environmental impact assessments not the main barrier to timely forest management in the United States. *Nature Sustainability*, 2023, 6, p. 1542-1546. <https://doi.org/10.1038/s41893-023-01218-1>
- TRAN, D. D.; THIEN, N. D.; YUEN, K. W.; et al.** Uncovering the lack of awareness of sand mining impacts on riverbank erosion among Mekong Delta residents: insights from a comprehensive survey. *Scientific Reports*, 2023, 13, 15937. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-43114-w>
- YASMIN, T.; CLARK, J.; SAMBROOK SMITH, G.; DAHAM, A.; NICHOLAS, A.; y GASPAROTTO, A.** Towards sustainable governance of freshwater sand – A resource regime approach. *Earth System Governance*, 2024, 22, art. 100228. <https://doi.org/10.1016/j.esg.2024.100228>
- YUEN, K. W.; PARK, E.; TRAN, D. D.; et al.** Extent of illegal sand mining in the Mekong Delta. *Communications Earth & Environment*, 2024, 5, art. 31. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01161-1>
- ZHENG, S.; y WEN, J.** Green public procurement and corporate environmental performance: An empirical analysis based on data from green procurement contracts. *International Review of Economics & Finance*, 2024, 96, art. 103578. <https://doi.org/10.1016/j.iref.2024.103578>
- ZHOU, K.; KONG, F.; YIN, H.; et al.** Urban flood risk management needs nature-based solutions: a coupled social-ecological system perspective. *npj Urban Sustainability*, 2024, 4, art. 25. <https://doi.org/10.1038/s42949-024-00162-z>

### Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses

### ORCID del autor

Gabriel Jesús Montúfar Chiriboga <https://orcid.org/0000-0003-3392-3728>

## Simulación hidráulica de sistemas fuentes por bombeo por campos de pozos: 2da parte

**Yaset Martínez Valdés**

E-MAIL: yaset1977@gmail.com

Centro de Investigaciones Hidráulicas, Universidad Tecnológica de la Habana "José Antonio Echeverría"

**Félix Riaño Valle**

E-MAIL: riano@tesla.cujae.edu.cu

Centro de Investigaciones Hidráulicas, Universidad Tecnológica de la Habana "José Antonio Echeverría"

### RESUMEN

En esta segunda parte sobre la temática de simulación hidráulica de los sistemas fuentes por bombeo, centrada en los campos de pozos, se aborda el método de las bombas virtuales. Se presenta la referida metodología, como un procedimiento sencillo para resolver problemas de bombas conectadas en paralelo, cuando las condiciones de instalación y/o características hidráulicas de las bombas acopladas, no son iguales. Deben entenderse que las bombas rotodinámicas virtuales, son máquinas imaginarias que carecen de tuberías de succión e impulsión secundarias. Las mismas están formadas por la bomba real y todos los accesorios y tuberías hasta el punto de unión (nodo) con la tubería de impulsión principal. Estos equipos se caracterizan por trabajar siempre contra la misma carga total cuando operan en paralelo. Se presenta la resolución del ejemplo planteado en el primer artículo sobre este tema, con el fin de comparar los resultados obtenidos por esta metodología con el del método de iteración en el nodo, objetivo de esa primera parte.

**PALABRAS CLAVES:**

Simulación, hidráulica, sistemas fuentes, bombeo, campo pozos

Hydraulic simulation of pumped wellfield source systems: Part 2

### ABSTRACT

In this second part on the subject of hydraulic simulation of pumped well source systems, focusing on well fields, the virtual pump method is discussed. simulación, hidráulica, sistemas fuentes, bombeo, campo pozos It should be understood that virtual rotodynamic pumps are imaginary machines without secondary suction and delivery pipes. They consist of the real pump and all the accessories and piping up to the node with the main delivery pipe. These units are characterized by the fact that they always work against the same total load when operating in parallel. The solution of the example presented in the first article on this subject is presented in order to compare the results obtained by this method with those obtained by the iteration method at the node, the objective of this first part.

**KEYWORDS:** Simulation, hydraulics, source systems, pumping, field wells

## 01 INTRODUCCIÓN

La simulación hidráulica de los sistemas fuentes por bombeo en régimen permanente consiste en obtener los caudales circulantes por las tuberías y la carga en los nudos del sistema mediante las ecuaciones de equilibrio del sistema (ecuación de conservación de la masa, o de continuidad y la ecuación de conservación de la energía) a partir de conocer: consumo puntual en los nodos (si los hubiera), la carga piezométrica en al menos un nudo, y las características relevantes de las conducciones (diámetro, rugosidad y longitud) y del resto de los elementos del sistema (bombas, válvulas, accesorios, etc.) (Cabrera 2009).

Mediante el proceso de simulación se pueden evaluar las respuestas de los sistemas fuentes por bombeo para determinadas condiciones de funcionamiento. Existen varios métodos para realizar el proceso de simulación en los sistemas fuentes por bombeo, en el cual se incluyen los campos de pozos (sistema ramificado interconectado multinodal), los cuales pueden agruparse en varios grupos: métodos basados en el método de Newton-Raphson; métodos basados en la teoría de Hardy-Cross; métodos basados en la teoría lineal; métodos basados en formulaciones topológicas de la red (Método del Gradiente); método de iteración en el nudo; método de la Bomba Virtual; entre otros (Fuertes et al 2002) (Martínez y Riaño 2025).

En la primera parte de una serie de artículos sobre esta temática, se expuso el método de iteración en el nudo, aplicado a un ejemplo práctico bastante común en la práctica ingenieril (Martínez y Riaño 2025). En esta segunda parte, el objetivo de este trabajo se centra en el desarrollo del último de los referidos métodos, el método de la Bomba Virtual. Este es un procedimiento de cálculo sencillo y práctico, recomendable para aquellos casos donde haya bombas rotodinámicas conectadas en paralelo, cuando las condiciones de instalación y/o características hidráulicas de las bombas acopladas no son las mismas (Caso 4, caso general) (Martínez y Riaño 2010).

## 02 DESARROLLO

El método de la Bomba Virtual, aunque resulta ser un procedimiento más sencillo que los métodos iterativos mencionados anteriormente, ha sido poco estudiado y aplicado. El concepto de bombas virtuales simplifica el cálculo hidráulico de los puntos reales de operación y en general la comprensión física del problema. Si para un sistema de bombeo dado se toma como curva característica de la bomba virtual una que incluya tanto la tubería de succión como la de impulsión hasta el punto de descarga, se tendría que la longitud del sistema contra el cual se bombearía sería cero y las pérdidas de carga correspondientes, nulas. Consecuentemente la curva característica de este sistema estará dada simplemente por los valores de altura estática versus caudal (Galvis y Castilla 1993).

Las bombas rotodinámicas operando en paralelo se influyen mutuamente: el caudal, la carga, la potencia y la eficiencia de cada una de ellas depende esencialmente de los regímenes de carga individuales de las bombas que funcionan conjuntamente. Los casos de operación para el trabajo de bombas rotodinámicas en paralelo son (Pardo y Ruiz 1980, Martínez 2011):

- **Caso 1:** bombas de iguales características hidráulicas, operando contra sistemas de tuberías iguales hasta el punto donde comienza la tubería común de impulsión (nudo). Para este caso, se cumplen las condiciones planteadas apuntadas anteriormente, es decir, las bombas estarán operando contra la misma carga, por tanto, se cumplirá perfectamente que se sumen los gastos para cargas iguales

- **Caso 2:** bombas de iguales características hidráulicas, operando contra sistemas de tuberías diferentes hasta el punto donde comienza la tubería común de impulsión (nodo). Para este particular, como los sistemas de tuberías son diferentes hasta el punto de unión de las tuberías de descarga secundarias de las bombas, se puede afirmar que estas bombas no están operando contra la misma carga, pues, en definitiva, están operando contra sistemas diferentes.
- **Caso 3:** bombas de diferentes características hidráulicas, operando contra sistemas de tuberías iguales hasta el punto donde comienza la tubería común de impulsión (nodo). Para este escenario, se tiene que los sistemas de tuberías son iguales para cada bomba, pero, por tratarse de bombas diferentes, los gastos serán también diferentes, por consecuencia, las pérdidas que se producen en cada tramo hasta el punto de unión serán diferentes, siendo, por tanto, distintas las curvas de los sistemas individuales, implicando esto que las bombas estén operando contra cargas diferentes a la salida de las mismas.
- **Caso 4:** bombas de diferentes características hidráulicas, operando contra sistemas de tuberías diferentes hasta el punto donde comienza la tubería común de impulsión (nodo). Este es el llamado caso general, para el cual es evidente, por todo lo anteriormente expuesto en los casos 2 y 3, que las bombas estarán operando contra diferentes cargas.

## TRATAMIENTO ANALÍTICO DE LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LAS BOMBAS ROTODINÁMICAS ACOPLADAS EN PARALELO

Las ecuaciones que modelan las tres curvas características de diseño de las bombas rotodinámicas acopladas en paralelo para el caso con características hidráulicas iguales son (Turiño 1996, Martínez 2011):

$$\text{Curva carga-capacidad (paralelo), (HP-Q): } H_p = A \pm \frac{B}{n_b} Q - \frac{C}{n_b^2} Q^2 \quad (1)$$

donde: HP: carga que desarrollan las bombas acopladas en paralelo, (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<sup>2</sup>), (s<sup>2</sup>/m<sup>5</sup>) respectivamente; Q: caudal impulsado por la combinación de las bombas en paralelo, (m<sup>3</sup>/s) y n<sub>b</sub>: número de bombas trabajando en paralelo.

$$\text{Curva potencia-capacidad (paralelo), (PP-Q): } P_p = D n_b \pm E Q \mp \frac{F}{n_b} Q^2 \quad (2)$$

donde: PP: potencia absorbida por las bombas trabajando en paralelo, (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·kW/m<sup>3</sup>), (s<sup>2</sup>·kW/m<sup>6</sup>) respectivamente.

$$\text{Curva eficiencia-capacidad (paralelo), (ηP-Q): } \eta_p = \frac{G}{n_b} Q - \frac{H}{n_b^2} Q^2 \quad (3)$$

donde: ηP: eficiencia de la combinación de bombas en paralelo, (adim.) y G y H: coeficientes del polinomio representativo de la curva η-Q, (s/m<sup>3</sup>), (s<sup>2</sup>/m<sup>6</sup>) respectivamente.

El comportamiento de la NPSHr de las bombas no cambia cuando son colocadas en serie o en paralelo, ya que por definición es una variable que caracteriza la capacidad de succión de una bomba y por lo tanto es independiente del tipo de acople.

### MÉTODO DE LAS BOMBAS VIRTUALES

En la práctica cotidiana se han utilizado diferentes procedimientos para determinar los puntos de operación de cada una de las bombas que trabajan, bien sea individualmente o en paralelo y que descargan contra un mismo sistema principal de impulsión. Estos procedimientos se pueden resumir de la manera siguiente:

1. Las pérdidas de carga en la succión y en la impulsión secundaria de cada bomba (sin incluirle conducto o sistema principal de impulsión) son despreciadas para el cálculo de la curva característica del sistema de tuberías.
2. Despreciar las diferencias en las pérdidas de carga que puedan existir en la impulsión secundaria y succión de las bombas e incluir las pérdidas de carga que se consideren importantes en esta parte de la instalación para el cálculo de la curva característica del sistema de tuberías de impulsión principal.

Ya que en los dos criterios anteriores se consideran iguales las pérdidas en la parte del sistema de conductos propios de cada máquina, se tiene entonces que, si las bombas trabajan en paralelo y elevan desde el mismo nivel en la succión, ellas deberán trabajar necesariamente contra la misma carga total. Es de anotar que procedimientos de cálculo basados en los criterios anteriores, particularmente en el segundo, producen buenos resultados para algunos problemas prácticos, especialmente cuando las pérdidas de carga en los conductos propios de cada bomba son pequeñas comparadas con las que se presentan en la tubería de descarga principal y por lo tanto no determinan la forma de la curva característica del sistema contra el cual se bombea (Castilla y Galvis 1993).

Conceptualmente, las bombas virtuales son máquinas imaginarias que carecen de tuberías de succión e impulsión secundarias. Estas bombas están formadas por la bomba real suministrada por el fabricante y todos los accesorios y tuberías hasta el punto de unión con la tubería de impulsión principal. Estos equipos se caracterizan por trabajar siempre contra la misma carga total cuando operan en paralelo, sin que para conseguirlo se requieran suposiciones que puedan implicar soluciones solo aproximadas, como sucedería con los criterios anteriores. Este concepto de bombas virtuales simplifica grandemente el cálculo hidráulico de los puntos reales de operación y en general la comprensión física del problema (Martínez y Riaño 2024).

Si para un sistema de bombeo dado se toma como curva característica de la bomba virtual una que incluya tanto la tubería de succión como la de impulsión hasta el punto de descarga, se tendría que la longitud del sistema contra el cual se bombearía sería cero y las pérdidas de carga correspondientes, nulas. Consecuentemente la curva característica de este sistema estaría dada simplemente por los valores de carga versus caudal (Martínez and Riaño 2025).

Técnicamente hablando, las bombas virtuales son una analogía en su comportamiento hidráulico a la instalación de un diafragma entre la brida de impulsión de una bomba rotodinámica y la brida de la tubería de descarga. Hay que tener en cuenta que esto constituye un estrangulamiento puro cuyas pérdidas afectan directamente a la curva característica de carga-capacidad de la bomba. Cómo es conocido las pérdidas de presión (pérdidas de carga) debida al diafragma sigue una curva cuadrática

o parabólica, por lo cual la nueva curva característica de la bomba, al colocar el diafragma calibrado, difiere de la curva anterior en todos sus puntos por la caída la presión (Martínez and Riaño 2025).

Este método puede utilizarse para cualquiera de los cuatro esquemas de diseño de bombas trabajando en paralelo, en especial, se recomienda para el caso 4 (caso general). Como se ha apuntado, esta es una metodología de cálculo alternativa a los métodos numéricos para la simulación de los sistemas de bombeo, en específico para los sistemas fuentes por bombeo. Hidráulicamente, es un procedimiento para abordar el problema del funcionamiento de bombas rotodinámicas trabajando en paralelo en tuberías ramificadas con tramos de tubería independientes y comunes.

### PLANTEAMIENTO DEL MÉTODO DE LAS BOMBAS VIRTUALES

Tomando como referencia la figura 1, se aplica la ecuación de Bernoulli desde los niveles del agua en los depósitos de succión de cada bomba, hasta el punto A (nodo común o central del sistema fuente por bombeo), en donde existe una carga  $H_A$  (carga piezométrica en el nodo A) común a las conexiones entre las estaciones de bombeo  $B_1$  y  $B_2$  con el nodo A. En este caso, los caudales de las bombas individuales, se suman en este nodo, el comienzo del tramo común. Eso supone que los valores de las cargas totales de las bombas tienen que ser iguales en este punto (SIHI 2003).

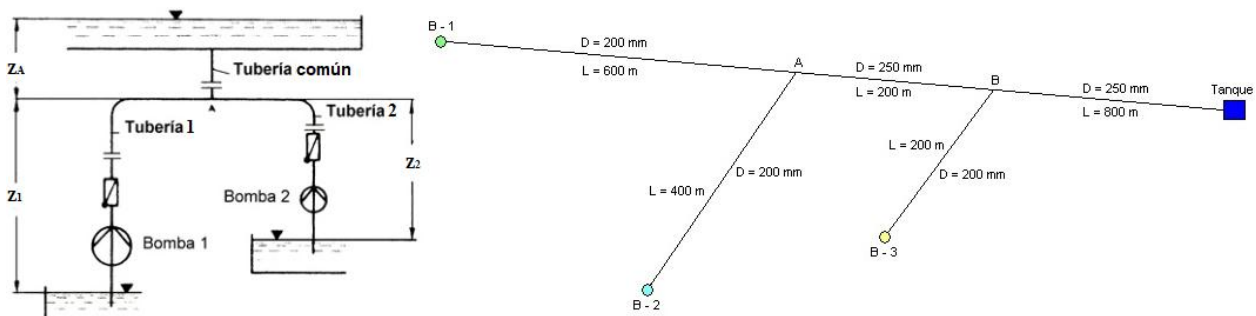


Figura 1. Funcionamiento de bombas rotodinámicas de diferentes características hidráulicas en paralelo con tramos de tubería independientes y comunes (Caso 4) (imagen izquierda). Ejemplo de esquema de operación de un sistema fuente por bombeo para un campo de pozos (imagen derecha).

La carga total en el nodo A se obtiene de las curvas características de  $H$  vs.  $Q$  de cada bomba individual, reduciéndolas según las curvas del sistema de cada sistema individual (tramos no comunes). Por el sistema  $B_1$ -A se obtiene:

$$H_1 \pm Z_1 = H_A + h_{fB1-A} \quad (4)$$

Mientras que por el ramal  $B_2$ -A:

$$H_2 \pm Z_2 = H_A + h_{fB2-A} \quad (5)$$

donde:  $H_1$ : carga total de la bomba 1, (m);  $H_2$ : carga total de la bomba 2, (m);  $H_A$ : carga en el nodo A, (m);  $Z_{s1}$ : altura del nivel del agua en el depósito de succión de la estación de la bomba 1, respecto a un plano de referencia establecido, (m);  $Z_{s2}$ : altura del nivel del agua en el depósito de succión de

la estación de la bomba 2, respecto a un plano de referencia establecido, (m);  $hf_{B1-A}$ : pérdidas de carga por el ramal  $B_1-A$ , (m) y  $hf_{B2-A}$ : pérdidas de carga por la línea  $B_2-A$  (m).

Las ecuaciones 4 y 5 dan las bases teóricas para analizar el comportamiento de las bombas que trabajan en paralelo. En su forma general y para cualquier número de bombas conectadas a un mismo nodo (para este ejemplo el nodo A), dichas ecuaciones se transforman para obtener la ecuación general de una bomba virtual  $B_{nA}$  (expresión 6). Gráficamente este proceso de transformación se puede observar en la figura 2.

$$H_A = H_n \pm Z_n - hf_{Bn-A} = H_{nA} \quad (6)$$

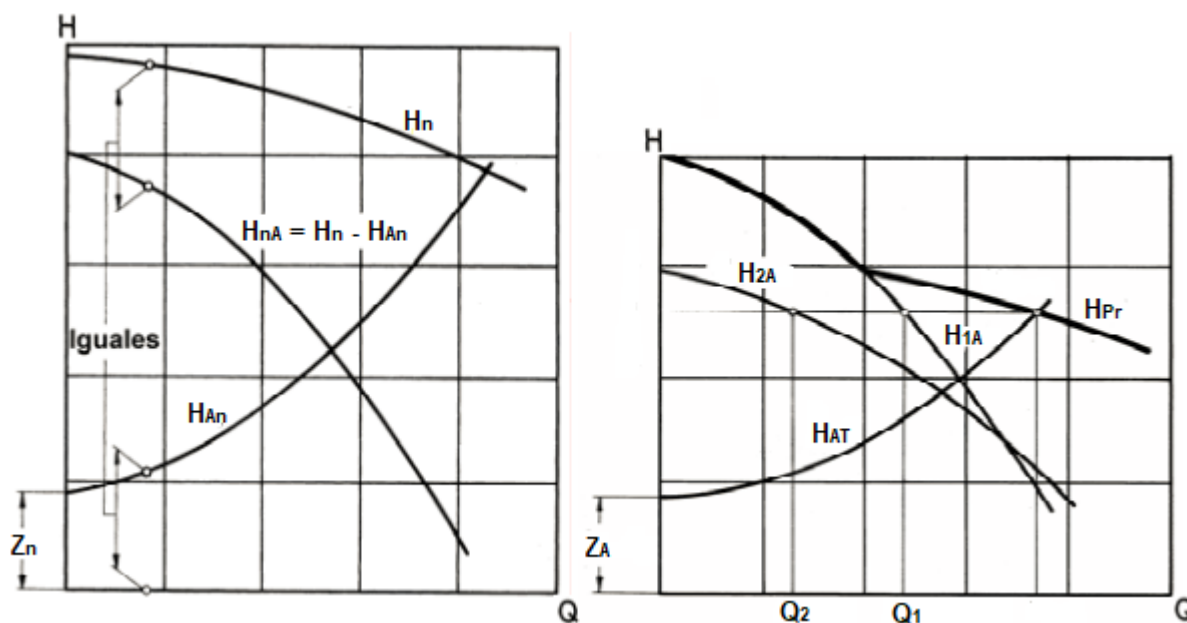


Figura 2. Curva característica reducida de una bomba  $n$  en el punto A (izquierda). Curva característica para la combinación en paralelo de dos bombas virtuales trabajando contra una tubería común (derecha).

Estas curvas virtuales o reducidas de carga-capacidad, se pueden acoplar en paralelo como se puede observar en la figura 2 (imagen de la derecha), sumando los caudales que se encuentran a la misma altura total. La intersección de esta curva de  $H_{Pr}-Q$  con la curva del sistema de tubería común (tubería 3 de la imagen izquierda de la figura 1), da el caudal total de circulación.

Los caudales individuales de cada bomba se obtienen por la intersección de la línea horizontal (imagen de la derecha de la figura 2) con las curvas características reducidas individuales. Con estos gastos luego se pueden obtener los valores de carga (reducida y real), potencia, eficiencia y  $NPSH_r$ , respectivamente para cada bomba.

A continuación, se detalla la aplicación del método de las bombas virtuales en un sistema fuente por bombeo multinodal compuesto por un campo de pozos (Martínez y Riaño 2024):

1. Determinar (gráficamente o analíticamente) la carga real de las  $n$  bombas para distintos caudales de referencia

2. Realizar la corrección dinámica (reducción de la carga real de las bombas debido a las pérdidas de carga en las tuberías del sistema individual de cada bomba) para cada bomba. También se puede hacer de forma gráfica o analítica
3. Calcular la corrección estática, la cual se obtiene de la diferencia entre los niveles del agua que existen en cada depósito de succión y el nivel virtual establecido para el sistema hidráulico general,  $Z_{sv}$ . Este último, podría calcularse de varias formas: como un promedio de los niveles de agua de todos los depósitos de succión del sistema de bombeo, mediante la fijación de un valor fijo de  $Z_{sv}$ , el cual pudiera ser el valor más pequeño de todos los niveles, el mayor, o el que se decidiera establecer como patrón de las  $n$  bombas. La desventaja de la primera opción, es que sería necesario computar  $n$  correcciones estáticas, mientras que, para las otras tres variantes, el número de correcciones estáticas a realizar sería  $n-1$ . Sin embargo, desde el punto de vista de la comodidad de los cálculos, esta última elección sería la mejor variante. Si bien, por una cuestión de mayor agilidad en los cálculos y una mejor comprensión de la idea conceptual del procedimiento, se acostumbra a tomar un valor único del nivel virtual de succión, bien pueden tomarse varios en función de cada subsistema. En ese caso, la notación que se establecería para los niveles virtuales de succión de cada subsistema sería  $Z_{vNSn}$ . Tomando como ejemplo el campo de pozos de la figura 1-, se tendrían  $Z_{vNSA}$  (para el subsistema B-1, B-2 y el nodo secundario A) y  $Z_{vNSB}$  (para el subsistema B-3, nodo secundario A y nodo principal B).
4. Computar para cada bomba, la carga virtual correspondiente a cada caudal de referencia según la siguiente expresión:

$$H_{nN} = H_n - hf_n - (Z_{sv} - Z_n) \quad (7)$$

Donde:  $H_{nN}$ : carga virtual de la bomba  $n$ , (m);  $H_n$ : carga real de la bomba  $n$ , (m);  $hf_n$ : pérdidas de carga en el sistema individual de la bomba  $n$ , (m);  $Z_{sv}$ : cota piezométrica del nivel virtual establecido para el sistema de bombeo general, (m), y  $Z_{sn}$ : cota del nivel del agua en el depósito de succión (nivel dinámico en el pozo) de la estación de la bomba  $n$ , (m).

5. Obtener (gráficamente o analíticamente) las curvas características carga-capacidad de las bombas virtuales  $B_{nN}$  en el nodo
6. Combinar (gráficamente o analíticamente) en paralelo las  $n$  bombas virtuales para obtener la bomba equivalente virtual,  $B_{1-n}$ , en el nodo.

Conceptualmente, una vez realizado este último paso, se tendría en el nodo (ejemplo: nodo A para la figura 1 (imagen de la izquierda)) una estación de bombeo virtual, donde estarán instaladas las  $n$  bombas virtuales con su equivalente virtual en paralelo, cuya cota del nivel del agua en el depósito de succión será el nivel virtual establecido para el sistema,  $Z_{sv}$ .

Tomando como ejemplo la imagen de la izquierda de la figura 1, el sistema de bombeo se simplificaría a un esquema de estación de bombeo virtual-tubería-depósito de descarga. Se pudiera reestructurar más el sistema realizando la corrección dinámica a la combinación de las bombas virtuales en paralelo,  $B_{1-n}$  a partir de la tubería común. En teoría, esto sería equivalente a tener una estación de bombeo con una bomba virtual,  $B_{1-n-T}$  que estuviera acoplada al tanque o depósito de succión (longitud de la tubería común igual a cero).

En cuanto a la notación de las bombas virtuales durante el proceso, por una cuestión práctica, conviene apoyarse en el enfoque propuesto por Martínez y Riaño (2024), de utilizar una codificación

de forma análoga a la clasificación hidrológica numeral de los ríos. En este sentido, se formula la siguiente notación general:  $H^m_{1-n}$ ; donde el superíndice  $m$ : representa la cantidad de virtualizaciones que se ha realizado hasta un nodo específico, mientras que el subíndice  $1-n$ , representa la cantidad y las bombas específicas que han participado en el proceso de virtualización hasta ese momento. Se recomienda este criterio de notación para grandes sistemas de campos de pozos con varios nodos.

Para una mejor comprensión del procedimiento metodológico para la aplicación del Método de las bombas virtuales, se aplicará a un ejemplo de un sistema fuente por bombeo como el ilustrado en la imagen de la izquierda de la figura 1.

### EJEMPLO DE APLICACIÓN PARA UN SISTEMA FUENTE POR BOMBEO MULTINODAL (CAMPO DE POZOS)

Como información del sistema fuente por bombeo se tiene que el servicio de abasto será continuo durante las 24 horas con un caudal constante. En la tabla 1 se brinda información sobre las características hidráulicas del sistema fuente por bombeo, compuesto por un campo de pozos como el que se ilustra en la figura 1. La cota piezométrica en la salida de la tubería de descarga en el tanque de regulación es  $Z_t = 50,00$  m. Se utilizarán tuberías polietileno de alta densidad (PEAD) para todas las tuberías del sistema fuente por bombeo. La rugosidad absoluta del material de PEAD es de  $2,5 \cdot 10^{-6}$  m. La presión nominal de diseño de dichas tuberías será de 10 atm (PN 10). Se ha tomado como valor indicativo para el diseño y la operación del sistema, un rango de velocidad recomendable de  $1 \div 1,8$  m/s (INRH 2006). Se plantea un valor de la viscosidad cinemática de  $10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s.

Tabla 1. Información de las características hidráulicas del campo de pozos (Ver figura 1).

| Caudal (L/s)                                          |        | Longitud tuberías (m)                     |         | Cotas y niveles dinámicos (m)                 |       |
|-------------------------------------------------------|--------|-------------------------------------------|---------|-----------------------------------------------|-------|
| Caudal de diseño del sistema fuente                   | 250,00 | Conductora maestra $CM$ o principal $CP$  | 5000,00 | Nodo principal $NP$ o central $NC$ , $Z_{NP}$ | 30,00 |
| Caudal de diseño de la bomba 1                        | 60,00  | Conductora secundaria 1 $CS_1$            | 3000,00 | Nodo secundario 1 $NS_1$ , $Z_{NS1}$          | 23,00 |
| Caudal de diseño de la bomba 2                        | 60,00  | Conductora secundaria 2 $CS_2$            | 2000,00 | Nodo secundario 2 $NS_2$ , $Z_{NS2}$          | 25,00 |
| Caudal de diseño de la conductora secundaria 1 $CS_1$ | 120,00 | Tubería de impulsión secundaria 1 $TIS_1$ | 1000,00 | En el pozo 1, $Z_{S1}$                        | 10,00 |
| Caudal de diseño de la bomba 3                        | 70,00  | Tubería de impulsión secundaria 2 $TIS_2$ | 900,00  | En el pozo 2, $Z_{S2}$                        | 12,00 |
| Caudal de diseño de la bomba 4                        | 60,00  | Tubería de impulsión secundaria 3 $TIS_3$ | 780,00  | En el pozo 3, $Z_{S3}$                        | 7,00  |

| Caudal (L/s)                                                   |                  | Longitud tuberías (m)                              |                   | Cotas y niveles dinámicos (m) |                   |                   |
|----------------------------------------------------------------|------------------|----------------------------------------------------|-------------------|-------------------------------|-------------------|-------------------|
| Caudal de diseño de la conductora secundaria 2 CS <sub>2</sub> | 130,00           | Tubería de impulsión secundaria 4 TIS <sub>4</sub> | 500,00            | En el pozo 4, Z <sub>S4</sub> |                   | 8,00              |
| Diámetros de las tuberías del sistema hidráulico (m)           |                  |                                                    |                   |                               |                   |                   |
| D <sub>CM</sub>                                                | D <sub>CS1</sub> | D <sub>CS2</sub>                                   | D <sub>TIS1</sub> | D <sub>TIS2</sub>             | D <sub>TIS3</sub> | D <sub>TIS4</sub> |
| 0,5552                                                         | 0,3524           | 0,3966                                             | 0,2776            | 0,2776                        | 0,2776            | 0,2776            |

Se presentan los polinomios representativos de la curva característica de carga-capacidad, ajustadas a una ecuación de grado 2 como el propuesto por la expresión (1), para las cuatro bombas rotodinámicas, siendo iguales las bombas 1 y 2 ( $Q$  en m<sup>3</sup>/s y  $H$  en m).

$$\text{Bombas 1 y 2: } H_{1,2} = 85,989 - 146,46Q - 4087,63Q^2 \quad (8)$$

$$\text{Bomba 3: } H_3 = 88,304 - 86,643Q - 4692,857Q^2 \quad (9)$$

$$\text{Bomba 4: } H_4 = 73,760 - 22,276Q - 4782,313Q^2 \quad (10)$$

Aplicando los pasos del 1 al 4 descritos en la metodología de las bombas virtuales, se obtienen los resultados mostrados en la tabla 2. Se ha decidido trabajar con la notación propuesta por Martínez y Riaño () para nombrar las cargas virtuales durante el proceso. Las pérdidas de carga se calcularán a partir de la ecuación de Darcy-Weisbach, con el coeficiente de fricción,  $f$  determinado por la fórmula de Swamee-Jain dentro de sus límites de aplicación:

$$hf = 0,0826f \frac{L_{eq}}{D^5} Q^2 \quad (11)$$

Donde:  $hf$ : pérdidas de carga en la conducción, (m);  $f$ : coeficiente de fricción de la tubería, (adim.);  $L_{eq}$ : longitud equivalente del sistema, (m);  $D$ : diámetro interior de la tubería, (m), y  $Q$ : caudal de circulación, (m<sup>3</sup>/s).

$$f = \frac{0,25}{\left[ \log \left( \frac{\epsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{N_R^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (12)$$

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

$$N_R = \frac{vD}{\nu} = \frac{4Q}{\pi D \nu} \quad (13)$$

Dónde:  $N_R$ : número de Reynolds que caracteriza el flujo en la conducción, (adim.);  $v$ : velocidad media de circulación en la tubería, (m/s);  $D$ : diámetro interior de la tubería, (m);  $\nu$ : viscosidad cinemática del fluido, (m<sup>2</sup>/s), y  $Q$ : caudal de circulación en la conducción, (m<sup>3</sup>/s).

En cuanto a la determinación de la corrección estática para el sistema hidráulico general, lo primero será definir el nivel virtual,  $Z_{sv}$  que se establecerá para el campo de pozos. Conceptualmente, como se apuntado arriba, se pudiera fijar una cota virtual de succión por subsistemas, pero resulta más cómodo en función de los cálculos, utilizar un solo valor para el sistema hidráulico general. De las variantes posibles, se propone que sea el promedio de las cotas de los niveles dinámicos en los cuatro pozos, o sea, 9,250 m. Por lo tanto, las correcciones estáticas quedarían calculadas como:

- ( $Z_{sv} - Z_1 = 9,250 - 10,000 = -0,750$  m) y ( $Z_{sv} - Z_2 = 9,250 - 12,000 = -2,750$  m) para las bombas 1 y 2 (subsistema 1)
- ( $Z_{sv} - Z_3 = 9,250 - 7,000 = 2,250$  m) y ( $Z_{sv} - Z_4 = 9,250 - 8,000 = 1,250$  m) para las bombas 3 y 4 (subsistema 1)

Tabla 2. Datos de las curvas características carga-capacidad de las bombas (reales y sus virtuales).

| Caudal | Cargas de las bombas reales |              |              |              | Pérdidas de carga en el sistema de tuberías individual de cada bomba |                    |                    |                    | Cargas de las bombas virtuales (en el nodo secundario 1) |                |                |                |
|--------|-----------------------------|--------------|--------------|--------------|----------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|
|        | $H_1$<br>(m)                | $H_2$<br>(m) | $H_3$<br>(m) | $H_4$<br>(m) | $h_{fTIS1}$<br>(m)                                                   | $h_{fTIS2}$<br>(m) | $h_{fTIS3}$<br>(m) | $h_{fTIS4}$<br>(m) | $H^1_1$<br>(m)                                           | $H^1_2$<br>(m) | $H^1_3$<br>(m) | $H^1_4$<br>(m) |
| 0,000  | 85,989                      | 85,989       | 88,304       | 73,760       | 0,000                                                                | 0,000              | 0,000              | 0,000              | 86,739                                                   | 88,739         | 86,054         | 72,510         |
| 0,010  | 84,116                      | 84,116       | 86,968       | 73,059       | 0,106                                                                | 0,096              | 0,083              | 0,053              | 84,759                                                   | 86,770         | 84,635         | 71,756         |
| 0,020  | 81,425                      | 81,425       | 84,694       | 71,402       | 0,366                                                                | 0,329              | 0,285              | 0,183              | 81,809                                                   | 83,846         | 82,159         | 69,969         |
| 0,030  | 77,916                      | 77,916       | 81,481       | 68,788       | 0,757                                                                | 0,682              | 0,591              | 0,379              | 77,909                                                   | 79,985         | 78,640         | 67,159         |
| 0,040  | 73,590                      | 73,590       | 77,330       | 65,217       | 1,273                                                                | 1,145              | 0,993              | 0,636              | 73,068                                                   | 75,195         | 74,087         | 63,331         |
| 0,050  | 68,447                      | 68,447       | 72,240       | 60,690       | 1,906                                                                | 1,715              | 1,487              | 0,953              | 67,291                                                   | 69,482         | 68,503         | 58,487         |
| 0,060  | 62,486                      | 62,486       | 66,211       | 55,207       | 2,653                                                                | 2,388              | 2,070              | 1,327              | 60,583                                                   | 62,848         | 61,892         | 52,630         |
| 0,070  | 55,707                      | 55,707       | 59,244       | 48,767       | 3,512                                                                | 3,161              | 2,739              | 1,756              | 52,946                                                   | 55,297         | 54,255         | 45,762         |
| 0,080  | 48,111                      | 48,111       | 51,338       | 41,371       | 4,479                                                                | 4,031              | 3,493              | 2,239              | 44,383                                                   | 46,831         | 45,595         | 37,882         |
| 0,090  | 39,698                      | 39,698       | 42,494       | 33,018       | 5,552                                                                | 4,997              | 4,331              | 2,776              | 34,896                                                   | 37,451         | 35,913         | 28,992         |
| 0,100  | 30,467                      | 30,467       | 32,711       | 23,709       | 6,730                                                                | 6,057              | 5,250              | 3,365              | 24,486                                                   | 27,159         | 25,211         | 19,094         |
| 0,110  | 20,418                      | 20,418       | 21,990       | 13,444       | 8,012                                                                | 7,211              | 6,249              | 4,006              | 13,156                                                   | 15,957         | 13,490         | 8,188          |

En el paso 5, se obtienen por la vía analítica las ecuaciones polinómicas que caracterizan las curvas características carga-capacidad de las bombas virtuales  $B^m_n$  en el nodo. En esta etapa del procedimiento se presentan las ecuaciones de las bombas virtuales de las bombas originales y las resultantes de la virtualización de las expresiones de las combinaciones en paralelo. Los polinomios representativos de la combinación de las bombas virtuales en paralelo se muestran como parte del paso 6 (ecuaciones 14-17).

$$\text{Bomba 1: } H^1_1 = 86,789 - 157,381Q - 4654,878Q^2 \quad (14)$$

$$\text{Bomba 2: } H^1_2 = 88,784 - 156,289Q - 4598,153Q^2 \quad (15)$$

$$\text{Bomba 3: } H^1_3 = 86,093 - 95,161Q - 5135,311Q^2 \quad (16)$$

$$\text{Bomba 4: } H^1_4 = 72,535 - 27,737Q - 5065,937Q^2 \quad (17)$$

En este último paso, se procede a combinar las bombas virtuales en paralelo a través de la secuencia de los nodos secundarios hacia el nodo principal. Se realizará esta operación por la vía analítica, como en el paso anterior. En la tabla 3 se presentan los datos del proceso del acople en paralelo de las bombas virtuales en los subsistemas 1 y 2 respectivamente. En la misma, solo aparecen reflejadas el tramo de la curva de la combinación efectiva de las dos bombas en paralelo.

Tabla 3. Combinación de las bombas rotodinámicas virtuales en paralelo para los subsistemas 1 y 2.

| $H_{1-2}^1$<br>(m) | $Q_{v1}$<br>(m <sup>3</sup> /s) | $Q_{v2}$<br>(m <sup>3</sup> /s) | $Q_{vP}$<br>(m <sup>3</sup> /s) | $H_{3-4}^1$<br>(m) | $Q_{v3}$<br>(m <sup>3</sup> /s) | $Q_{v4}$<br>(m <sup>3</sup> /s) | $Q_{vP}$<br>(m <sup>3</sup> /s) |
|--------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 83,846             | 0,013                           | 0,020                           | 0,033                           | 68,503             | 0,026                           | 0,050                           | 0,076                           |
| 79,985             | 0,025                           | 0,030                           | 0,055                           | 61,892             | 0,043                           | 0,060                           | 0,103                           |
| 75,195             | 0,036                           | 0,040                           | 0,076                           | 54,255             | 0,057                           | 0,070                           | 0,127                           |
| 69,482             | 0,046                           | 0,050                           | 0,096                           | 45,595             | 0,070                           | 0,080                           | 0,150                           |
| 62,848             | 0,057                           | 0,060                           | 0,117                           | 35,913             | 0,082                           | 0,090                           | 0,172                           |
| 55,297             | 0,067                           | 0,070                           | 0,137                           | 25,211             | 0,094                           | 0,100                           | 0,194                           |
| 46,831             | 0,077                           | 0,080                           | 0,157                           | 13,490             | 0,105                           | 0,110                           | 0,215                           |
| 37,451             | 0,087                           | 0,090                           | 0,177                           | 0,751              | 0,116                           | 0,120                           | 0,236                           |
| 27,159             | 0,098                           | 0,100                           | 0,198                           | -                  | -                               | -                               | -                               |
| 15,957             | 0,108                           | 0,110                           | 0,218                           |                    |                                 |                                 |                                 |
| 3,846              | 0,118                           | 0,120                           | 0,238                           |                    |                                 |                                 |                                 |

Los polinomios representativos de la combinación en paralelo de las bombas rotodinámicas de los dos subsistemas, se presentan a continuación:

$$\text{Subsistema 1 (Bombas 1 y 2 – NS}_1\text{ – NP): } H_{1-2}^1 = 87,767 - 78,396Q - 1156,246Q^2 \quad (18)$$

$$\text{Subsistema 2 (Bombas 3 y 4 – NS}_2\text{ – NP): } H_{3-4}^1 = 76,747 - 7,616Q - 1329,363Q^2 \quad (19)$$

A partir de aquí, comienza un proceso de reducción virtual del sistema hidráulico general. El sistema simplificado que vendría quedando será el integrado por: nodos secundarios 1 y 2 – nodo principal – tanque de descarga (subsistema 3). La analogía vendría dada por la consideración de que, en los nodos secundarios existieran estaciones de bombeo cuyas bombas virtuales tendrían curvas características de carga-capacidad que vienen representadas por las ecuaciones 18 y 19, las cuales aportarían al nodo principal y de este al depósito de descarga. De esta forma, se van “reduciendo” los subsistemas que se encuentran aguas arriba de ambos nodos secundarios, o sea, se produce un proceso de “simplificación virtual” del sistema hidráulico general.

En la tabla 4 se presentan los resultados del proceso de virtualización de las bombas virtuales ubicadas en los nodos secundarios,  $B_{1-2}^1$  y  $B_{3-4}^1$  (bombas virtuales resultado de la combinación en paralelo de las bombas virtuales 1 y 2 y 3 y 4, respectivamente). En la tabla 5 se muestran los valores del procedimiento de la combinación en paralelo de las bombas virtuales  $B_{1-2}^1$  y  $B_{3-4}^1$  obtenidas en la

tabla anterior. En esta se presentan los valores correspondientes al tramo de la curva de la combinación práctica de las dos bombas virtuales en paralelo.

Tabla 4. Datos de las curvas características de las bombas virtuales B11-2 y B13-4 y su proceso de virtualización hasta el nodo principal.

| Caudal                          | Caudal                          | Cargas de las bombas virtuales (en los nodos secundarios) |             | Pérdidas de carga en el sistema de tuberías individual de cada bomba |            | Cota del nivel dinámico en el pozo (virtual) |            | Cota del nivel virtual | Cargas de las bombas virtuales (en el nodo principal) |             |
|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------|----------------------------------------------------------------------|------------|----------------------------------------------|------------|------------------------|-------------------------------------------------------|-------------|
|                                 |                                 | $H^2_{1-2}$                                               | $H^2_{3-4}$ | $h_{fcs1}$                                                           | $h_{fcs2}$ | $Z_{vNS1}$                                   | $Z_{vNS2}$ |                        | $H^2_{1-2}$                                           | $H^2_{3-4}$ |
| $Q_{vp}$<br>(m <sup>3</sup> /s) | $Q_{vp}$<br>(m <sup>3</sup> /s) | (m)                                                       | (m)         | (m)                                                                  | (m)        | (m)                                          | (m)        | (m)                    | (m)                                                   | (m)         |
| 0,033                           | 0,076                           | 83,846                                                    | 68,503      | 0,876                                                                | 1,446      | 9,250                                        | 9,250      | 9,250                  | 82,970                                                | 67,057      |
| 0,055                           | 0,103                           | 79,985                                                    | 61,892      | 2,147                                                                | 2,543      | 9,250                                        | 9,250      | 9,250                  | 77,838                                                | 59,348      |
| 0,076                           | 0,127                           | 75,195                                                    | 54,255      | 3,850                                                                | 3,734      | 9,250                                        | 9,250      | 9,250                  | 71,345                                                | 50,521      |
| 0,096                           | 0,150                           | 69,482                                                    | 45,595      | 5,959                                                                | 5,045      | 9,250                                        | 9,250      | 9,250                  | 63,522                                                | 40,550      |
| 0,117                           | 0,172                           | 62,848                                                    | 35,913      | 8,456                                                                | 6,483      | 9,250                                        | 9,250      | 9,250                  | 54,392                                                | 29,431      |
| 0,137                           | 0,194                           | 55,297                                                    | 25,211      | 11,330                                                               | 8,049      | 9,250                                        | 9,250      | 9,250                  | 43,967                                                | 17,163      |
| 0,157                           | 0,215                           | 46,831                                                    | 13,490      | 14,572                                                               | 9,743      | 9,250                                        | 9,250      | 9,250                  | 32,259                                                | 3,747       |
| 0,177                           | 0,236                           | 37,451                                                    | 0,751       | 18,173                                                               | 11,565     | 9,250                                        | 9,250      | 9,250                  | 19,278                                                | -10,814     |
| 0,198                           |                                 | 27,159                                                    |             | 22,129                                                               |            | 9,250                                        | 9,250      | 9,250                  | 5,031                                                 |             |
| 0,218                           |                                 | 15,957                                                    |             | 26,434                                                               |            | 9,250                                        | 9,250      | 9,250                  | -10,476                                               |             |
| 0,238                           |                                 | 3,846                                                     |             | 31,083                                                               |            | 9,250                                        | 9,250      | 9,250                  | -27,238                                               |             |

Tabla 5. Combinación en paralelo de las bombas rotodinámicas virtuales B11-2 y B13-4.

| $H^2_{1-4}$ (m) | $Q_{v1-2}$ (m <sup>3</sup> /s) | $Q_{v3-4}$ (m <sup>3</sup> /s) | $Q_{v1-4}$ (m <sup>3</sup> /s) |
|-----------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 67,057          | 0,087                          | 0,076                          | 0,163                          |
| 63,522          | 0,096                          | 0,089                          | 0,186                          |
| 54,392          | 0,117                          | 0,117                          | 0,234                          |
| 43,967          | 0,137                          | 0,143                          | 0,280                          |
| 32,259          | 0,157                          | 0,167                          | 0,324                          |
| 19,278          | 0,177                          | 0,190                          | 0,368                          |
| 5,031           | 0,198                          | 0,213                          | 0,411                          |

Como resultado, se obtiene el polinomio característico de la combinación en paralelo de dichas bombas virtuales:

$$\text{Subsistema 3 (NS}_1 \text{ y NS}_2 \text{ – NP – T): } H^2_{1-4} = 81,099 - 20,558Q - 400,682Q^2 \quad (20)$$

En esta última etapa del proceso, se ha simplificado el sistema hidráulico general hasta el nodo principal. El sistema hidráulico equivalente final sería el de una estación de bombeo virtual cuya bomba tendría una curva de carga-capacidad representada por el polinomio de la ecuación (20), que

bombearía contra el tanque de descarga. A continuación, se procede a calcular el gasto de circulación por la conductora principal trabajando con las ecuaciones del sistema resultante (nodo principal – conductora – tanque de descarga) (21) y la representativa de la curva resultante en paralelo (20).

$$\text{Sistema (NP – T): } H_{\text{sist}} = 40,750 + K_{W-D}Q^2 \quad (21)$$

Otra variante para determinar dicho gasto, sería el de seguir aplicando el método de las bombas virtuales, aplicando otro proceso de reducción al sistema nodo principal – conductora – tanque de descarga. En este caso, primero se le restarían las pérdidas de carga en la conductora maestra a la ecuación (20), realizándose luego la corrección estática, restándole la diferencia entre las cotas piezométricas en la descarga del tanque de descarga y el valor de la cota virtual de succión establecida para el sistema. Por cualquiera de las dos variantes, el caudal total del sistema es:  $Q_{CM} = 0,264241 \text{ m}^3/\text{s} = 264,241 \text{ L/s}$  y la carga de operación  $47,711 \text{ m}$ .

Luego se procede a determinar los valores de los caudales que aportan cada bomba al sistema, así como las respectivas velocidades de circulación para cada una de las tuberías. Durante este proceso quedan calculadas las cotas piezométricas de los nodos en el sistema. Este proceso se puede realizar de forma gráfica como lo proponen Galguera (2015) y Martínez y Riaño () o de forma analítica, la cual se describe en este ejemplo.

Esta secuencia de cálculo se realizará desde aguas abajo hacia aguas arriba, o sea, realizando el proceso inverso de la metodología. En consecuencia, lo primero que se calculará, será la cota piezométrica del nodo principal del sistema hidráulico general. Para esto, se aplicará la ecuación de Bernoulli planteada desde el nodo principal hasta el depósito de descarga, según la expresión (22):

$$CP_{NP} = Z_t + hf_{CP} \quad (22)$$

Donde:  $CP_{NP}$ : cota piezométrica en el nodo principal del sistema hidráulico general, (m); cota piezométrica en la salida de la tubería de descarga en el tanque de regulación, (m), y  $hf_{CP}$ : pérdidas de carga en la conductora maestra, (m).

Trabajando con la ecuación (22), se obtiene primero unas pérdidas de carga para el gasto de circulación de  $264,241 \text{ L/s}$  de  $6,961 \text{ m}$ . La cota piezométrica del nodo principal será de  $56,961 \text{ m}$ . A continuación, se procede a calcular los caudales de cada una de las conductoras secundarias que tributan al nodo principal. Para esto, se trabajarán con las ecuaciones (23) y (24), que describen las curvas carga-capacidad virtuales resultantes del proceso de las virtualizaciones de las ecuaciones (18) y (19), respectivamente. Sustituyendo el valor de la carga de operación de  $H_{1-2}^2 = H_{3-4}^2 = 47,711 \text{ m}$  en ambas ecuaciones, se obtienen los respectivos gastos para cada subsistema:  $Q_{CS1} = 0,130071 \text{ m}^3/\text{s} = 130,071 \text{ L/s}$  y  $Q_{CS2} = 0,134111 \text{ m}^3/\text{s} = 134,111 \text{ L/s}$ , siendo la suma de estos:  $Q_{CP} = 0,264182 \text{ m}^3/\text{s} = 264,182 \text{ L/s}$ .

$$\text{Subsistema 1 (Bombas 1 y 2 – NS}_1\text{ – NP): } H_{1-2}^2 = 88,194 - 99,971Q - 1624,251Q^2 \quad (23)$$

$$\text{Subsistema 2 (Bombas 3 y 4 – NS}_2\text{ – NP): } H_{3-4}^2 = 77,020 - 17,333Q - 1500,290Q^2 \quad (24)$$

Con estos caudales, se pasa a calcular las cotas piezométricas de los nodos secundarios 1 y 2. Aplicando una ecuación análoga de la expresión (22) se obtienen las referidas cotas piezométricas:  $CP_{NS1} = 67,257 \text{ m}$  y  $CP_{NS2} = 61,061 \text{ m}$

$$CP_{NSn} = CP_{NP} + hf_{CSn} \quad (25)$$

Donde:  $CP_{NSn}$ : cota piezométrica en el nodo secundario  $n$  del sistema hidráulico general, (m), y  $hf_{CSn}$ : pérdidas de carga en la conductora secundaria  $n$ , (m).

Por último, se calculan los caudales que aportan cada una de las bombas hacia sus respectivos nodos secundarios. En este caso, cuando se llega a los nodos a los cuales tributan directamente las bombas, se puede determinar los gastos individuales de estas, mediante el mismo procedimiento utilizado para determinar los caudales en las conductoras secundarias, o de forma directa, aplicando la ecuación de Bernoulli entre los pozos de succión (estaciones de bombeo) y sus respectivos nodos receptores. A través de esta última alternativa, se procede a determinar los caudales individuales de cada bomba mediante la expresión (26). En la tabla 6 se presentan los valores de la solución general del sistema hidráulico.

$$Z_{sn} + H_{Bn} = Z_{sn} + A_n + B_n Q + C_n Q^2 = CP_{NSn} + hf_{TISn} \quad (26)$$

Tabla 6. Información hidráulica de la solución general del sistema hidráulico.

| Tubería     | $Q$<br>(L/s) | $V$<br>(m/s) | $N_R$<br>(adim.) | $f$<br>(adim.) | Cotas piezométricas<br>(m) |
|-------------|--------------|--------------|------------------|----------------|----------------------------|
| $TIS_1$     | 63,511       | 1,049        | 291299,51        | 0,014558       | $CP_{NS1}$ (m)             |
| $TIS_2$     | 66,548       | 1,099        | 305229,76        | 0,014434       | 67,257                     |
| $TIS_3$     | 72,944       | 1,205        | 334566,47        | 0,014198       | $CP_{NS2}$ (m)             |
| $TIS_4$     | 61,274       | 1,012        | 281041,01        | 0,014653       | 61,061                     |
| $CS_1$      | 130,071      | 1,333        | 469951,76        | 0,013347       | $CP_{NP}$ (m)              |
| $CS_2$      | 134,111      | 1,086        | 430549,16        | 0,013541       | 56,961                     |
| $CM$ o $CP$ | 264,241      | 1,091        | 605984,51        | 0,012734       | $CP_t = Z_t = 50,00$ m     |

### 03 CONCLUSIONES

El método de las bombas virtuales es un procedimiento práctico y de fácil implementación para realizar la simulación hidráulica de los sistemas fuentes por bombeo, en particular para aquellos integrados por campos de pozos. Se define como una bomba virtual, a aquella máquina imaginaria formada por la bomba real suministrada por el fabricante y todos los accesorios y tuberías que se encuentran hasta el punto de unión (nodo) con la tubería de impulsión. Este concepto de bombas virtuales simplifica grandemente el cálculo hidráulico de los puntos reales de operación y en general la comprensión física del problema. En este trabajo se realizó una introducción al método y sus principios hidráulicos fundamentales.

El procedimiento de virtualización se podría resumir de la manera siguiente: con la información de las curvas características carga-capacidad de las bombas y las curvas del sistema de tuberías desde las bombas hasta el punto de unión del sistema de tuberías, estas últimas se restan a las primeras, obteniéndose así las curvas características ajustadas de las bombas a la carga correspondiente al punto de unión de los sistemas de tuberías. Estas curvas “reducidas” hasta el nodo de aporte, son las curvas características carga-caudal virtual de las bombas virtuales. Después de haberse realizado este primer paso, entonces se puede aplicar el método convencional de sumar las curvas ajustadas ya que todas están referidas a la misma carga.

Luego, analizando el sistema en sentido inverso (desde el tanque de compensación hasta las estaciones de bombeo) se obtiene el caudal que entrega cada una de las bombas de las estaciones de bombeo. Se presenta el mismo ejemplo práctico planteado en la 1ra parte de este artículo, para ilustrar de una manera más eficiente dicha metodología, mostrando sus bondades y utilidad práctica en la simulación hidráulica de la operación de sistemas fuentes por bombeo.

## 07 REFERENCIAS

- 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, 3<sup>ra</sup> edición, ISBN 978-846-13-3949-5, Valencia, España.
- Castilla A. y Galvis G** (1993). "Bombas y estaciones de bombeo", Centro Inter-Regional de Abastecimiento y Remoción de Agua (CINARA)-Universidad del Valle, Ed. Ultragraf Editores, ISBN 978-777-98-6726-5, Cali, Colombia.
- Fuertes V. S et al.** (2002). "Modelación y diseño de redes de abastecimiento de agua", Editorial Grupo de Mecánica de los Fluidos, Universidad Politécnica de Valencia, 1<sup>ra</sup> edición, ISBN 84-89487-06-5, Valencia, España.
- Galguera C. L.** (2015). "Metodología para el diseño y simulación hidráulica de un sistema fuente por bombeo desde campo de pozos", Trabajo de diploma, Facultad de Ingeniería Civil, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría", Cujae, La Habana, Cuba.
- Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH)** (2006). "Instructivo para la utilización de Tuberías y Accesorios de PEAD", 63 pp., La Habana, Cuba
- 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.
- Martínez Y. y Riaño F.** (2010). "Características peculiares de la operación de bombas rotodinámicas en paralelo", Ciencias Técnicas Agropecuarias, 19 (2): 38-43, Universidad Agraria de La Habana "Fructuoso Rodríguez" (UNAH), ISSN 1010-2760, Mayabeque, Cuba.
- Martínez Y. y Riaño F.** (2024). "Método de las bombas rotodinámicas virtuales", Ingeniería Hidráulica, XLV (4): 55-67, Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", Cujae, ISSN 2788-6050, La Habana, Cuba.
- Martínez Y. y Riaño F.** (2025). "Simulación hidráulica de sistemas fuentes por bombeo por campos de pozos: 1ra Parte", Ingeniería Hidráulica, XLVI (1): 45-59, Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", Cujae, ISSN 2788-6050, La Habana, Cuba.
- Martínez Y. and Riaño F.** (2025). "Virtual rotodynamic pumps method", Journal Region-Water Conservancy, 8 (2): 151-161, ISSN 2630-4902, Singapur, Singapur.
- Pardo R. y Ruiz M. I.** (1980). "Algunas consideraciones sobre el funcionamiento de bombas en paralelo", *Revista Ingeniería Hidráulica*, 1 (1): 20-28, Instituto Superior Politécnico Superior "José Antonio Echeverría", La Habana, Cuba

**Sterling SIHI** (2003). “Principios Básicos para el Diseño de Instalaciones de Bombas Centrífugas”, (Manual técnico), 7<sup>th</sup> edition, Ed. Sterling Fluid Systems Group, Madrid, España, 2003.

**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 (UCLV), Santa Clara, Cuba.

#### **Conflicto de intereses**

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

#### **ORCID de los autores**

[Yaset Martínez Valdés](https://orcid.org/0000-0001-9770-022X) <https://orcid.org/0000-0001-9770-022X>

Participó en la elaboración del procedimiento metodológico para la aplicación del Método de las bombas virtuales, así como en el trabajo del procesamiento de los datos del caso de estudio, haciendo contribuciones en su análisis e interpretación. Participó en la búsqueda de referentes bibliográficos y en la redacción del trabajo.

[Félix Abelis Riaño Valle](https://orcid.org/0000-0002-9342-6064) <https://orcid.org/0000-0002-9342-6064>

Realizó contribuciones en el diseño de la investigación y en el análisis de los resultados del caso de estudio, así como en la búsqueda de información bibliográfica, revisión y redacción del trabajo en su versión final.

## Efectos sociales, ambientales y económicos en la implementación de una pequeña central hidroeléctrica en Colombia.

**ANDRES MAURICIO JOYA DELGADO**

EMAIL: andresjoya.uis@gmail.com

Departamento de Ingeniería Civil. Universidad Federal Fluminense.

**ORLANDO CELSO LONGO**

Departamento de Ingeniería Civil. Universidad Federal Fluminense.

**LUCIANE ALCOFORADO**

Academia da Força Aérea: Pirassununga.

### RESUMEN

El presente artículo tiene como finalidad realizar una recopilación bibliográfica de artículos científicos, libros, tesis e informes como base documental, donde se tenga presente los impactos sociales, ambientales y económicos generados por los proyectos de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH) en Colombia. Se escogieron documentos recientes que son relevantes en la temática propuesta y los datos se extrajeron de los informes gubernamentales e independientes más actuales. Serán examinadas en detalle las pico centrales (Potencia < 5 KW). Así la contribución del presente escrito es aportar teóricamente estableciendo una metodología clara y eficaz para beneficio de todos los actores implicados. La participación de la comunidad en la fase de estudios previos es fundamental para el éxito de la implementación de una PCH y se concluye que esta tecnología de bajo costo es ideal para electrificar zonas rurales en lugares aislados. Se propone un enfoque multidisciplinario analizando la tecnología y sus implicaciones sociales.

**PALABRAS  
CLAVES:**

Energías renovables, generación energía hidroeléctrica, pequeña central hidroeléctrica, impactos sociales, impactos ambientales.

Social, environmental and economic effects in the implementation of a small hydropower plant in Colombia.

### ABSTRACT

The purpose of this article is to conduct a bibliographic review of scientific articles, books, theses, and reports as a documentary basis, considering the social, environmental, and economic impacts generated by Small Hydropower Projects (SHP) in Colombia. Recent and relevant documents on the proposed topic were selected, and data were extracted from the most up-to-date governmental and independent reports. A detailed examination will be conducted on peak hydropower plants (Power < 5 kW). Thus, the contribution of this paper is to theoretically support the establishment of a clear and effective methodology for the benefit of all stakeholders involved. Community participation in the preliminary study phase is essential for the successful implementation of an SHP and it is concluded that this low-cost technology is ideal for electrifying rural areas in remote locations. A multidisciplinary approach is proposed, analyzing the technology and its social implications.

**KEYWORDS:**

Renewable energies, hydroelectric power generation, small hydroelectric power plant, socio-environmental impacts.



Febrero 2025-RECIBIDO

APROBADO-Diciembre 2026

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



## 01 INTRODUCCIÓN

El suministro de energía eléctrica es fundamental en una comunidad para garantizar su crecimiento económico y social. En este sentido, el uso de la energía Hidroeléctrica como una de las fuentes de mayor uso, se ha implantado de manera significativa en los últimos tiempos, por ser sistemas generadores de impactos sociales favorables y dependiendo de su escala, bajos impactos ambientales; es decir, que representan sistemas compatibles con la naturaleza que favorecen la economía así como también aportan en la reducción de deforestación, creación de empleo local y mejorando de la resiliencia energética en zonas aisladas (Acero y Sánchez, 2017). Es importante el estudio de las pico centrales, generadoras de menos de 5 KW, ya que pueden representar una alternativa real y asequible de electrificar viviendas o pequeñas comunidades aisladas de zonas rurales en Colombia.

En virtud de los problemas ambientales asociados al uso y extracción de los combustibles convencionales (carbón, petróleo y gas natural principalmente), como también a su alto costo, existe en el mundo una tendencia a la utilización de fuentes de energía renovables y de bajo costo. Acorde con Pautas ambientales sectoriales para un diseño ambientalmente sostenible solido (ESD)- Energía a pequeña escala, elaborado por (USAID, 2018), las fuentes de energía convencionales, y la demanda de seguridad energética, están impulsando las inversiones en eficiencia energética, energía renovable y tecnología de energía limpia. De acuerdo con el informe Energías renovables de (IDAE, 2020), donde propone que las energías renovables son recursos limpios y casi inagotables que proporciona la naturaleza. Además, este estudio es relevante en cuanto a la definición de la (ONU, 2015) y su objetivo 7 de desarrollo sostenible el cual propone garantizar el acceso de energía asequible, y no contaminante.

Según el informe (USAID, 2018), la energía renovable puede tener un gran número de beneficios, como el mayor acceso a energía en países en desarrollo, mejoras en salud pública, mitigación del cambio climático, etc. Sin embargo, para obtener esos beneficios, deben abordarse varias consideraciones de sostenibilidad en el diseño, como el costo, regulaciones en el país anfitrión, gobernanza ética y eficiente, y los desafíos que surgen durante la operación del proyecto.

Como todo proyecto, la producción de energía en una Pequeña Central Hidroeléctrica (PCH en adelante), también produce impactos ambientales y sociales asociados al desarrollo de este, los cuales pueden ser positivos como negativos. Dependiendo de las consideraciones de sostenibilidad establecidas en la formulación y desarrollo del proyecto es posible evitar en el futuro desenlaces negativos por la instalación de la PCH.

De acuerdo con (Osorio, 2017), una PCH trae consigo efectos positivos sobre el entorno en el que opera, como lo son la generación de empleo, la conexión de poblaciones alejadas a la red eléctrica del país, la mejora de la confiabilidad del sistema eléctrico en todo el territorio nacional, la generación de ingresos para los municipios vía impuestos y beneficios sociales para la región, a través de la construcción de una carretera, un centro de salud o un colegio por parte de los desarrolladores del proyecto. Estos promotores del desarrollo del proyecto deben tratar de analizar y explicar, de qué manera se pueden potencializar estas obras con el fin de determinar la mejor manera de compensar a la población afectada por la implementación del proyecto.

Según las estadísticas presentadas en el informe (REN21, 2023) el uso de las energías renovables va en aumento y globalmente alcanzó el 30% del total de la producción de energía a nivel mundial en 2022. Esto permite ver la transición en cuanto a la implementación de estas tecnologías y su mayor

utilización alrededor del mundo. Son evidentes los beneficios ambientales que ofrece la utilización de las energías renovables como la disminución de los gases efecto invernadero, reducción de explotación de minerales y uso de fuentes de energía que están naturalmente disponibles en la mayoría de regiones del mundo.

Las PCHs son una de las fuentes de generación de energía que más impacta en la economía de Colombia, dado que genera un crecimiento en el área de influencia y en las comunidades beneficiarias de la energía producida (Acero y Sánchez, 2017). En este momento es necesario desarrollar nuevas fuentes e instalaciones energéticas dado que se pronostica que habrá un incremento anual del 4.5% en el consumo de energía en el País y presenta la oportunidad para la industria dedicada a este asunto (Cornare, 2020). El gobierno nacional ha regulado el mercado energético con leyes que promueven el desarrollo y utilización de Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER), como las leyes 141 y 143 de 1994 y la Ley 1715 de 2014, con el objetivo de tener un mayor aprovechamiento del potencial energético del país y crear una matriz energética distribuida.

El actual gobierno colombiano, en su documento, Colombia Potencia Mundial de la Vida: Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 (DNP Colombia, 2023), habla de posicionar a las PCHs como una herramienta para democratizar el acceso a energía limpia, reducir brechas rural-urbanas y avanzar en la descarbonización del sistema energético nacional.

Conviene analizar los impactos sociales que trae la construcción de esta clase de centrales hidroeléctricas en la producción de energía. Teniendo en cuenta que es un proyecto que desde el punto de vista técnico y científico tiene grandes beneficios y sobre todo respecto a la transición hacia la producción de energías renovables, es fundamental tener una perspectiva completa para analizar cómo afectarían estos cambios a las poblaciones, comunidades y en general al país donde se llevará a cabo la implementación de estas plantas productoras de energía renovable. Este análisis se puede extender a un entorno global, donde en ciertos lugares existen poblaciones sin acceso a la energía eléctrica y tienen condiciones geográficas e hidrológicas similares a Colombia. Entonces, se plantean preguntas con el fin de conocer los efectos y conclusiones a las que es posible llegar a través de los informes que van a ser presentados a continuación.

Las siguientes preguntas pueden ser planteadas a partir del análisis anterior: (1) ¿Qué impactos ambientales conlleva? (2) ¿Qué cambios se presentan en las poblaciones donde se implementan las PCHs (Impactos Sociales)? (3) ¿Hay beneficios en el momento de que una población se vea afectada en el proceso de construcción de una PCH? (4) ¿Las poblaciones aisladas pueden tener acceso este tipo de tecnologías?

## 02 REFERENCIAL TEÓRICO

### DEFINICIÓN DE PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS (PCHS)

De acuerdo con lo planteado por el Ministerio de Minas y Energía (de dónde) en su Resolución 0309 de 2018: Licenciamiento Ambiental para PCHs, define una PCH legal y técnicamente como una instalación de generación de energía eléctrica que aprovecha la fuerza del agua en cauces naturales, con una capacidad instalada entre 1 MW (megavatio) y 20 MW, según la clasificación establecida por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) y alineada con los estándares de la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE).

## CLASIFICACIÓN DE PCH

No existe un consenso mundial sobre lo que se considera una instalación de pequeña escala para la producción de energía. La definición va a depender del grado de desarrollo de la tecnología en el país en que se quiera desarrollar la instalación. (¿esta afirmación de dónde salió? Si es resultado del análisis de documentos sugiero declararlo así para no ser categórico y que se evidencie el resultado de la aplicación de un método científico).

Para el presente estudio se tomará como base la clasificación adoptada por la Unidad de Planeación Minero Energética de Colombia, consignada en el Atlas de potencial hidroenergético de Colombia 2015 (UPME, 2015). En la tabla 1 se muestra la clasificación sugerida por la Organización latinoamericana de energía (OLADE) para hidroeléctricas.

Tabla 1 . Clasificación de Centrales Hidroeléctricas, Atlas de potencial Hidroenergético de Colombia (UPME, 2015).

| Clasificación                            | Potencia instalada (kW) |
|------------------------------------------|-------------------------|
| Pico Central                             | 0,5 - 5                 |
| Micro Central                            | 5 – 50                  |
| Mini Central                             | 50 - 500                |
| Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH) | 500 - 20.000            |
| Centrales Hidroeléctricas (CH)           | > 20.000                |

En este estudio se definen las pico centrales hidroeléctricas como las instalaciones de menor potencia (Potencia<5KW) y generalmente son utilizadas para electrificar hogares, fincas o pequeñas comunidades. Entonces la atención de este estudio estará centrada en este tipo de aprovechamientos y sus implicaciones ante la sociedad y el ambiente. Las recientes innovaciones en el desarrollo de equipos para la generación de energía hidroeléctrica a pequeña escala han hecho de esta tecnología una fuente económica y confiable incluso para los lugares más pobres e inaccesibles (Maher y Smith, 2001), considerándola también una opción muy versátil, es decir, es adaptable a variedad de condiciones y entornos.

## PCH EN COLOMBIA

Colombia es un país con un gran potencial hidroeléctrico enorme, en el Atlas de potencial Hidroenergético de Colombia (UPME 2015), dividieron el territorio en varias subzonas hidrográficas donde se seleccionaron los tramos de los ríos en los cuales se presenta mayor potencial hidroeléctrico aprovechable. Los resultados se presentan en la siguiente tabla categorizadas por tipo de central y define el potencial a desarrollar de forma teórica, es decir, el estudio no tomó en cuenta el efecto acumulado de instalar las centrales de generación, lo que indica es la potencial de generación de energía en cada subzona determinada. Lo más importante de este estudio es que se determinaron los totales de potencial hidroenergético por subzona, por ejemplo, para el interés de este estudio, las pico centrales pueden generar 1533 kilovatios de potencia en todo el país.

Tabla 2. Potencial hidroenergético acumulado por tipo de central y por sitio identificado para aprovechamiento, en kilovatios (UPME 2015).

| Área Hidrográfica         | Tipo de Central |        |         |           |            |            |
|---------------------------|-----------------|--------|---------|-----------|------------|------------|
|                           | Pico            | Micro  | Mini    | Pequeñas  | Grandes    |            |
|                           |                 |        |         |           | 20 - 40 MW | > 40 MW    |
| Amazonas                  | 285             | 2.799  | 26.948  | 903.311   | 1.518.300  | 9.522.541  |
| Caribe                    | 210             | 1.935  | 16.843  | 436.476   | 749.309    | 2.922.066  |
| Magdalena Cauca           | 514             | 5.229  | 47.567  | 1.646.204 | 2.808.652  | 17.713.622 |
| Orinoco                   | 360             | 3.599  | 35.789  | 1.230.958 | 2.205.013  | 10.227.236 |
| Pacífico                  | 165             | 1.647  | 15.984  | 568.657   | 831.949    | 2.743.598  |
| Total por tipo de Central | 1.533           | 15.209 | 143.132 | 4.785.606 | 8.113.222  | 43.129.063 |

Estos datos indican que aún hay un camino largo por recorrer en cuanto al uso de la energía disponible de forma natural y por tanto representa una oportunidad para el gobierno, inversionistas o comunidades que quieran hacer parte de la producción de energía. Los aspectos básicos a considerar para la formulación y el desarrollo de proyectos con PCH expuestos por (ESHA, 2006) son:

- Topografía y geomorfología del sitio.
- Evaluación del recurso hídrico y su potencial de generar de energía.
- Elección del sitio y del esquema básico del aprovechamiento.
- Selección de las turbinas y generadores, así como de sus equipos de control.
- Evaluación del impacto ambiental y estudio de las medidas para su mitigación.
- Evaluación económica del proyecto y su potencial de financiación.
- Marco institucional y procedimientos administrativos para obtener las autorizaciones.

Como en todo proyecto, la formulación, el desarrollo y la operación de una pico central hidroeléctrica genera alteraciones o impactos ambientales, sociales y económicos en el área de influencia del proyecto los cuales deben ser considerados en la Evaluación de Impactos Ambientales (EIA). Esta evaluación es requerida para otorgar la licencia ambiental para su proyección y operación ante la autoridad ambiental. Es también fundamental para asegurar la correcta ejecución del proyecto y sostenibilidad del mismo en todas las etapas, igualmente considerando los desarrollos tecnológicos del país donde se desea implantar la central productora de energía, teniendo en cuenta toda la normativa que los regula ya que cada país tiene su propio marco legal y regulatorio.

Por otra parte, como la tecnología utilizada en las PCH depende de las condiciones hidrológicas y topográficas, se debe prever que esta tecnología no está disponible en todos los sitios de ejecución del proyecto. Aun así, según (Morales et al, 2014) la posible expansión de la cobertura del proyecto a largo plazo está limitada por el recurso hídrico del sitio ya que su producción máxima depende de éste. Otro aspecto a tener en cuenta es que los periodos climáticos impactan directamente la energía generada, lo cual limita la cobertura en todos los periodos del año. De acuerdo con (Ávila et al 2014), el incremento en la frecuencia de eventos meteorológicos extremos afecta directamente el flujo de los ríos y corrientes de agua.

## ETAPAS DE UN PROYECTO DE PCH

A continuación, se describe una metodología que describe el proceso para el adecuado desarrollo de un proyecto de PCH (Morales et al., 2014):

- **Inventario:** Se buscan las comunidades que no cuentan con el servicio de energía eléctrica y los lugares más adecuados para la implementación de una PCH.
- **Reconocimiento:** Se realizan visitas al sitio propuesto y se define la posible ubicación de la obra.
- **Prefactibilidad:** Este estudio evalúa el potencial de generación en toda la cuenca, estudia alternativas existentes y se realiza una estimación de los costos de cada aprovechamiento.
- **Factibilidad:** Tiene como objetivo definir la viabilidad del emprendimiento, teniendo en cuenta sus principales dimensiones: técnicas, económicas, financieras, sociales y ambientales. En este punto se determina si es posible el desarrollo de la instalación o es mejor buscar otras alternativas.
- **Diseño:** Cuando el estudio de factibilidad es favorable comienza esta etapa que se caracteriza por el desarrollo de la ingeniería en detalle, dimensionando las diferentes obras del proyecto y delimitando los alcances del mismo.
- **Construcción:** Es la etapa en que se materializan las obras propuestas de acuerdo al cronograma de obra.
- **Fase de operación:** Luego de terminar todas las obras requeridas para el funcionamiento de la central, se prueban los equipos para verificar que la planta está lista para entrar en operación.

## EVALUACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO (CE)

El caudal ecológico o ambiental es el régimen hídrico que ocurre en un río para mantener los ecosistemas y sus beneficios, donde hay usos competitivos del agua o los caudales están regulados. Mantener el caudal ecológico es fundamental para la salud del río, el desarrollo económico y la disminución de la pobreza. Así se asegura la disponibilidad de la mayor parte de los beneficios que los ríos saludables y los sistemas de agua subterránea proporcionan a la sociedad y la naturaleza.

Las normas relativas a la expedición de licencias para las PCHs en Colombia plantean criterios de diseño hidrológico que considera los requerimientos ecológicos del flujo en los tramos fluviales afectados por la detracción del caudal. El caudal ecológico (CE) debe ser considerado como una restricción ecosistémica al aprovechamiento hidroeléctrico y puede ser evaluado satisfactoriamente mediante métodos confiables. Es posible compatibilizar la producción de energía hidroeléctrica con la preservación de un estado ecológico aceptable (Diez e Olmeda, 2008). Estos criterios eco-hidrológicos evaluadores de CEs en PCHs hacen posibles aprovechamientos rentables económicamente y defendibles en términos ambientales. Estos caudales ecológicos son únicos para cada lugar y pueden ser establecidos con alto grado de confiabilidad siguiendo la **metodología IFIM (Instream Flow Incremental Methodology)**, donde se analiza la morfología del lecho fluvial, el régimen de flujo de la corriente de agua, los organismos objetivo (Bio-indicadores) y considera

también los intereses de todos los actores involucrados. Todo esto se hace de acuerdo al análisis temporal puesto que los caudales naturales varían considerablemente de temporada seca a temporada de lluvias que son los ciclos estacionales en Colombia.

Es fundamental para el diseño de un proyecto hidroeléctrico definir la disponibilidad del recurso hídrico, sobre todo en las épocas secas donde el caudal llega a sus niveles mínimos. En estas épocas del año todas las corrientes de agua disminuyen considerablemente, entonces el diseño se debe basar en estos valores mínimos y los sitios adecuados serán los que tengan altos rendimientos hídricos y cuencas con tamaños suficientes que garanticen cierta regulación y la permanencia del agua en la corriente, todo esto con el fin de disminuir posibles sobrecostos de instalación y altas variaciones en el ecosistema.

### IMPACTOS GENERADOS POR LA INSTALACIÓN DE UNA PCH

Puesto que el proceso de producción de energía en una PCH implica la afectación de un curso natural de agua y por consiguiente su ecosistema, se genera un impacto directo sobre el medio ambiente que rodea al aprovechamiento que se pretende establecer; Este impacto puede ser positivo o negativo y es necesario hacer una evaluación completa de la afectación real, actual y futura del proyecto. Esta evaluación debe hacerse por parte de los encargados del diseño de la central. Se deben delimitar el área de influencia directa (AID) y el área de influencia Indirecta (AII). La primera es referente al lugar donde se va a construir las instalaciones del proyecto, la segunda se refiere a los territorios que constituyan la cuenca hidrográfica generada a partir del punto de captación del proyecto (Osorio, 2017). También es necesario tramitar diferentes permisos para realizar la implementación del proyecto tales como aprovechamiento forestal, concesiones de aguas, permisos de vertimientos y permisos de ocupación de cauce.

### ESTUDIOS RELEVANTES PARA EL DESARROLLO DE UNA PCH

Estos estudios deben ser realizados en la fase de estudio de factibilidad del proyecto y son necesarios para el correcto diseño y dimensionamiento de las instalaciones a construir (Madrigal, 2018):

- **Estudios de cartografía y topografía:** Primero se verifica la información existente en los institutos destinados para tal fin y otras entidades que hayan desarrollado proyectos en la región. Si no hay datos disponibles, se realiza el levantamiento topográfico que permite conocer el terreno y localizar de manera óptima las instalaciones.
- **Estudio de la Demanda:** Con este estudio se obtendrá la demanda energética actual de la población a atender y su proyección en el plazo establecido para el funcionamiento de la central.
- **Estudio de geología y geotecnia:** Se elabora para conocer las características físicas y mecánicas del suelo.
- **Estudio Hidrológico y Pluviométrico:** Se buscan los datos estadísticos de los caudales en series de tiempo anuales. Si no se cuenta con esta información, se utiliza la información pluviométrica para obtener el caudal aproximado.
- **Estudio de potencial Hidroenergético:** Con los datos obtenidos en los anteriores estudios como el caudal, caída neta y el rendimiento de los equipos electromecánicos de producción

de energía se obtiene la Potencia teórica posible. Sin embargo, la determinación de la potencia de diseño es función de factores como las medidas ambientales establecidas, la energía requerida, el costo de la infraestructura y los parámetros operacionales de los equipos de la PCH.

- **Estudio de Impacto Ambiental (EIA):** Es una manera de medir el impacto que el proyecto tiene sobre el medio ambiente con el fin de proponer alternativas para reducirlo, mitigarlo o evitarlo en el mejor de los casos.
- **Estudio Socioeconómico:** Se deben considerar los efectos directos e indirectos sobre la sociedad, teniendo en cuenta la cultura y hábitos de los pobladores de las áreas de influencia del proyecto.
- También se realiza una evaluación financiera con el fin de definir su viabilidad económica.

## IMPACTOS AMBIENTALES

Entendiendo los impactos ambientales como aquellos que se derivan tanto de la construcción como de la puesta en acción de estas centrales es posible comenzar a hablar de distintos factores que se presentan en el momento de la instalación de una PCH en Colombia.

Existen restricciones de carácter social y ambiental que no intervienen en el comportamiento físico y mecánico del sistema, pero restringen o condicionan legalmente su aprovechamiento. Las variables que imponen esta condición son las siguientes: la existencia de parques, reservas naturales o áreas protegidas y las zonas de páramos, manglares y humedales. Por esto es fundamental revisar todos los anteriores aspectos para el correcto desarrollo de la instalación ya que una omisión de alguno de ellos puede representar pérdidas económicas o la cancelación del proyecto.

En el estudio de impacto ambiental se debe identificar, prever, interpretar y estimar o medir las consecuencias ambientales de la instalación de la PCH. Es necesario identificar el medio existente y las acciones a ejecutar para poder observar las posibles alteraciones y estar en capacidad de valorarlas. Los impactos pueden ser expresados de forma cuantitativa o cualitativa dependiendo del aspecto que se esté analizando.

Según el estudio, Biodiversidad 2016: Estado y tendencias de la biodiversidad continental de Colombia (Instituto Von Humboldt, 2017), Colombia ha perdido una parte significativa de su biodiversidad en las últimas décadas y proyectos de PCH contribuyen a esta tendencia. Se estima que el 50% de los ecosistemas acuáticos del país están en riesgo debido a la intervención humana, incluyendo la construcción de hidroeléctricas. Por esto se resalta la importancia de concentrar la producción de energía en pequeñas centrales (Pico Centrales) distribuidas a lo largo del cauce del afluente que generan impactos ambientales mínimos que se pueden mitigar y manejar. El problema principal de las Hidroeléctricas es el almacenamiento de grandes cantidades de agua lo que implica múltiples impactos ambientales y sociales, con la generación a pequeña escala se elimina este problema. Especies de peces como el Bocachico (*Prochilodus magdalenae*), especie migratoria clave en la cuenca del Magdalena (Jiménez-Segura, L. F., et al., 2016), el Bagre rayado (*Pseudoplatystoma magdaleniatum*) y el Nicuro (*Pimelodus blochii*), que son endémicos de esta cuenca han sido afectados como consecuencia de la fragmentación de sus hábitats y a la alteración de los flujos naturales de los ríos (Mojica et al., 2012).

El cambio climático es una realidad a la que la humanidad tiene que enfrentarse, causa mayores eventos extremos como sequías e inundaciones que dificultan la producción de energía. Estos valores mínimos y máximos deben ser evaluados en el análisis de la implementación del proyecto como factores críticos de diseño.

Es esencial establecer un plan de manejo ambiental que puede ser presentado en forma de ficha. Este plan debe plantear un conjunto de programas o proyectos encaminados a la prevención, mitigación, corrección y compensación de los impactos que fueron identificados como negativos en la evaluación ambiental. Es importante también potenciar los impactos positivos en todas las etapas del proyecto y formular al menos un programa como medida de manejo para cada impacto establecido. A continuación, se muestra un formulario para la presentación para los planes de manejo ambiental y de monitoreo en una PCH.

Respecto a las limitaciones ambientales, se debe desarrollar un estudio de impacto ambiental riguroso con el fin de establecer cualquier riesgo para el ecosistema que se pueda generar durante la etapa constructiva y operativa de la instalación. Este documento debe ser evaluado por la autoridad ambiental previo a la aprobación del proyecto quien será el encargado de definir las medidas necesarias de mitigación o compensación cuando fuesen necesarias. Los impactos ambientales más comunes en una PCH se describen en la tabla 3.

Tabla 3. Aspectos ambientales a tener en cuenta para el establecimiento de una PCH Adaptado de (Osorio, 2017).

| Aspecto Ambiental      | Descripción de la afectación                                                                                                          |
|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                        | <b>PROCESOS GEOFÍSICOS</b>                                                                                                            |
| Erosión                | Es el proceso por el cual se produce pérdida física del suelo en grado variable, puede producirse al final del proceso                |
| Estabilidad de Laderas | La firmeza de un alud frente a la falla por deslizamiento o colapso bajo condiciones normales y depende del terreno                   |
|                        | <b>SUELOS</b>                                                                                                                         |
| Uso del suelo          | Es la actividad que está definida para llevarse a cabo en dicha región, el proyecto puede afectar esta sectorización de la producción |
|                        | <b>ECOSISTEMAS TERRESTRES</b>                                                                                                         |
| Flora                  | La flora puede verse afectada debido a la disminución del recurso hídrico                                                             |
| Fauna                  | La fauna puede verse afectada debido a la disminución del recurso hídrico                                                             |
| Corredores biológicos  | El tránsito de las especies puede ser afectado por el funcionamiento de la central                                                    |
|                        | <b>ECOSISTEMAS ACUÁTICOS</b>                                                                                                          |

| Aspecto Ambiental | Descripción de la afectación                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Perifiton         | El conjunto de bacterias, hongos, algas y protozoos presentes en los cuerpos de agua del proyecto. Esta comunidad es sensible tanto a la disponibilidad como a la calidad de agua, y cambios en ella pueden desencadenar dinámicas poblacionales en otros puntos de la cadena trófica. |
| Hábitat acuático  | El nicho ecológico de cada una de las especies presentes en los ecosistemas acuáticos del área de influencia, incluyendo todas las variables abióticas y bióticas que lo componen.                                                                                                     |

Existen diversas metodologías para evaluación ambiental y en Colombia, según la ley 99 de 1993, se aprueban las siguientes para PCH: Evaluación de Impacto Ambiental (EIA), Evaluación de Línea Base Ambiental, Evaluación de Servicios Ecosistémicos y la Evaluación de Biodiversidad.

### IMPACTOS SOCIALES

Se debe realizar un estudio donde se detallen los efectos sociales de la implantación de cualquier tipo de proyecto. Allí se deben establecer las afectaciones presentes y futuras derivadas de la construcción y puesta en marcha de la central hidroeléctrica. Los impactos sociales se refieren a las consecuencias que puede generar un determinado proyecto sobre la población que lo rodea y se debe realizar el mayor esfuerzo que permita potenciar, prevenir, mitigar, corregir o compensar los impactos. Estas acciones dirigidas a todas las partes participantes en el proceso y deben estar encaminadas hacia el desarrollo sostenible para las comunidades. Es fundamental establecer relaciones armónicas entre el proyecto y los actores sociales del área de influencia con la utilización de estrategias comunicativas de manera oportuna y precisa, acordes a las necesidades particulares de información de los grupos de interés; siendo esto el objetivo general del estudio social en un proyecto (Osorio, 2017).

Entre los impactos positivos de la implementación de una PCH, es importante destacar el mejoramiento de vías rurales y la construcción de nuevas carreteras en las áreas de influencia de dichos proyectos (Cornare, 2020). Estas obras han facilitado la movilidad de los pobladores y la comercialización de sus productos. También han ejecutado obras de infraestructura educativa, de salud, saneamiento básico y otras acciones encaminadas a temas deportivos y culturales. Ha servido también como una fuente de empleo, especialmente en la etapa de construcción (Agudelo, 2018). En el estudio social es preciso fomentar canales de comunicación de doble vía con el intercambio de información clara y precisa a través de la creación de espacios comunicativos para la participación y concertación entre los diferentes grupos de interés. Para minimizar las expectativas y la tergiversación de la información se deben utilizar estrategias comunicativas acordes a las necesidades particulares informativas de los interesados en el proyecto.

En cuanto a la categorización de los impactos sociales, es posible agrupar los impactos según las siguientes categorías (Duque, 2021):

- Cambios sociales.
- Conflictos Sociales.

- Afectaciones en la producción y en el modo de vida.
- Enfermedades.
- Alteración de la seguridad alimentaria.
- Transformación de ecosistemas.

Dentro de los conflictos sociales más comunes encontrados en Colombia podemos enumerar los siguientes con un caso documentado:

- **Desplazamiento y re ubicación de comunidades:** Cuando la PCH implica inundación de tierras siempre hay desplazamiento de comunidades locales (Ulloa, A., 2016).
- **Pérdida de medios de vida:** Cuando las comunidades dependen de la pesca, la agricultura o el turismo se ven afectados por la alteración de los ríos y la pérdida de Biodiversidad (Franco, J. 2013).
- **Falta de consulta previa:** En Colombia la mayoría de las veces las comunidades (indígenas y afrodescendientes) no son tenidas en cuenta para la toma de decisiones ONIC (Organización Nacional Indígena de Colombia, 2017).
- **Conflictos por el uso del agua:** Al alterar el cauce natural de los ríos se generan disputas entre las comunidades locales y las empresas por el acceso al agua para riego, consumo humano y actividades productivas (García, L., 2014).
- **Impactos culturales y espirituales:** Para algunas comunidades indígenas y afrodescendientes, los ríos son sagrados y tienen gran valor cultural y espiritual. La instalación de una PCH afecta estos valores intangibles (Chaves, M., & Zambrano, M., 2010).
- **Protestas y movilizaciones sociales:** Las comunidades afectadas han organizado resistencia frente a proyectos que afectan su modo de vida o cosmovisión (CENSAT Agua Viva., 2016).
- **Impactos en la salud:** La alteración de los ríos y la contaminación asociada a la construcción de la PCH puede afectar la salud de las comunidades locales, ya sea por pérdida de fuentes de hídricas, afectación de la seguridad alimentaria de la población, enfermedades asociadas al asentamiento temporal durante la etapa de construcción o la afectación psicológica que las nuevas condiciones representan. (Oviedo-Ocaña, 2018).
- **Conflictos interétnicos:** En algunas zonas, se han presentado tensiones entre comunidades campesinas, indígenas y afrodescendientes por el acceso a recursos naturales (ONIC, 2018).
- **Falta de compensaciones adecuadas:** Las compensaciones ofrecidas por las empresas a las comunidades involucradas en el proyecto suelen ser insuficientes o no se cumplen (Duque, 2021).

Un caso conocido es el de la PCH la vuelta, en el departamento de Antioquia. Con una capacidad de 16600 KW (16,6 MW), clasifica como Pequeña central, es un proyecto que ha generado conflictos

sociales y ambientales significativos. Ubicada en el municipio de Guadalupe fue construida por la empresa Celsia, filial del grupo Argos y es una central a filo de agua. Se produjo desplazamiento de comunidades ya que implicó compra de tierras a poblaciones locales. Estas compensaciones fueron criticadas ya que se calificaron como insuficientes para recuperar los medios de vida (Duque, 2021). Aunque no hay represa ya que es a filo de agua, las comunidades denunciaron que la desviación del río redujo el acceso al agua para riego y consumo humano aguas abajo de la PCH, lo que afectó cultivos de pan coger y generó conflictos por el agua (CENSAT, 2018). También se conoció que las poblaciones del área de influencia no fueron consultadas adecuadamente violando el derecho a la participación establecido en la constitución colombiana.

La comunidad se organizó y en 2017 por medio del movimiento “Guardianes del Rio Guadalupe”, campesinos y pescadores hicieron bloqueos en las vías de acceso al proyecto exigiendo compensaciones justas y la protección del río (CENSAT Agua Viva, 2018). Finalmente, la población logró que la empresa Celsia realizara ajustes en el diseño de la PCH para minimizar los impactos, sin embargo, persisten los reclamos por los daños no reparados, como la pérdida de fertilidad de zonas agrícolas.

Se resalta la importancia de consultar a las comunidades afectadas, de manera efectiva y buscando usar sus medios de difusión, para llegar a acuerdos con las empresas o entidades promotoras del proyecto, se ha observado en la mayoría de casos documentados en esta sección que la mayoría de problemas asociados con la implementación de la PCH se generan a partir del desconocimiento de la comunidad implicada. Se recomienda realizar asambleas, reuniones y juntas de amplia difusión para que la comunidad sea tenida en cuenta al momento de desarrollar la instalación.

## **IMPACTOS ECONÓMICOS DE LAS PCHS**

### **Referentes a la Sociedad**

Los impactos económicos son los cambios en la economía de la región desde la construcción de la instalación hidroeléctrica. El número de empleos que puede generar en su etapa de construcción y operación es función de la potencia instalada.

Cuando una comunidad tiene acceso a la energía eléctrica se pueden desarrollar actividades de mayor nivel a las practicadas tradicionalmente por los pobladores de las regiones que no contaban con este recurso energético que en este momento de la historia se considera esencial. Por ejemplo, se puede usar la energía para accionar máquinas que lleven a industrializar los procesos que se hacen de forma manual, que requieren mucho tiempo y esfuerzo, lo que representa una ventaja económica y productiva para la población. También mediante el uso de la electricidad es posible contar con servicios de salud de calidad, tener una sociedad conectada con el internet y permitiendo el así acceso de los estudiantes a diversos medios de información, lo que representa una mejora en la educación y consecuentemente en un futuro se verá materializado en un mayor desarrollo para la región. Observando la situación desde ese punto de vista, el acceso a la energía, se convierte en un motor para las economías de las regiones que históricamente han sido olvidadas por el estado ya que pueden obtener el recurso de una manera económica, ecológica y sostenible. El recurso energético se materializa con mejor calidad de vida y más posibilidades de desarrollo en zonas rurales.

Entonces poder tener acceso al recurso energético mejora la calidad de vida de las comunidades dada la posibilidad de acceder a los servicios públicos básicos, mejorar los servicios hospitalarios, acceder a programas recreativos o de capacitación y sobre todo transformando la percepción de una población respecto a su región de residencia.

En muchas regiones de Colombia los ríos han sido claves para el desarrollo de las economías regionales dado el gran potencial turístico que poseen. Esto permite que muchas familias basen su economía en el turismo y han sido afectadas sustancialmente a causa de la construcción de PCHs (Duque, 2021). Esto se presenta ya que no son realizados los estudios correspondientes para la correcta implementación, teniendo en cuenta todos los actores involucrados en el área de influencia de la instalación. Este estudio pretende ser una guía donde se establecen los pasos a seguir en el proceso de instalación de una PCH.

### Referentes a la Instalación

Para la evaluación de proyectos hidroeléctricos en Colombia se plantean criterios económicos como el costo de la generación (\$/kWh), la tasa interna de retorno (TIR), el valor presente neto de la inversión (VPN), relación costo/beneficio y el tiempo de retorno de la inversión (Osorio, 2017).

Generalmente en la construcción de una PCH, alrededor del 60% de la inversión está representada en las obras civiles necesarias para su funcionamiento. Los costos de los equipos electromecánicos para la producción de energía están sobre el 20% del valor del proyecto, 8% para la construcción de las líneas de transmisión, 5% para la instalación de la tubería de presión, 3% para los diseños y la ingeniería, y el restante servicios, contratos y estudios relevantes a la instalación (Gielen, 2012).

Los estudios necesarios para la correcta proyección de la central son los estudios geológicos, geomorfológicos, topográficos, cartográficos, hidrológico y de impacto ambiental. Normalmente estos estudios pueden significar entre el 1 y el 7% de los costos de inversión (UPME, 2014).

En la siguiente tabla comparativa se pueden observar los valores estimados para la producción de energía por fuente renovable. Se observa que la PCH presenta uno de los menores costos posibles, superada solamente por la Solar fotovoltaica.

Tabla 4. Comparación entre costos estimados para la instalación de una planta generadora de energía

| Comparativo de Costos por Kilovatio hora (kWh) en Colombia |                     |                                                                                                                                        |                                    |
|------------------------------------------------------------|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| Fuente de Energía                                          | Costo por kWh (USD) | Consideraciones Clave                                                                                                                  | Referencias                        |
| Hidroeléctrica PCH                                         | 0.03 – 0.07         | - Requiere estudios de caudal y geotécnicos.<br>- Impacto ambiental regulado.<br>- Alto costo inicial pero larga vida útil (50+ años). | UPME (2021)<br>IRENA (2022)        |
| Eólica                                                     | 0.04 – 0.09         | - Mayor potencial en La Guajira y zonas costeras.<br>- Depende de velocidad del viento (> 6 m/s).<br>- Costos de transmisión elevados. | CORE (2020)<br>Enel Colombia       |
| Solar Fotovoltaica                                         | 0.02 – 0.06         | - Menor costo en zonas de alta radiación (La Guajira, Cesar).<br>- Bajo mantenimiento.<br>- Escalabilidad rápida.                      | IRENA (2022)<br>XM Colombia        |
| Biomasa                                                    | 0.06 – 0.12         | - Disponibilidad de residuos agrícolas (caña de azúcar, palma).<br>- Requiere logística de suministro.<br>- Emisiones controladas.     | Fedebiocombustibles<br>UPME (2020) |

Se puede inferir que la viabilidad y rentabilidad de las PCH en el sector eléctrico, se puede realizar a partir de la estimación de los costos asociados a obras civiles y equipos básicos de generación y de los beneficios asociados a las ventas de la energía generada por el proyecto. De acuerdo con (Smith & Angel 2004), con el fin de determinar indicadores financieros que permitan comparar y calificar la inversión; estos indicadores se obtienen a partir de los estados financieros del proyecto, los cuales son construidos en el modelo tanto para el período pre-operativo o de construcción como para el período operativo; estos indicadores se estiman a partir de los beneficios y costos del proyecto analizado. Así como (Morales & Castaño, 2017) mencionan que en el análisis de los costos se tienen en cuenta dos factores fundamentales que lo conforman, estos son los costos preoperativos y los

operativos. En primer lugar, los costos preoperativos están conformados por todas aquellas inversiones que son requeridas para la puesta en marcha del proyecto, mientras que los costos operativos están conformados por todas aquellas inversiones fijas o variables que se requieren para el buen funcionamiento de la planta.

Por último, de acuerdo con (Villar, 2006), la inclusión de los costos de falla, los cuales permiten el cálculo de los beneficios de operación, además de la generación de energía, la capacidad de crédito, los costos de operación y mantenimiento, otros costos / ahorro. Además, depende de la condición y de la expectativa de vida de determinado componente o subsistema, el tiempo de evaluación restante y un sistema de cuando una falla se espera que ocurra, como fue evaluado durante la inspección de la planta.

### **Empleos generados en la construcción y operación de una PCH**

Para tener una referencia cuantitativa, se analizaron tres proyectos diferentes desarrollados en Colombia y se obtuvieron los datos mostrados en la tabla 6.

Tabla 5. Personal requerido para instalación de PCH en Colombia (Osorio, 2016).

| Central    | Ubicación                  | Capacidad (MW) | Personal para etapa de construcción | Personal para etapa de operación |
|------------|----------------------------|----------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| Aures Bajo | Sonsón, Antioquia          | 20             | 250                                 | 12                               |
| Magallo    | Concordia, Antioquia       | 5.9            | 80                                  | 6                                |
| Cocuyo     | Versalles, Valle del Cauca | 0.8            | 20                                  | 4                                |

### **Ingresos para el municipio y corporaciones regionales**

Dentro del presupuesto operativo de la PCH debe incluir los costos de ley que deberán ser cancelados por el organismo generador al estado. La Unidad de planeación minero energética establece que según el artículo 45 de la ley 99 de 1993, define que según el artículo 45 de la Ley 99 de 1993 (Congreso de Colombia, 1993) –Creación del medio ambiente–, se debe destinar un valor por tasa de utilización del agua equivalente a COP 1550/L/s-mes, para una capacidad instalada menor de 10 MW; el valor de Industria y Comercio equivale a COP 294.85/kW instalado al año predial operativo, que corresponde al 150 % del impuesto predial vigente para todos los predios del proyecto y se aplica un 0.6 a 1.5 veces el avalúo catastral. La sobretasa ambiental es un gravamen establecido por la Ley 99 de 1993, que permite a los municipios aplicar, como tope, hasta un 2.5 % del avalúo catastral de los predios, y cada año un 0,25 % al avalúo catastral.

Las PCHs producen la mayor cantidad de transferencias del sector eléctrico a los municipios del área de influencia y su respectiva corporación autónoma regional (En Colombia estas entidades son las encargadas del manejo de licencias ambientales a nivel regional). El costo de ley por transferencia representa el 6% del valor total de la energía generada, dirigiendo el 3% para la administración municipal y el 3% restante se destina para la Corporación. De estos impuestos recaudados por la operación de la planta, el 90% serán para inversión social y el restante será de libre destinación, es decir, lo que la municipalidad considere importante en el momento.

La barrera económica más importante puede ser en la mayoría de los casos la inversión inicial para la implementación del proyecto y es importante resaltar que diferentes entidades o empresarios que decidan invertir en el campo de las energías renovables pueden apalancarse de diferentes fondos de financiamiento, incentivos y mecanismos de apoyo enfocados en energías renovables impulsados por el gobierno colombiano, entidades internacionales o el sector privado.

De parte de los programas gubernamentales, está la ley 1715 de 2014 o Ley de Energías renovables (Congreso de Colombia, 2014), donde existen incentivos tributarios como la Deducción de la inversión en impuesto de renta hasta por 5 años, la exclusión del Iva para los equipos importados y la depreciación acelerada de los activos (hasta 20% anual). El fondo Bancoldex tiene una línea de crédito verde para la financiación de producción de energías renovables con tasas preferenciales y plazos hasta de 15 años. El fondo Findeter tiene financiamiento para infraestructura sostenible y cuenta con apoyo a proyectos de generación renovable en zonas no interconectadas (ZNI) y manejan un enfoque en electrificación rural con energía solar y micro hidroeléctricas.

A nivel internacional está el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) con el fondo verde para el clima que financia proyectos que reduzcan emisiones, como parques eólicos y solares. También el Banco de Desarrollo de América Latina con sus programas de Transición Energética apoya proyectos solares y eólicos, con énfasis en innovación con monto hasta de 10 Millones USD. La NDC Partnership (Apoyo a las Contribuciones Nacionales) tiene fondos para cumplir metas del Acuerdo de París, con el financiamiento técnico y económico para proyectos alineados con la reducción de carbono.

El sector privado con Bancos como Bancolombia, BBVA, Davivienda tienen créditos verdes y planes de financiamiento con condiciones especiales para las energías renovables. Fondos de inversión como Celsia (Grupo Argos) invierte en proyectos solares y eólicos, especialmente en el Caribe y Antioquia o Ecoelectric (Enel Colombia) que por su parte financia proyectos comunitarios de energía renovable en zonas rurales. También existen Plataformas Colaborativas (Crowdfunding) como Tricla, que es una plataforma para financiar proyectos sostenibles, incluyendo energías renovables y Lendera que realiza préstamos colectivos para instalaciones solares en hogares y negocios.

Existen también otros mecanismos gubernamentales como Subastas de Energía a Largo Plazo y Programa de Uso Racional de Energía (PROURE) que subsidia la eficiencia energética.

Otra barrera importante podría ser la resistencia de una población a cambiar su modo de vida y costumbres, en este caso hay que tener en cuenta a la comunidad para anteponer el bienestar común y la preservación de su cultura al beneficio económico.

La Ley Transición Energética, La Ley 2099 de 2021 en Colombia fortalece los incentivos para las PCHs (Congreso de Colombia, 2021) y otras fuentes renovables, actualizando y ampliando beneficios previstos en la Ley 1715 de 2014 (Tabla 6).

Tabla 6. Incentivos de ley para implementación de PCH en Colombia.

| Principales Incentivos para PCHs en la Ley 2099 de 2021 |                                                                                                                       |                                                                                                                             |
|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Incentivo                                               | Descripción                                                                                                           | Requisitos                                                                                                                  |
| Exclusión de IVA                                        | Exención del IVA en la importación o compra de equipos, maquinaria y servicios para Construcción y operación de PCHs. | Proyectos registrados ante la UPME y certificados como parte de las FNCER (Fuentes No Convencionales de Energía Renovable). |
| Deducción de Renta                                      | Deducción del 50% del impuesto sobre la renta por 15 años (vs. 5 años en la Ley 1715).                                | - Inversiones en activos para generación renovable.<br>- Certificación de la UPME.                                          |
| Depreciación Acelerada                                  | Permite depreciar aceleradamente los Activos (hasta 20% anual en 5 años).                                             | Aplicable a maquinaria, equipos y obras Civiles asociadas al proyecto.                                                      |
| Exención de Gravamen Arancelario                        | Exención de aranceles de importación para Equipos no producidos en Colombia.                                          | Listado de equipos autorizados por el Ministerio de Comercio.                                                               |
| Prioridad en conexión al SIN                            | Acceso preferencial a la red del Sistema Interconectado Nacional (SIN) para proyectos De FNCER, incluyendo PCHs.      | Cumplir con requisitos técnicos de la CREG (Comisión de Regulación de Energía y Gas).                                       |
| Financiamiento preferencial                             | Acceso a créditos con tasas subsidiadas a través de Bancóldex, Findeter y banca comercial.                            | Presentar estudios de viabilidad y garantías.                                                                               |
| Simplificación de trámites                              | Reducción de plazos para licencias ambientales Y permisos de construcción.                                            | Proyectos con impacto ambiental controlado (categoría "Menor" según ANLA).                                                  |

## 04 METODOLOGÍA

El presente trabajo se presenta como una revisión bibliográfica sobre los impactos sociales, ambientales y económicos generados por la implantación de una PCH en Colombia. Se revisaron 3 libros, 17 artículos de investigación, 5 tesis, 3 leyes de la república de Colombia y 19 informes oficiales de entidades públicas y no gubernamentales. Se consultaron bases de datos como Scielo, JCR y Scopus, así como también búsqueda por la Web con palabras clave como “Pequeñas centrales hidroeléctricas Colombia”, “energía renovable Colombia”, “Impactos sociales, ambientales y económicos PCH” y “energías renovables comunidades rurales”. Se seleccionaron artículos del año 2014 al 2023, libros relacionados sin importar fecha de publicación y los informes con los datos más actuales referentes a los temas mencionados. Tiene un enfoque cualitativo en el sentido que propone analizar las realidades subjetivas que se presentan entre los diferentes grupos de interés (Comunidad, inversionistas, autoridades ambientales y administraciones municipales), son realidades diversas que pueden ser entendidas desde un punto de vista holístico, donde la realidad es vista como un todo en la que sus elementos interactúan continuamente. A continuación, se presenta un diagrama de flujo con el proceso para la selección del material bibliográfico.

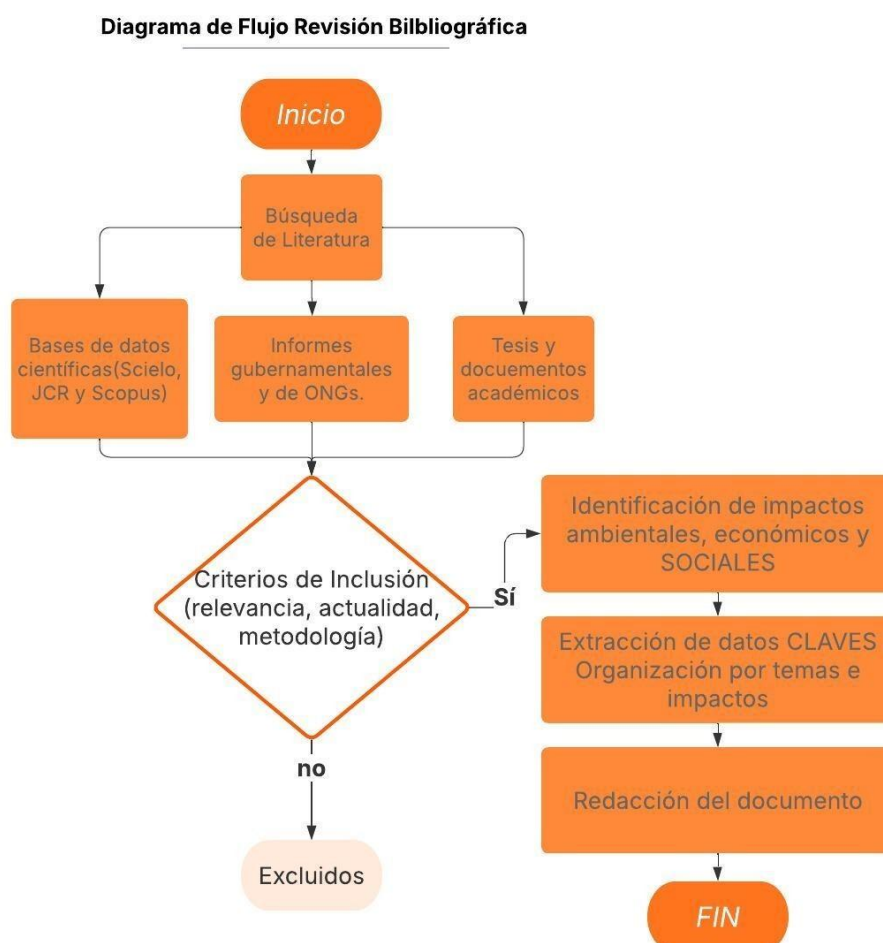


Figura 1. Diagrama de Flujo de la metodología para la selección de los documentos a estudiar

Este estudio también es una propuesta de diagnóstico descriptivo ya que “busca especificar propiedades y características importantes de cualquier fenómeno que se analice. Describe tendencias de un grupo o población” (Hernández et al, 2014). La definición de estas tendencias se logra a través

de las informaciones documentadas en los textos revisados y exponen las realidades particulares de cada proyecto. Se pretende mantener un enfoque interpretativo sobre los datos hallados en la revisión de la literatura. Se propone un enfoque multidisciplinario donde se abordan los desarrollos en el funcionamiento de la tecnología y también de qué manera son afectadas las poblaciones que resultan inmersas en las áreas de influencia de dichos proyectos.

05 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección del estudio se realizará un análisis de cada uno de los aspectos sociales, ambientales y económicos encontrados durante la revisión de la literatura, determinando si el impacto genera efectos positivos o negativos para los actores involucrados. Si el impacto es considerado positivo, se definirá una o más acciones para potenciar su efecto, si por el contrario el impacto es negativo se establecerán medidas de mitigación para disminuir o eliminar este aspecto.

Estas siguientes tablas se responden las preguntas (1) y (2) formuladas en el presente estudio referentes a cuáles son los impactos ambientales y sociales que se generan a con la construcción de una PCH.

Tabla 7. Impactos Ambientales con sus medidas de mitigación o potencialización

| Factores Ambientales                    | Tipo de Impacto | Medidas de Mitigación                                                                              | Medidas de Potencialización                                                             |
|-----------------------------------------|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| Tala de arboles                         | Negativo        | Siembra masiva y conservación de bosque nativo en los alrededores de la central                    | -----                                                                                   |
| Reducción de aguas superficiales        | Negativo        | Se debe evaluar correctamente el Caudal ecológico y respetarlo en la instalación                   | -----                                                                                   |
| Tecnologías ambientales                 | Positivo        | -----                                                                                              | Continuar en la lucha por disminuir el impacto al ecosistema                            |
| Bio-construcción                        | Positivo        | -----                                                                                              | Se pueden utilizar los materiales del sitio para disminuir el impacto ambiental y costo |
| Fuente de energía no contaminante       | Positivo        | -----                                                                                              | Profundizar en el conocimiento sobre energías renovables con la comunidad               |
| Cambio de dinámica ambiental en la zona | Negativo        | Hacer un buen diseño y localizarlo adecuadamente contribuye a disminuir el impacto sobre la cuenca | -----                                                                                   |

Tabla 8. Impactos Sociales con sus medidas de mitigación o potencialización

| Factores sociales                          | Tipo de Impacto | Medidas de Mitigación                                                                                                                                      | Medidas de Potencialización                                                                          |
|--------------------------------------------|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Generación de empleo                       | Positivo        | -----                                                                                                                                                      | Encaminar programas institucionales hacia el uso de mano de obra local                               |
| Calidad de Vida                            | Positivo        | -----                                                                                                                                                      | Acceso a tecnología, menos trabajos manuales de acciones repetitivas                                 |
| Salud pública                              | Positivo        | -----                                                                                                                                                      | Acceso a servicios de salud de mejor calidad                                                         |
| Medidas de mitigación del cambio climático | Positivo        | -----                                                                                                                                                      | Realizar talleres de capacitación respecto al cambio climático y las energías renovables             |
| Conflictos por presencia del proyecto      | Negativo        | Buscar alternativas que solucionen las diferencias encontradas                                                                                             | -----                                                                                                |
| Generación de expectativas                 | Negativo        | Crear canales de comunicación de doble vía con intercambio de información clara                                                                            | -----                                                                                                |
| Inversión en la comunidad                  | Positivo        | -----                                                                                                                                                      | Es necesaria la participación activa de la comunidad para poder conocer y satisfacer sus necesidades |
| Desplazamiento de la población             | Negativo        | Aunque no son inundadas grandes áreas, en las PCH pueden ser afectadas algunas familias. Debe haber una compensación real acorde a la afectación realizada | -----                                                                                                |

|                                                  |                   |                                                                                                                     |                                                                                         |
|--------------------------------------------------|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| Acceso a servicios públicos básicos              | Positivo          | -----                                                                                                               | Mejorar los servicios públicos y aumentar la conectividad a internet                    |
| Acceso a programas recreativos y de capacitación | Positivo          | -----                                                                                                               | Crear programas Educativos de carácter social                                           |
| Afectación al Paisaje                            | Negativo          | Realizar diseños armónicos con el medio ambiente y usar la bio-construcción (Construcción con materiales naturales) | -----                                                                                   |
| Socioculturales                                  | Positivo/Negativo | Cambios en las labores del campesino tradicional                                                                    | Pueden llegar a desempeñar actividades de mayor nivel                                   |
| Aumento de la Población extranjera               | Positivo/Negativo | Pueden llegar personas con malas intenciones al lugar. Fortalecer la comunicación entre la comunidad                | Llegan nuevas personas con nuevas idea. Pueden traer soluciones a los problemas locales |
| Incremento de centros de diversión nocturnos     | Negativo          | Esta es una consecuencia al desarrollo de la sociedad. Crear programas de prevención de enfermedades sexuales       | -----                                                                                   |

Tabla 9. Impactos Económicos con sus medidas de mitigación o potencialización.

| Factores Económicos                     | Tipo de Impacto | Medidas de Mitigación | Medidas de Potencialización                                                                                   |
|-----------------------------------------|-----------------|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Oportunidades para la industrialización | Positivo        | -----                 | Se deben crear incentivos por parte del estado para potenciar unidades productivas en las áreas de influencia |
| Desarrollo de empleos de mayor nivel    | Positivo        | -----                 | Es necesario encaminar los empleos operativos                                                                 |

|                                           |          |                                                                                                                            |                                                                                    |
|-------------------------------------------|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
|                                           |          |                                                                                                                            | de la central a personal local                                                     |
| Activación de la economía a nivel local   | Positivo | -----                                                                                                                      | La presencia de la PCH funciona como un motor para la economía                     |
| Sistema interconectado                    | Positivo | -----                                                                                                                      | Tener un sistema eléctrico con generación distribuida es más confiable y eficiente |
| Aumento del consumo de energía            | Positivo | -----                                                                                                                      | Genera más posibilidades para los inversionistas.                                  |
| Mejoramiento y construcción de malla vial | Positivo | -----                                                                                                                      | Se deben crear planes para el mantenimiento y reparación de las vías               |
| Turismo                                   | Negativo | Realizar diseños armónicos con el medio ambiente para no alterar el paisaje del sitio y disminuir la afectación al turismo | -----                                                                              |

## 05 CONCLUSIONES

Actualmente se desarrollan en todo el mundo experimentos intensivos con diferentes alternativas de producción de energía renovable. La energía producida por una Pico central hidroeléctrica está a la vanguardia de estas opciones porque es considerada la tecnología de producción más rentable para proporcionar electricidad a las zonas rurales y permitir la generación de energía utilizando caudales y saltos bajos (1 l/s y 1m respectivamente) (Lahimer, A. et al 2012). Esta tecnología puede jugar un papel crucial en la electrificación de comunidades aisladas del sistema interconectado de energía, con la fuente energética derivada del mismo suministro de agua doméstico.

Los objetivos de desarrollo sostenible son una serie de 17 metas globales adoptadas por las naciones unidas en 2015, haciendo parte de la agenda 2030 para el desarrollo sostenible (Naciones Unidas, 2015). Una PCH implementada correctamente representa una forma efectiva de cumplir con el objetivo # 7 que implica producción de energía asequible y no contaminante. El propósito de esta agenda es enfrentar los desafíos más urgentes que enfrenta la humanidad, promoviendo un equilibrio entre el progreso social, crecimiento económico y la protección del medio ambiente.

En Colombia se han establecido metas ambiciosas de descarbonización como parte de su compromiso con el acuerdo de París y la lucha contra el cambio climático. Se propone la reducción del 51% en las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) para 2030 (Minambiente, 2022), la

neutralidad en carbono para el año 2050 y llegar a la meta de cero deforestación neta para 2030. También se plantea una transición energética importante al proyectar que el 50% de la matriz energética del país funcione mediante fuentes renovables.

Para responder a la pregunta (3) se van a describir los beneficios aportados por la construcción y operación de una PCH en una comunidad. Como primer aspecto, se genera empleo que es mayor en la etapa de construcción y disminuye en la etapa de operación, aunque son empleos de mayor nivel. También es posible hacer aprovechamientos que requieren muy poca agua y caída lo que representa una tecnología accesible y económica donde son necesarios pocos materiales y mano de obra mínima para su construcción, en contraste con una gran central Hidroeléctrica. La calidad de vida es mejorada en cuanto es posible acceso a la educación mediante tecnologías de comunicación, uso de maquinarias industriales, acceso a servicios de salud de alta calidad, posibilidad de aumentar la productividad en el trabajo y la educación gracias a la iluminación nocturna y en general un aumento de la calidad de vida.

La instalación de una PCH representa también una medida de mitigación al cambio climático y la sociedad debe ser consciente de ello. Debido a las regulaciones en Colombia, los desarrolladores de proyectos hidroeléctricos deben hacer unas inversiones sociales materializadas en obras públicas para solucionar las necesidades de la comunidad, lo que implica beneficios directos para la población. Con motivo del desarrollo generado por la PCH en la región, se mejora en gran medida el acceso a servicios públicos básicos, programas recreativos y de capacitación. Otro cambio perceptible luego de la instalación de una PCH en una zona rural es que aumenta la población externa o extranjera, esto puede significar un cambio en las costumbres del lugar en un mundo globalizado donde existe un gran número de personas que llegan a lugares rurales de países en desarrollo para vivir en contacto con la naturaleza. Estos nuevos pobladores pueden traer nuevas ideas que logren las transformaciones necesarias en las comunidades aisladas que han sido históricamente olvidadas por el estado en cuanto a suministro y comunicación.

Precisamente, (Agudelo, 2018) hace énfasis en las afectaciones culturales de las PCH y recomienda la necesidad de seguir explorando este tema con ejercicios de investigación que se desarrollen cerca de las comunidades, que indaguen por sus intereses, por sus miedos, cambios y expectativas. Sugiere que otros estudios incluyan la voz de todos los actores involucrados, analizar el discurso y las acciones de las empresas que ponen en marcha este tipo de proyectos para promover análisis diferenciados del papel que juegan las distintas instituciones del Estado en la regulación de este tipo de emprendimientos.

En cuanto a las barreras ambientales, se deben desarrollar estudios rigurosos de impacto ambiental con el propósito de establecer riesgos a especies e impactos al medio que se puedan generar durante la etapa constructiva y operativa del proyecto. Estos documentos deben ser previamente evaluados por la autoridad ambiental y la comunidad, quienes definirán las medidas necesarias de mitigación o compensación.

Es posible hacer alianzas público – privadas con la comunidad para llevar a cabo proyectos de pico generación, en el caso documentado por (Maher, 2003) , en diciembre de 2001 donde se desarrolló un proyecto piloto para electrificar hogares de bajos ingresos en zonas rurales de Kenya y otros países subsaharianos. En este caso con el apoyo de la Comisión Europea, se financió la tubería de presión y los equipos de generación. La comunidad aportó material de construcción, cables de distribución, alambrado interno y accesorios eléctricos, postes para las redes de distribución y su mano de obra. También fue realizada una transferencia de conocimiento a los ingenieros y mecánicos africanos para

establecer capacidad local de fabricación e instalación de PCHs. Con esta experiencia es posible responder la pregunta número (4) de este estudio referente a la posibilidad de que las poblaciones habitantes de zonas aisladas del sistema nacional de energía pueden tener acceso a este tipo de tecnologías y queda totalmente demostrado que una comunidad unida junto con el apoyo de instituciones es capaz de obtener la energía de una manera limpia, confiable, económica y responsable con el medio ambiente. Es importante resaltar el compromiso de diversas instituciones y organizaciones no gubernamentales con el desarrollo sostenible del planeta, apoyando física y logísticamente la implementación de tecnologías de energía renovable. Lo más importante es buscar los recursos necesarios mediante los fondos de financiación existentes, locales y extranjeros. Una propuesta de este análisis es crear canales de comunicación entre las comunidades (con sus representantes) y las organizaciones que dan este tipo de apoyos, este canal debe ser gestionado por el estado.

En el reporte sobre el desarrollo de la tecnología de PCH emitido por las naciones unidas (ONUDI, 2016), establece que esta tecnología se ubica en el tercer puesto en el uso de energías renovables más desarrolladas a nivel mundial, luego de la eólica y la solar respectivamente. Colombia posee el mayor potencial de PCH's sin desarrollar a nivel mundial. Esto representa una gran oportunidad para las comunidades que deseen tener el acceso a la energía eléctrica o inversionistas que busquen proyectos de alta confiabilidad y por tanto rentabilidad.

Es fundamental profundizar sobre los impactos sociales referenciados anteriormente con nuevos estudios para dar más argumentos a los tomadores de decisiones y que la comunidad sea tenida en cuenta antes de la implementación de un proyecto de generación de energía. Aquí se revela la importancia de los estudios de caso que documenten de manera fiel los procesos que se han llevado a cabo en diversas PCHs en el país. Se resalta la importancia de realizar una consulta adecuada a los grupos involucrados antes de la implementación de los proyectos. Es necesario fortalecer los procesos institucionales para la expedición de licencias para que la comunidad tenga voz y voto ante la implantación de un proyecto que como vimos anteriormente puede afectar positiva o negativamente a la comunidad. Las poblaciones son claves en el desarrollo de las PCHs. Una gran variedad de estudios revisados muestra el descontento de la población con las empresas constructoras y operadoras de los proyectos energéticos. Aquí se evidencia la necesidad de la participación activa de la comunidad en el proceso previo al licenciamiento del proyecto para conocer y poder satisfacer sus necesidades.

La instalación de una PCH representa entonces una forma económica, ecológica y sostenible de producción de energía al alcance de las comunidades e inversionistas interesados en participar del mercado energético. Es fundamental hacer los estudios propuestos en este documento para el correcto diseño e implementación de una Pequeña Central Hidroeléctrica en Colombia. Las PCHs pueden democratizar el acceso a la energía en zonas rurales, pero requieren que el estudio de impacto ambiental (EIA) debe ser llevado a cabo con extrema rigurosidad de acuerdo a la metodología anteriormente descrita y es fundamental mantener el caudal ecológico de la corriente para preservar la buena salud del ecosistema. También se recalca la relevancia de tener la participación activa de la comunidad afectada para evitar conflictos socioambientales. En varios casos documentados en este estudio, se refleja cómo las PCH, aunque se promocionan como energía limpia, pueden generar conflictos graves si no se gestionan con participación comunitaria y criterios ambientales estrictos. Los beneficios económicos son evidentes puesto que la instalación de una PCH es un motor para la economía del sitio donde se lleva a cabo.

Se propone diseñar nuevas políticas públicas para promover el uso de prácticas socioambientales responsables mediante la creación de un sello de sostenibilidad para PCHs en Colombia, avalado por el Ministerio de Ambiente donde se distingan los proyectos que cumplen todos los requerimientos de Ley y los estándares actuales a nivel mundial, ofreciendo beneficios tributarios para promover este enfoque responsable.

El futuro de las PCHs en Colombia se ve prometedor ya que existen diversos incentivos en leyes y un creciente interés del sector público y privado en la generación de energía renovable. Las nuevas regulaciones como la Ley 2099 de 2021 o de Transición Energética impulsan con mayor fuerza las metas propuesta por el gobierno para el año 2030 y 2050, haciendo de Colombia un terreno fértil para la construcción de nuevos emprendimientos de PCH.

Para compensar los periodos de baja producción energética debido a la disminución de caudales, se propone continuar investigaciones en sistemas híbridos (Solar Fotovoltaica-PCH) que garanticen el suministro de energía a lo largo de todo el año incluso ante las condiciones climáticas más adversas. Esto sería tener un sistema de respaldo en caso de eventos climáticos extremos que disminuyan considerablemente los caudales de los afluentes. También las PCHs pueden tener un papel importante en la reactivación económica en la zonas que históricamente han sido afectadas por el conflicto armado. Como se puede observar, este tipo de tecnología aporta beneficios considerables para los territorios donde se implantan si se hace un diseño y ejecución responsables con la sociedad y el medio Ambiente.

Por último, se resalta la importancia de crear regulaciones ambientales más estrictas y que los entes encargados de la regulación de estos estándares sean imparciales y estén al margen de la corrupción mediante la creación de mecanismos de participación efectiva de las comunidades en la toma de decisiones.

## 06 REFERENCIAS

- Acero, C., y Sánchez, J.** "Estado del arte de las investigaciones sobre las centrales hidroeléctricas en Colombia y su impacto ambiental". Tesis de Grado. Universidad la Gran Colombia. Bogotá, Colombia. 2017. Disponible en: <http://hdl.handle.net/11396/5524>.
- Agudelo, S.** "Cocorná: entre la energía y el campo". Tesis de Grado. Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. 2018. Disponible en: [https://bibliotecadigital.udea.edu.co/dspace/bitstream/10495/27368/1/AgudeloSebasti%C3%A1n\\_2018\\_Cocorn%C3%A1Energ%C3%AdaCampo.pdf](https://bibliotecadigital.udea.edu.co/dspace/bitstream/10495/27368/1/AgudeloSebasti%C3%A1n_2018_Cocorn%C3%A1Energ%C3%AdaCampo.pdf).
- Ávila D. et al** "Análisis de la influencia del niño y la niña en la oferta hídrica mensual de la cuenca del río Cali". Revista Tecnura, 2014, 18(41), p. 120-133 ISSN 0123-921X [Revisado: 6 de Febrero de 2025]. Disponible en: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0123921X2014000300010](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123921X2014000300010).
- European Small Hydropower Association - ESHA** . "Guía para el desarrollo de una pequeña central hidroeléctrica". España. 2006. [Consultado: 6 de febrero de 2025]. Disponible en: <https://www.yumpu.com/es/document/read/26777499/guia-para-el-desarrollo-de-una-pequena-centralhidroelectrica>.

- CENSAT Agua Viva.** "Resistencias sociales frente a proyectos hidroeléctricos en Colombia". Bogotá. Colombia. 2016. [Consultado: 6 de febrero de 2025] Disponible en: <https://censat.org/biblioteca/>.
- CENSAT Agua Viva.** "Resistencias sociales frente a PCH en Antioquia". Bogotá. Colombia. 2018. [Consultado: 6 de febrero de 2025] Disponible en: <https://censat.org/biblioteca/>.
- Chaves, M., & Zambrano, M.** "Conflictos culturales y ambientales en torno a los ríos sagrados en Colombia". Revista Colombiana de Antropología 2010, 46(2), p. 317-344. ISSN 2539-472X. [Revisado: 6 de febrero de 2025] Disponible en: <https://revistas.icanh.gov.co/index.php/rca/issue/archive/2>.
- Congreso de Colombia.** "Ley 99 de 1993. Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el sector público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y se dictan otras disposiciones". Bogotá. Colombia. 1993. [Consultado: 6 de Febrero de 2025] Disponible en: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=297>
- Congreso de Colombia.** "Ley 1715 de 2014 Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional." Bogotá. Colombia. 2015. [Consultado: 6 de febrero de 2025] Disponible en: [https://upme.gov.co/Normatividad/Nacional/2014/LEY\\_1715\\_2014.pdf](https://upme.gov.co/Normatividad/Nacional/2014/LEY_1715_2014.pdf)
- Congreso de Colombia.** "Ley 2099 de 2021. Por medio de la cual se dictan disposiciones para la transición energética, se dinamiza el mercado energético en el país y se dictan otras disposiciones". Bogotá. Colombia. 2021. [Consultado: 6 de Febrero de 2025] Disponible en: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=166009>
- Corporación autónoma regional de las cuencas de los ríos negro y nare - Cornare.** " Estudio de impacto ambiental construcción y operación de centrales hidroeléctricas". El Santuario. Colombia. 2020. [Consultado: 6 de Febrero de 2025] Disponible en: [https://www.cornare.gov.co/TramitesAmbientales/TR/Terminos\\_Referencia\\_PCH\\_V.01.pdf](https://www.cornare.gov.co/TramitesAmbientales/TR/Terminos_Referencia_PCH_V.01.pdf).
- Diez J.M., & Olmeda S.** "Diseño eco-hidrológico de pequeñas centrales hidroeléctricas: evaluación de caudales ecológicos". Revista Energética 2008, (39), p. 65-76. ISSN 1020-9833 [Revisado: 6 de Febrero de 2025] Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/278723013\\_DISENO\\_ECO-HIDROLOGICO\\_DE\\_PEQUENAS\\_CENTRALES\\_HIDROELECTRICAS\\_EVALUACION\\_DE\\_CAUDALES\\_ECOLOGICOS](https://www.researchgate.net/publication/278723013_DISENO_ECO-HIDROLOGICO_DE_PEQUENAS_CENTRALES_HIDROELECTRICAS_EVALUACION_DE_CAUDALES_ECOLOGICOS).
- Departamento Nacional de Planeación DNP.** "Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026: Colombia, Potencia Mundial de la Vida". Bogotá, D.C.: Imprenta Nacional de Colombia, 2023. [Consultado: 6 de Febrero de 2025] Disponible en: <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/Publicaciones/plannacional-de-desarrollo-2022-2026-colombia-potencia-mundial-de-la-vida.pdf>.

- Duque Ramírez, H. A.** "Análisis de los impactos sociales de las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) en las comunidades del oriente antioqueño: caso PCH El Popal, municipio de Cocorná". Tesis de Maestría. Universidad de Medellín. Medellín, Colombia. 2021. [https://repository.udem.edu.co/bitstream/handle/11407/6409/T\\_MA\\_490.pdf](https://repository.udem.edu.co/bitstream/handle/11407/6409/T_MA_490.pdf)
- Franco, J.** "Conflictos socioambientales y lucha por el territorio en Colombia". CENSAT Agua Viva. 2013. [Consultado: 6 de Febrero de 2025] Disponible en: <https://censat.org/biblioteca/>.
- Gielen, D.** (2012) "Prospects for renewable power - An IRENA perspective". International Renewable Energy Agency (IRENA). Bonn, Germany. [Consultado: 6 de Febrero de 2025] Disponible en: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Events/2012/Jul/3/GIELEN\\_Dolf\\_Session\\_ONE.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Events/2012/Jul/3/GIELEN_Dolf_Session_ONE.pdf)
- IDAE.** "Energías renovables". 2020. Madrid. España. [Consultado: 6 de Febrero de 2025] Disponible en: <https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P.** "Metodología de la investigación" (6ª ed.). McGraw-Hill, 2014. [Citado: 6 de Febrero de 2025] Disponible en: [https://apiperiodico.jalisco.gob.mx/api/sites/periodicooficial.jalisco.gob.mx/files/metodologia\\_de\\_la\\_investigacion\\_-\\_roberto\\_hernandez\\_sampieri.pdf](https://apiperiodico.jalisco.gob.mx/api/sites/periodicooficial.jalisco.gob.mx/files/metodologia_de_la_investigacion_-_roberto_hernandez_sampieri.pdf)
- Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.** Biodiversidad 2006: Estado y tendencias de la biodiversidad en Colombia. Bogotá. Instituto Humboldt. Bogotá. Colombia. 2006. [Consultado: 6 de Febrero de 2025] Disponible en: <https://reporte.humboldt.org.co/biodiversidad/>
- Jiménez-Segura, L. F., Palacio, J., & López-Casas, S.** (2016). "Fragmentación de ríos y efectos sobre los peces en la cuenca del Magdalena, Colombia". Revista de Biología Tropical , 64(2), 747-761. [Revisado: 6 de febrero de 2025]. Disponible en: <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/rbt/issue/view/2148>.
- Lahimer, A. et al.** "Research and development aspects of pico-hydro power". Renewable and Sustainable Energy Reviews 2012 ,16(8), 5861-5878. ISSN: 1364-0321. [Revisado: 6 de Febrero de 2025] Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112003292>.
- Maher, P., & Smith, N.** (2001). "Pico hydro for village power. A Practical Manual for schemes up to 5 kW in Hilly areas". UK Department for International Development (DfID). Reino Unido. [Consultado: 6 de Febrero de 2025]. Disponible en: [https://energypedia.info/images/9/92/Ph\\_manual\\_s.pdf](https://energypedia.info/images/9/92/Ph_manual_s.pdf).

**Maher, P., Smith, N. P. A., & Williams, A. S.** “Assessment of pico hydro as an option for off-grid electrification in Kenya”. Renewable Energy 2003, 28(9), ISSN: 1357-1369. [Revisado: 6 de Febrero de 2025] Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148102002161>.

**Madrigal, C. C.** (2018). “Diseño de una mini central hidroeléctrica en el río Lenguazaque, municipio de Lenguazaque – Cundinamarca”. Tesis de Grado. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá. Colombia. 2018. [Consultado: 6 de Febrero de 2025] Disponible en: <https://repository.udistrital.edu.co/server/api/core/bitstreams/40a474db-da2d-4440849d4b6906885d6f/content>.

**Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible** - Actualización de la NDC de Colombia 2020-2030. Bogotá. Colombia. 2022. [Consultado: 6 de Febrero de 2025] Disponible en: <https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/NDC%20actualizada%20de%20Colombia.pdf>.

Mojica, J. I., Usma, J. S., Álvarez-León, R., & Lasso, C. A. (Eds.). “Libro rojo de peces dulceacuícolas de Colombia 2012”. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. [Citado: 6 de Febrero de 2025] Disponible en: <https://repository.humboldt.org.co/entities/publication/c5b76b00-d180-416b-b473-1df4534894c9>.

**Morales Rodriguez, V. O., & Castaño Gamboa, N.** “Desarrollo de un estudio de viabilidad técnica, administrativo, legal, ambiental y financiera de una pequeña central hidroeléctrica en la quebrada de San José – Tolima”. Tesis de Grado Especialización. Universidad Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. 2017. [Consultado: 6 de febrero de 2025] Disponible en: <https://repository.udistrital.edu.co/items/fce1e451-64f8-4a2e-94d5-92ab80591856>.

**Morales, S. e.** “Etapas de desarrollo de un proyecto de pequeñas centrales hidroeléctricas: Contexto y criterios básicos de implementación”. Revista DYNA 2014, Vol. 81, Nº. 184, págs. 178-185 ISSN 0012-7353. [Revisado: 6 de febrero de 2025] Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4742825>.

**ONIC (Organización Nacional Indígena de Colombia)** - Informe sobre la violación del derecho a la consulta previa en proyectos hidroeléctricos. Bogotá, Colombia. 2017. [Consultado: 6 de Febrero de 2025] Disponible en: <https://www.onic.org.co/mediateca>.

**ONIC (Organización Nacional Indígena de Colombia)** - Informe sobre conflictos interétnicos por proyectos hidroeléctricos. Bogotá, Colombia. 2018. [Consultado: 6 de Febrero de 2025] Disponible en: <https://www.onic.org.co/mediateca>.

**Organización de las Naciones Unidas ONU.** - Objetivos de desarrollo sostenible. Nueva York, Estados Unidos. 2015. [Consultado: 6 de Febrero de 2025] Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>.

**Organización de las Naciones Unidas ONU.** - Informe Mundial sobre el Desarrollo de la Pequeña Central Hidroeléctrica. Nueva York, Estados Unidos. 2019. [Consultado: 6 de Febrero de 2025] Disponible en: [https://www.unido.org/sites/default/files/files/2020-05/Executive%20Summary%20%20Spanish\\_1.pdf](https://www.unido.org/sites/default/files/files/2020-05/Executive%20Summary%20%20Spanish_1.pdf).

**Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI) y Centro Internacional de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (CIPCH)** - Informe Mundial sobre el Desarrollo de la Pequeña Central Hidroeléctrica. Viena y Hangzhou. 2016. [Consultado: 6 de Febrero de 2025] Disponible en: [https://www.unido.org/sites/default/files/files/2020-08/WSHPDR\\_2016\\_Executive\\_Summary\\_Spanish .pdf](https://www.unido.org/sites/default/files/files/2020-08/WSHPDR_2016_Executive_Summary_Spanish.pdf).

**Osorio Londoño, I.** “Impactos ambientales, sociales y económicos de las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) en Antioquia”. Tesis de Maestría. Universidad EAFIT. Medellín, Colombia. 2017. [Consultado: 6 de Febrero de 2025] Disponible en: <https://repository.eafit.edu.co/server/api/core/bitstreams/24b29e1a-16c0-4521-8ccaa40504c744af/content>.

**Oviedo-Ocaña, E. R.** (2018). Las Hidroeléctricas: efectos en los ecosistemas y en la salud ambiental. Revista de la Universidad Industrial de Santander. Salud. 2018. vol.50 no.3. ISSN 01210807. [Revisado: 6 de febrero de 2025] Disponible en: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0121-08072018000300191](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-08072018000300191).

**REN21 (Renewables Now)- Renewables 2023 Global Status Report.** París, Francia. 2023. [Consultado: 6 de febrero de 2025] Disponible en: <https://www.ren21.net/gsr-2023/>.

**Rodríguez, G. A., & Rojas, J. C.** “Conflictos socioambientales por la construcción de hidroeléctricas en Colombia”. Revista de Estudios Sociales 2015, 52, 52-67. [Revisado: 6 de febrero de 2025] Disponible en: <https://revistas.uniandes.edu.co/index.php/res/issue/view/399>.

- Smith, R., Gil, M. M., & Ángel, W.** (2004). "Análisis de inversión en pequeñas centrales hidroeléctricas". I CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA SAÑO PEDRO, ESTADO DE SAÑO PABLO, BRASIL, OCTUBRE 2004. Universidad Nacional de Colombia. [Revisado: 6 de febrero de 2025] Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/7931/AA3740.pdf>
- Ulloa, A. & Coronado, S.** "Extractivismos y posconflicto en Colombia: retos para la paz territorial". Bogotá: Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, Facultad de Ciencias Humanas, Departamento de Geografía, Centro de Investigación y Educación Popular Programa por la Paz. 2016. [Citado: 6 de Febrero de 2025] Disponible en: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/imanimundo/article/view/65241/62886>.
- Unidad de Planeación Minero Energética UPME** - Boletín Estadístico de Minas y Energía. Bogotá. Colombia. 2016, [Consultado: 6 de Febrero de 2025] Disponible en: [https://www1.upme.gov.co/PromocionSector/SeccionesInteres/Documents/Boletines/Boletin\\_Estadistico\\_2012\\_2016.pdf](https://www1.upme.gov.co/PromocionSector/SeccionesInteres/Documents/Boletines/Boletin_Estadistico_2012_2016.pdf).
- Unidad de Planeación Minero Energética UPME** - ATLAS potencial hidroenergetico de colombia 2015. Bogotá. Colombia. 2011, [Consultado: 6 de Febrero de 2025] Disponible en: <https://www1.upme.gov.co/Paginas/Primer-Atlas-hidroenergetico-revela-gran-potencial-enColombia.aspx>.
- Unidad de Planeación Minero Energética UPME** - Integracion de las energias renovables no convencionales en colombia. Bogotá. Colombia. 2011, [Consultado: 6 de Febrero de 2025] Disponible en: [http://www.upme.gov.co/Estudios/2015/Integracion\\_Energias\\_Renovables/INTEGRACION\\_ENERGIAS\\_RENOVANLES\\_WEB.pdf](http://www.upme.gov.co/Estudios/2015/Integracion_Energias_Renovables/INTEGRACION_ENERGIAS_RENOVANLES_WEB.pdf).
- United States Agency for International Development USAID** - Pautas ambientales sectoriales para un diseño ambientalmente sostenible solido (ESD)- Energia a pequeña escala. Washington. Estados Unidos. 2018.
- Vélez-Torres, I., & Vélez Galeano, H.** " Plexos conflictivos: una visión territorial e histórica de los conflictos ambientales en la cuenca alta del río Cauca". Revista Colombiana de Sociología 2018, 42(1), 33-58 ISSN en Línea: 2256-5485. [Revisado: 6 de Febrero de 2025] Disponible en: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/recs/article/view/73181/pdf>.
- Villar Blanco, P. E.** "Evaluación del estado actual de las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH's) de la Costa Atlántica". Tesis de Grado. Universidad de La Salle.Bogotá, Colombia. 2006. [Consultado: 6 de Febrero de 2025] Disponible en: <https://ciencia.lasalle.edu.co/items/cbcc571d-e1de-4c0e-b127fd27370d2728>].

#### Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

**ORCID de los autores**

[Andres Mauricio Joya Delgado](https://orcid.org/0000-0002-2702-4999) <https://orcid.org/0000-0002-2702-4999>

[Orlando Celso Longo](https://orcid.org/0000-0002-0323-473X) <https://orcid.org/0000-0002-0323-473X>

[Luciane Alcoforado](https://orcid.org/0000-0002-9504-8087) <https://orcid.org/0000-0002-9504-8087>

## Evaluando la infraestructura industrial para reducir la contaminación del aire en Chimbote 2025

**Alex Jhetli Alvarado Margarín**

E-MAIL: alalvaradoma@ucv.virtual.edu.pe

Facultad De Ingeniería Y Arquitectura. Escuela Profesional De Ingeniería Civil

**Elías Antonio Cornelio Milla**

E-MAIL: ecornelio@ucvvirtual.edu.pe

Facultad De Ingeniería Y Arquitectura. Escuela Profesional De Ingeniería Civil

**César Antonio Espinoza Gómez**

E-MAIL: cespinozagom@ucvvirtual.edu.pe

Facultad De Ingeniería Y Arquitectura. Escuela Profesional De Ingeniería Civil

**Mailyn Anthonela Torres Risco**

E-MAIL: matorresri@ucvvirtual.edu.pe

Facultad De Ingeniería Y Arquitectura. Escuela Profesional De Ingeniería Civil

**Urbano Tapía Corsobel**

E-MAIL: curbanot@ucvvirtual.edu.pe

Facultad De Ingeniería Y Arquitectura. Escuela Profesional De Ingeniería Civil

**Marggie Nadim Velasquez  
Ramos**

E-MAIL: mnvelasquezv@ucvvirtual.edu.pe

Facultad De Ingeniería Y Arquitectura. Escuela Profesional De Ingeniería Civil

### RESUMEN

En la realidad problemática. La presente investigación tiene como objetivo evaluar la infraestructura industrial de la ciudad de Chimbote en el año 2025 y su relación con la reducción de la contaminación del aire. Mediante un enfoque descriptivo y el uso de las encuestas, se busca identificar las principales deficiencias estructurales y tecnologías de las industrias locales, así como los contaminantes predominantes en el ambiente. La problemática se enmarca en el contexto de una modernización industrial insuficiente, con una infraestructura obsoleta que contribuye significativamente a la emisión de partículas nocivas (PM2.5 y PM10), gases tóxicos (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO) y al deterioro de la salud pública. Se analizan antecedentes internacionales, nacionales y locales que evidencian la relación entre contaminación y deficiente gestión ambiental. Los resultados pretenden aportar estrategias sostenibles como la implementación de tecnologías limpias, el uso de materiales adecuados y el fortalecimiento de la fiscalización ambiental. Esta investigación busca generar propuestas que favorezcan un desarrollo industrial responsable y sostenible, mitigando los efectos negativos sobre la calidad del aire y la salud de los habitantes de Chimbote. La infraestructura industrial, como variable central, se estudia desde sus dimensiones físicas, tecnológicas y de servicios básicos, siendo clave para alcanzar estos objetivos. Cubre temas en educación, ciencias naturales, ciencias sociales, cultura, comunicación e información.

**PALABRAS  
CLAVES:**

Infraestructura industrial, contaminación del aire, salud pública, estrategias sostenibles

Evaluating industrial infrastructure to reduce air pollution in Chimbote, 2025

## ABSTRACT

In the current problematic situation. This research aims to evaluate the industrial infrastructure of the city of Chimbote in 2025 and its relationship to air pollution reduction. Using a descriptive approach and surveys, it seeks to identify the main structural and technological deficiencies of local industries, as well as the predominant pollutants in the environment. The problem is framed within the context of insufficient industrial modernization, with an aging infrastructure that significantly contributes to the emission of harmful particles (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), toxic gases (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO), and the deterioration of public health. International, national, and local data are analyzed, demonstrating the relationship between pollution and poor environmental management. The results aim to contribute to sustainable strategies such as the implementation of clean technologies, the use of appropriate materials, and the strengthening of environmental oversight. This research seeks to generate proposals that promote responsible and sustainable industrial development, mitigating the negative effects on air quality and the health of Chimbote's residents. Industrial infrastructure, as a central variable, is studied from its physical, technological, and basic services dimensions, and is key to achieving these objectives. Covers topics in education, natural sciences, social sciences, culture, communication and information.

**KEYWORDS:** Industrial infrastructure, air pollution, public health, sustainable strategies

## 01 INTRODUCCION

En la realidad problemática tenemos que el mundo está en constante desafío con inversiones y modernización a las Industrias para propiciar el máxima rendimiento de la producción donde dará su alcance a la reducción manufacturera, dicho ello se está propagando para adquirir una mejor brecha con la robotización para la calidad productiva, en consiguiente de las integridades físicas en abasto dando satisfacción al consumista y vendedor, la innovación es la preocupación de sus competencias para automatizarlos a grandes escalas, las industrias en sus servicios son más fugas que estar en servicios más duraderas, dado a ello están a una cadena para fomentar el desarrollo internacional que hoy en día se goza de muchos tecnologías, pero la gran triste realidad estamos sometidos a gran escala de contaminación, ya que en algunos países siempre alude el descuido de las infraestructuras y la vulneración contaminante se ha vuelto más propicia al aire, según al desarrollo y la implementación cada vez se vuelve más potente para contaminar y deteriorar la capa de ozono donde a la larga para muchos serán el lamento del caos que lo vamos vivir. Nuestra Nación Peruana se está sometiendo en algunos desafíos de la modernización con las Infraestructuras Industriales a la competencia laboral, para así tener una mejor productividad con la finalidad de esquematizar los trabajos digitales y robotizadas, para así puedan cumplir con el rol principal, mientras otras industrias juegan con una mayor agresividad para mejorar y reducir la urgencia contaminante ante la exposición de algunos trabajadores con lo expuesto a rendir la vida por una infraestructura insuficiente en mejora.

En el transcurso de los años no se ve muy controlado por parte de los ministros ante la irregularidad que demuestran algunos, el análisis de un desorden seguirá alternando la contaminación fomentada por falta de una infraestructura adecuada ante la dejadez y el descuido por parte de las autoridades fiscalizadoras. En el país, la contaminación del aire representa una problemática ambiental y de salud pública cada vez más crítica, impulsada en gran medida por la infraestructura industrial obsoleta y la débil regulación ambiental. Las actividades de la minería, la metalurgia, transporte y la industria pesquera figuran entre las principales fuentes fijas de emisiones contaminantes, lanzando al aire grandes cantidades de polvo, gases del nitrógeno y humo con azufre. Un caso significativo de esto es el de La Oroya, donde las emisiones del complejo metalúrgico han superado los límites permitidos, afectando seriamente la salud de la población local.

La falta de implementación de tecnologías limpias, así como de sistemas efectivos de monitoreo ambiental, agrava la situación, especialmente en un contexto donde las políticas públicas y la fiscalización son insuficientes para contener el daño. La ciudad de Chimbote, situada en la región Áncash, ha sido durante décadas el núcleo importante del desarrollo industrial en el país, destacando principalmente por su actividad pesquera y siderúrgica. Sin embargo, este crecimiento ha venido acompañado de serios desafíos ambientales, entre los que destaca la contaminación del aire, un problema que afecta directamente la salud de la población y el bienestar de los ecosistemas. Las instalaciones industriales locales, muchas de ellas con infraestructura antigua, han contribuido significativamente a la emisión de gases contaminantes y material articulado, generando preocupación tanto en la comunidad como en las autoridades ambientales. Ante esta situación, se vuelve fundamental analizar el estado actual de las infraestructuras industriales en Chimbote, con el propósito de identificar oportunidades de mejora que permitan reducir el impacto ambiental. La incorporación de tecnologías limpias, el cumplimiento de normativas ambientales y la implementación de sistemas de monitoreo de emisiones son algunas de las estrategias clave para mitigar la contaminación atmosférica.

Esta investigación busca contribuir a la comprensión del problema y proponer alternativas que favorezcan un desarrollo industrial más sostenible y responsable con el entorno. En la ciudad de Chimbote, cuyo crecimiento económico y urbano surge de una medida de un desarrollo proyectado ante la ingeniería técnica y estructural, se evidencia una brecha tecnológica en los procesos de diseño y ejecución. A pesar de que el diseño asistido por computadora (CAD) representa una herramienta moderna y eficiente, su adopción no es aún generalizada en el ámbito local. Muchos profesionales continúan utilizando métodos convencionales, lo que se traduce en limitaciones en la precisión del diseño, demoras en los tiempos de ejecución y variabilidad en la calidad de los proyectos. Ante esta problemática surge la siguiente interrogante: ¿De qué manera la evaluación de infraestructura industrial reducirá la contaminación del aire en Chimbote 2025? Para abordar este problema formulamos los siguientes objetivos, como objetivo general tenemos Reducir la contaminación del aire evaluando la infraestructura industrial en Chimbote 2025 y como objetivos específicos tenemos, Identificar las sustancias contaminantes en Chimbote 2025, Disminuir las eficiencias de la infraestructura industrial en Chimbote 2025, Sugerir el empleo de materiales adecuados en la infraestructura industrial de Chimbote 2025.

Esta investigación se respalda en los siguientes antecedentes que está compuesta por niveles comenzando con el nivel internacional. Según Tondeur (2020), en su tesis titulada “Combinación de emisiones industriales elevadas y la persistente inversión térmica”, realizada en Bélgica, se analizó la acumulación masiva de contaminantes en el aire del Valle del Mosa, una zona altamente industrializada. El estudio tuvo como objetivo comprender cómo la combinación de emisiones industriales con una inversión térmica provocó concentraciones letales de contaminantes. Durante el evento, se reportaron síntomas respiratorios agudos en la población, como dificultad para respirar, tos, dolor de pecho, náuseas y vómitos. Los resultados indicaron la muerte de más de 60 personas —principalmente ancianos con afecciones respiratorias previas— y cientos de afectados con graves problemas de salud. También se registró la muerte de ganado. Como respuesta, se conformó una comisión que recomendó mejorar la legislación sobre contaminación del aire y adoptar sistemas de monitoreo similares a los del Reino Unido. En conclusión, Tondeur evidenció que la contaminación atmosférica industrial, combinada con condiciones meteorológicas desfavorables, puede tener consecuencias letales para la salud humana y animal, afectando principalmente a una determinada de mayor edad y personas con enfermedades respiratorias preexistentes. Dr. Henry Antoine Des Voeux(2020), con su tesis titulada “Demostración de los graves riesgos para la salud y el medio ambiente derivados de la contaminación atmosférica severa” realizada en Londres, Reino Unido. Dónde tuvo como objeto estudiar el Smog Industrial, comprender las causas, la magnitud de sus impactos (especialmente en la salud pública), y aprender de esta experiencia para prevenir futuros desastres similares en otras ciudades del mundo.

Teniendo un tipo de investigación de variable cualitativa, donde impulsa la creación de políticas de calidad del aire y la conciencia ambiental. Durante este evento hubo una densa niebla tóxica donde redujo la visibilidad a unos pocos metros, paralizando la ciudad. El transporte público se detuvo, los servicios de emergencia se vieron obstaculizados y las actividades cotidianas se interrumpieron. Cómo resultado aumentó significativamente las muertes, destinadas entre 4,000 y 12,000 personas, principalmente bebés, ancianos y personas con dificultades respiratorias preexistentes como bronquitis y asma. Miles más sufrieron problemas respiratorios a largo plazo. En conclusión, el Smog Industrial de Londres fue una tragedia evitable que sirvió como una llamada de atención brutal sobre los efectos letales de la contaminación atmosférica. Su legado impulsó cambios legislativos cruciales y sentó las bases para las regulaciones modernas de calidad del aire en todo el mundo. Y en nivel

nacional, Zevallos Sulca Liz Elizabeth realizó su tesis titulada “La contaminación ambiental en el sector industrial de los derechos fundamentales en el Perú 2024” en Lima, Perú la cual tuvo como objetivo (analizar cómo la contaminación ambiental en el sector industrial afecta los derechos fundamentales en el Perú), teniendo un tipo de investigación de variable cualitativa, se realizó una encuesta en donde se tuvo como resultados, donde los participantes lo viven que la contaminación ambiental afecta a varios derechos fundamentales siendo los más mencionados la promulgación hacia el ecosistema más adecuado, el derecho a una salud digna, el derecho a una vida propicia, además los entrevistados identificaron problemas como la ineficiencia en la fiscalización de normativas ambientales, la falta de conciencia ambiental y el incumplimiento en el sector industrial son obstáculos clave en la lucha contra la contaminación.

Como conclusión, se identificó que la contaminación atmosférica causada por la industria tiene un impacto fuerte en los derechos fundamentales dentro del país, principalmente en el derecho a un ambiente limpio y digno, la salud y la vida. Las entrevistas realizadas mostraron que hay un consenso en que este problema empeora la calidad de vida de las personas y está relacionado con otros derechos básicos. Además, se reconoció que la falta de cumplimiento de las normas ambientales, la poca conciencia sobre el tema y la inconsciencia en el sector industrial son obstáculos importantes. Noa Barrientos Adelaida, la contaminación ambiental consiste en su tesis “evaluar políticas públicas en el Perú ante la contaminación” en la universidad de Ayacucho – Huamanga 2024. Su objetivo general “es evaluar la determinada relación ante la contaminación ambiental y la aplicación Políticas Públicas 2024”, tuvo un tipo de investigación cuantitativa, es generado a partir de un proceso deductivo en el que en la que atraviesa una amplia numeración y el análisis estadístico inferencial, donde fue abordada una hipótesis previamente estandariza relaciones de causa y efecto, dada la suposición mediante un análisis estadístico. tiene como resultado, dada la determinada la relación tiene una positiva alta, dado que, en la actualidad las políticas públicas medio ambientales en el Perú, surge un múltiple de eminentes problemas desde el nivel ejecutivo está en una deficiencia de gestión para la formulación de políticas tanto de gobierno como de estado. Se evade la importancia de mitigar nuestra casa y las mejoras necesarias para reducir la emergente contaminación en nuestro País. Resultado general, es que, a pesar de los números de gobiernos, partidos políticos, alcaldes y presidentes, aún no se logra llevar a cabo las políticas de manera eminentes, dónde cada vez se vuelve un tema urgente y crucial, esto es un espacio donde habitamos. En nivel local, Vargas Yañez (2022), en su estudio titulado "La eficacia de la gestión ambiental en los delitos de contaminación del ambiente en la Fiscalía Especializada en Materia Ambiental, Chimbote 2017-2018", realizado en la Universidad César Vallejo, tuvo como objetivo general analizar la eficacia de la gestión ambiental en los delitos de contaminación del ambiente en dicha fiscalía durante el periodo 2017-2018. La investigación fue de tipo cuantitativa y descriptiva. Los resultados evidenciaron que la eficacia de la Fiscalía Ambiental en la atención de denuncias por delitos ambientales es baja, debido a limitaciones en recursos y procedimientos. En su conclusión, la autora señala que la gestión ambiental presenta deficiencias que afectan su eficacia, lo que evidencia la necesidad de fortalecer las capacidades operativas y normativas de esta institución.

López García (2020) llevó a cabo el estudio titulado "Evaluación de la calidad del aire en la ciudad de Chimbote y su impacto en la salud pública", presentado en la Universidad Nacional del Santa (UNS). El objetivo general fue evaluar la calidad del aire en diferentes zonas de Chimbote y analizar su relación con enfermedades respiratorias y la incidencia de enfermedades en la población. La investigación fue de tipo cuantitativa y descriptiva. Los resultados mostraron niveles elevados de material particulado (PM2.5 y PM10) en áreas cercanas a zonas industriales, lo cual se relaciona con

un incremento en los casos de enfermedades respiratorias, especialmente en niños y adultos mayores. En conclusión, la contaminación del aire en Chimbote, influenciada por actividades industriales, representa un riesgo significativo para la salud pública. Este hallazgo resalta la necesidad de implementar medidas de control ambiental. Esta investigación se respalda en las variables que son las siguientes: la infraestructura industrial. Según ARQ (2023). Se define como el conjunto de instalaciones, servicios y estructuras esenciales para el desarrollo de actividades productivas en el sector industrial. Desde una perspectiva conceptual, comprende los elementos físicos y tecnológicos necesarios para la producción y distribución de bienes y servicios, tales como fábricas, redes de transporte, suministro energético, telecomunicaciones y servicios básicos. En el plano operacional, se refiere a su aplicación práctica en las actividades diarias de las empresas, abarcando la gestión de recursos, el mantenimiento de instalaciones y la optimización de procesos para asegurar eficiencia y productividad. Teniendo en cuenta las siguientes dimensiones como, Instalaciones físicas, Tecnología y maquinaria, Accesibilidad y servicios. Zevallos (2017) destaca la importancia de espacios diseñados específicamente para albergar empresas industriales, como los parques industriales o zonas económicas especiales, los cuales ofrecen infraestructuras compartidas que favorecen la eficiencia y la colaboración entre distintas compañías.

En resumen, la infraestructura industrial constituye un componente estratégico para impulsar el crecimiento económico y fomentar la inversión en sectores productivos. (Loganx, 2024) La infraestructura industrial comprende el conjunto de instalaciones físicas, sistemas y servicios esenciales que permiten el desarrollo eficiente de la actividad productiva. Esto abarca desde fábricas y parques industriales hasta redes de energía, transporte y almacenamiento, todos ellos fundamentales para asegurar la continuidad operativa de las empresas. Una infraestructura adecuada es clave para garantizar no solo la eficiencia, sino también la seguridad y el crecimiento de la industria. Por ejemplo, una nave industrial debe disponer del espacio suficiente para albergar maquinaria, contar con instalaciones eléctricas e hidráulicas apropiadas, áreas de almacenamiento y sistemas de distribución, así como servicios básicos para el personal. Como otra variable tenemos la contaminación del aire. Según Wark y Warner (2020), la contaminación del aire se define como la presencia de contaminantes en la atmósfera en cantidades que pueden afectar la vida humana, animal y vegetal. Desde una perspectiva conceptual, se trata de la alteración de la composición natural del aire debido a la emisión de gases tóxicos, partículas en suspensión y compuestos químicos.

Por otro lado, en un enfoque operacional, la contaminación del aire implica la medición, control y gestión de los contaminantes atmosféricos según su origen, concentración y efectos, mediante estrategias como la regulación de emisiones industriales, el monitoreo de la calidad del aire y la aplicación de tecnologías para su reducción (Fuentes, 2023). Sus dimensiones son: Niveles de partículas en suspensión (PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>), Existencia de gases tóxicos (CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>), Medida de la calidad del aire (ICA), Frecuencia e intensidad de las emisiones de industrias, Impacto en la salud de la población. Contaminación del aire Según la Organización Mundial de la Salud (2021), la contaminación del aire ocasiona cerca de siete millones de muertes anticipadas cada año, convirtiéndose en uno de los mayores retos ambientales contemporáneos. Este fenómeno afecta tanto a naciones desarrolladas como a aquellas en proceso de desarrollo, debido a la creciente urbanización y la actividad industrial. Causas principales. Seinfeld y Pandis (2016) afirman que los vehículos motorizados son una fuente significativa de contaminantes atmosféricos, ya que emiten monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y partículas pequeñas, especialmente en zonas urbanas. De igual manera, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, 2020) destaca que las

plantas generadoras de energía que utilizan carbón o petróleo emiten grandes cantidades de dióxido de azufre y otros compuestos perjudiciales para el ambiente y la salud humana. Efectos en la salud y el ambiente, Dominici et al. (2006) señalan que la exposición prolongada a partículas finas (PM2.5) se asocia con enfermedades respiratorias, problemas cardiovasculares y un aumento en la mortalidad prematura. A su vez, el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2021) indica que muchos de estos contaminantes también contribuyen al calentamiento global, intensificando la crisis climática que enfrenta el planeta. Soluciones propuestas, Fuller y Landrigan (2018) proponen la implementación de políticas públicas centradas en la transición hacia fuentes de energía renovable, el fortalecimiento del transporte.

## 02 MÉTODO

El tipo de investigación usada será de carácter descriptivo, Mario Tamayo define esta como la que se enfoca en describir de manera ordenada las características de una población, situación o lugar sin buscar explicar causas, probar hipótesis o hacer predicciones recolectar y presentar los resultados de forma clara. Hernández, Fernández y Baptista (2014) le dan la definición a la población como el grupo de todos los casos que tienen características similares a determinadas distinciones. Puede estar formada por personas, instituciones, documentos, animales, objetos, etc. Palella y Martins (2008), nos dice que la muestra es una parte o un subgrupo de la población dentro de la cual deben tener características reproducibles de la manera más exacta posible. En esta investigación el instrumento que se utilizará será la encuesta, García Ferrando(1993) describe su encuesta de investigación ante una muestra de sujetos representativos de una conectividad más extensa, que se realizó a cabo en un determinado contexto de la vida a diaria, realizando sucesos estandarizados de preguntas, con la finalidad de adquirir mediciones cuantitativas de una mayor diversidad que cumple características objetivas y subjetivas de la humanidad.

## 03 RESULTADOS

Tabla 1. ¿Considera que la calidad del aire en Chimbote ha mejorado, empeorado o se mantiene igual en los últimos años?

| Respuesta                                     | Número | Ratio |
|-----------------------------------------------|--------|-------|
| Se sigue manteniendo                          | 1      | 10%   |
| Se mantiene igual                             | 1      | 10%   |
| Ha mejorado                                   | 1      | 10%   |
| Ha empeorado mucho aire mucho frío            | 1      | 10%   |
| Ha empeorado                                  | 1      | 10%   |
| En los últimos años ha empeorado              | 1      | 10%   |
| Considero que la calidad del aire a empeorado | 1      | 10%   |

Tabla 2. ¿Cómo se sugiere reducir la cantidad de basura que llega de manera humanista y natural?

| Respuesta                                                                      | Número | Ratio |
|--------------------------------------------------------------------------------|--------|-------|
| Reciclando                                                                     | 2      | 20%   |
| Sacando la basura en los horarios que pasan los recolectores                   | 1      | 10%   |
| Reemplazando productos reutilizables                                           | 1      | 10%   |
| Realizando una campaña de limpieza para mitigar la contaminación               | 1      | 10%   |
| Que se realice campañas de limpieza por parte de la municipalidad y ciudadanos | 1      | 10%   |
| Poniendo tachos de basura                                                      | 1      | 10%   |
| Las empresas deben tener una infraestructura amigable con el medio ambiente    | 1      | 10%   |
| Con el sistema de reciclado y con el sembrado y cuidado de áreas verdes        | 1      | 10%   |
| Aplicando las 3R                                                               | 1      | 10%   |

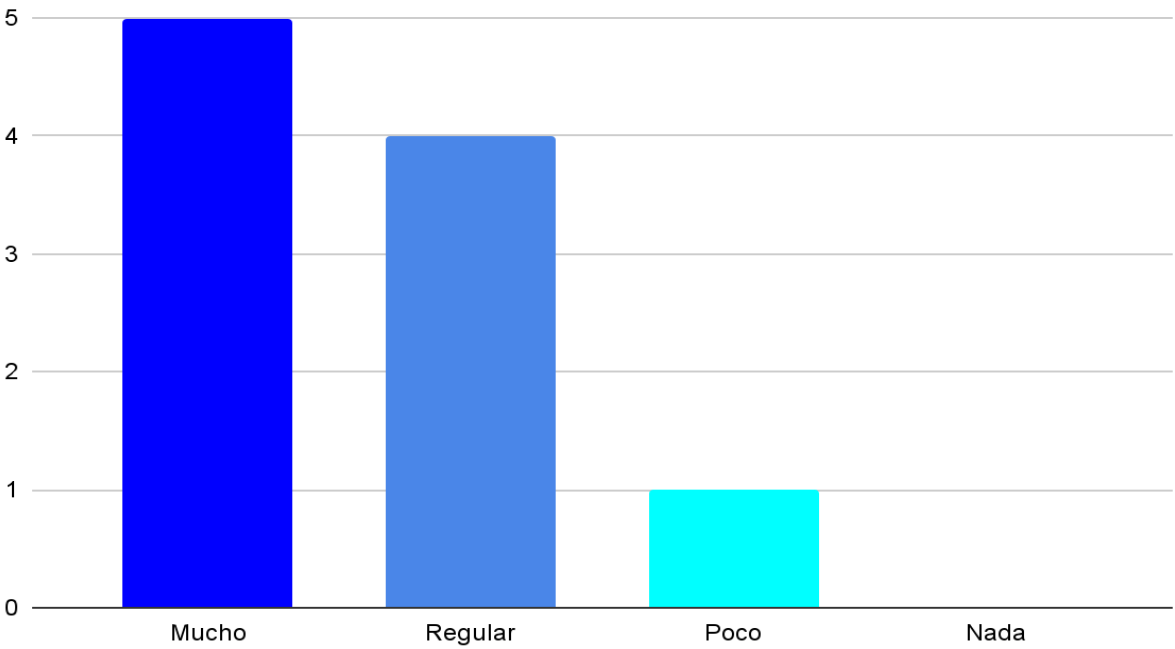


Figura 1. Gráfico: ¿Qué tan afectado(a) se siente por la contaminación del aire en su vida diaria?

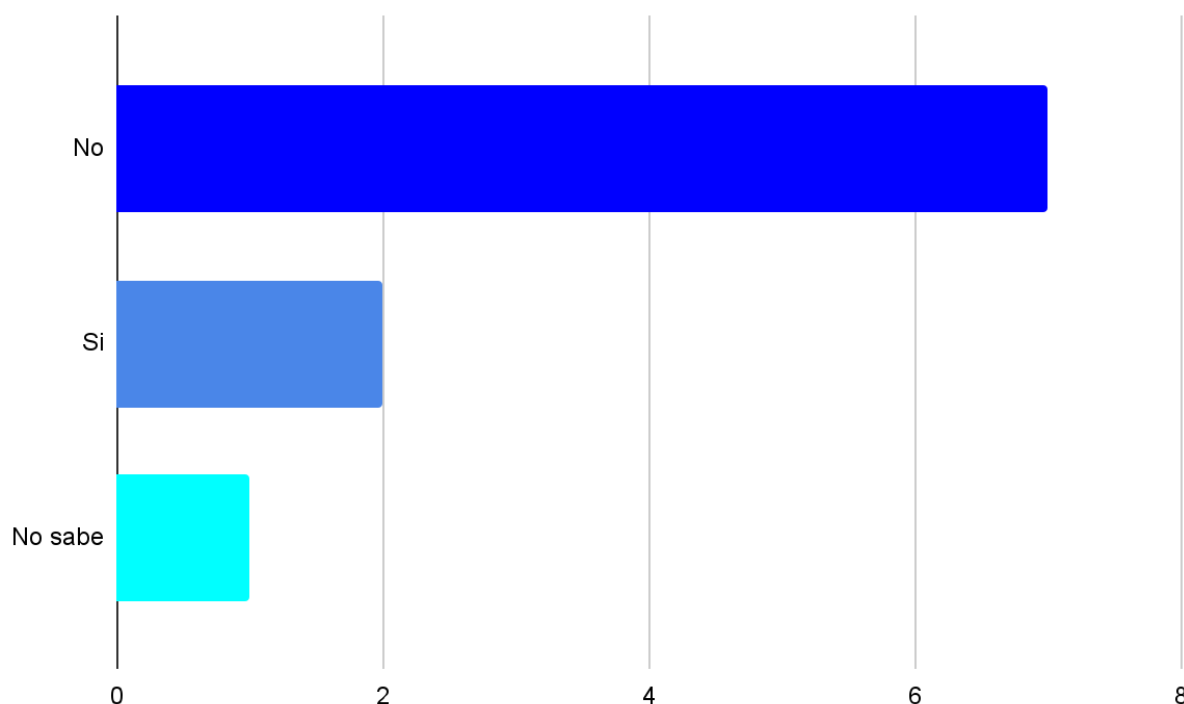


Figura 2. Gráfico: ¿Cree que las industrias de Chimbote cuentan con infraestructura adecuada para evitar la contaminación del aire?

## DISCUSIÓN

En esta investigación se desarrolló la investigación industrial del Perú, y particularmente en ciudades como Chimbote, se evidencian serias deficiencias en la infraestructura de muchas industrias que operan bajo condiciones obsoletas, con tecnologías desfasadas y sistemas constructivos poco adecuados para los estándares ambientales y productivos modernos. Estas limitaciones no solo afectan la eficiencia y competitividad del sector industrial, sino que también agravan problemas ambientales como la contaminación del aire, generando impactos negativos sobre la salud pública y la calidad de vida de la población. La investigación desarrollada con un enfoque descriptivo, muestra que una proporción significativa de las industrias de Chimbote continúa operando con instalaciones físicas deterioradas, sin mantenimiento preventivo, y con equipos que sobrepasan su vida útil. Esta realidad se presenta en sectores clave como la pesca, la siderurgia, y la manufactura ligera, donde el crecimiento económico ha sido históricamente importante, pero no ha estado acompañado por inversiones suficientes en modernización industrial.

Uno de los hallazgos centrales fue la falta de adecuación tecnológica. Muchas empresas, especialmente las de mediana y pequeña escala, no han incorporado sistemas automatizados ni tecnologías limpias que reduzcan las emisiones contaminantes. Esta carencia tecnológica, combinada con una infraestructura inadecuada, origina niveles elevados de material particulado (PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>) y emisiones de gases como dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), los cuales representan una amenaza directa a la salud respiratoria de la población, especialmente en

zonas urbanas cercanas a polos industriales. Asimismo, se identificó que la infraestructura industrial insuficiente está estrechamente relacionada con deficiencias en el cumplimiento de las normas ambientales. En muchos casos, las empresas carecen de espacios apropiados para la disposición de residuos, sistemas de ventilación adecuados, filtros industriales o mecanismos de monitoreo ambiental. Esta precariedad refleja una ausencia tanto de fiscalización efectiva como de políticas claras de incentivos a la inversión en modernización de infraestructura.

Otro resultado importante refiere a los problemas de accesibilidad y servicios básicos. Muchas industrias en Chimbote operan en zonas con limitado acceso a servicios esenciales como energía eléctrica de calidad, redes de transporte eficientes y sistemas de tratamiento de aguas residuales. Esta situación no solo encarece los procesos productivos, sino que además incrementa el riesgo de vertimientos y emisiones sin control técnico. Desde el punto de vista social, la investigación evidenció que la precariedad en la infraestructura industrial genera condiciones de trabajo inseguras para los obreros, quienes están expuestos a altos niveles de ruido, polvo, gases tóxicos y falta de ventilación. Esto ha derivado en un aumento sostenido de enfermedades ocupacionales, ausentismo laboral y una creciente percepción de inseguridad en el trabajo industrial. La vulnerabilidad es aún mayor en industrias informales o en empresas que operan sin la supervisión adecuada de entidades como el Ministerio del Ambiente o la Dirección Regional de Salud.

En términos económicos, la investigación pone en evidencia que la infraestructura industrial deficiente se traduce en menor productividad, mayor consumo energético, mayores tasas de error en la producción y, en general, un desempeño empresarial más ineficiente. Esto representa un freno al crecimiento sostenido de la industria y a su capacidad para competir a nivel internacional, en un contexto donde los tratados de libre comercio y los estándares internacionales exigen procesos más sostenibles y responsables con el medio ambiente. Se plantea que una solución integral debe contemplar tres ejes: primero, el diagnóstico técnico de las condiciones actuales de infraestructura en cada sector industrial; segundo, la implementación de tecnologías limpias y automatizadas para reducir el impacto ambiental; y tercero, el fortalecimiento de las políticas públicas y de fiscalización para exigir y facilitar la mejora de estas condiciones. En ese sentido, es fundamental promover la articulación entre el sector privado, las universidades y el Estado, con el fin de crear programas de inversión, capacitación y asistencia técnica para la modernización industrial. En el caso específico de Chimbote, los resultados también revelan una brecha significativa en la formación profesional y técnica. Muchos de los responsables de diseño, construcción y mantenimiento de infraestructura industrial aún utilizan métodos convencionales, sin el apoyo de herramientas digitales como el diseño asistido por computadora (CAD) o el modelado BIM, lo que limita la precisión, la planificación eficiente y el control de calidad en los proyectos de infraestructura.

Finalmente, la investigación concluye que la infraestructura industrial insuficiente no es un problema aislado, sino estructural, que refleja décadas de desatención en políticas de desarrollo urbano e industrial. Por tanto, se requiere una estrategia a mediano y largo plazo que incluya la evaluación técnica de las infraestructuras existentes, la actualización normativa, incentivos

económicos a la inversión verde y la creación de entornos productivos más sostenibles, como parques industriales equipados con servicios compartidos de alta calidad.

## 05 REFERENCIAS

**Agapito, Q. R. S.** (2021, 1 mayo). Determinación de los niveles de contaminación debido a las emisiones vehiculares en las principales avenidas de Chimbote. <https://repositorio.uns.edu.pe/handle/20.500.14278/3808> }

**Contaminación del aire ambiente (exterior) y salud – OMS**  
<https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-%28outdoor%29-air-quality-a>

**Loganx.** (2024, 10 junio). Infraestructura industrial. Human Machine. <https://gruasyaparejos.com/construccion/infraestructura-industrial>

**Nemery, B., Hoet, P. H., y Nemmar, A.** (2020). La niebla del valle del Mosa de 2020: un desastre de contaminación atmosférica. *The Lancet*, 357(9257), 704–708. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(00\)04135-0](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(00)04135-0)

**Repositorio de la Universidad César Vallejo.** (s. f.). <https://repositorio.ucv.edu.pe/>

**Zevallos Sulca, L. E.** (2024). *La contaminación ambiental en el sector industrial y los derechos fundamentales en el Perú*. [https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UTPD\\_7b554fa8fe1be3ead843561aecf024cd](https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UTPD_7b554fa8fe1be3ead843561aecf024cd)

### Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

### ORCID de los autores

|                               |                                                                                           |
|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| Alex Jhetli Alvarado Margarin | <a href="https://orcid.org/0009-0005-5307-2213">https://orcid.org/0009-0005-5307-2213</a> |
| Elías Antonio Cornelio Milla  | <a href="https://orcid.org/0009-0002-1908-4868">https://orcid.org/0009-0002-1908-4868</a> |
| Espinoza Gómez, César Antonio | <a href="https://orcid.org/0009-0009-6089-1734">https://orcid.org/0009-0009-6089-1734</a> |
| Torres Risco, Maily Anthonela | <a href="https://orcid.org/0009-0001-0464-5653">https://orcid.org/0009-0001-0464-5653</a> |
| Urbano Tapía Corsobel         | <a href="https://orcid.org/0009-0000-7309-3541">https://orcid.org/0009-0000-7309-3541</a> |
| Velasquez Ramos Marggie Nadim | <a href="https://orcid.org/0009-0005-6356-4457">https://orcid.org/0009-0005-6356-4457</a> |