



PROYECTO INTERNO PII-DICA-02-2017

"Modelación física de separadores de caudales pluvial y sanitario en alcantarillados combinados para ciudades andinas en Ecuador. Caso de la descontaminación y recuperación del río Machángara en Quito"

En la ciudad de Quito D.M., a los veinte días del mes de junio del año dos mil diecinueve, comparecen a la celebración de la presente Acta de Finalización del Proyecto Interno **PII-DICA-02-2017 "Modelación física de separadores de caudales pluvial y sanitario en alcantarillados combinados para ciudades andinas en Ecuador. Caso de la descontaminación y recuperación del río Machángara en Quito"**, por una parte la **Ph.D. Alexandra Patricia Alvarado Cevallos** en calidad de **Vicerrectora de Investigación y Proyección Social** de la Escuela Politécnica Nacional, y por otra la **M.Sc. Ximena del Rocío Hidalgo Bustamante** en calidad de **Directora del Proyecto Interno**, al tenor de lo siguiente:

1. ANTECEDENTES:

- a) Mediante Memorando Nro. EPN-DICA-2017-0626-M, entregado el 15 de marzo de 2017, el Jefe del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental (DICA) solicita al Vicerrectorado de Investigación y Proyección Social (VIPS), que se asigne código y se registre el proyecto *"Modelación física de separadores de caudales pluvial y sanitario en alcantarillados combinados para ciudades andinas en Ecuador. Caso de la descontaminación y recuperación del río Machángara en Quito"* propuesto por la M.Sc. Ximena del Rocío Hidalgo Bustamante.
- b) Mediante Memorando Nro. EPN-VIPS-2017-0755-M, del 11 de abril de 2017, el Vicerrectorado de Investigación y Proyección Social (VIPS) notifica al Jefe del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental (DICA) que el proyecto de Investigación Interno de la M.Sc. Ximena del Rocío Hidalgo Bustamante ha sido registrado con el código PII-DICA-02-2017.

2. DATOS GENERALES DEL PROYECTO:

Código de Proyecto	<i>PII-DICA-02-2017</i>
Nombre del Proyecto	<i>Modelación física de separadores de caudales pluvial y sanitario en alcantarillados combinados para ciudades andinas en Ecuador. Caso de la descontaminación y Recuperación del Río Machángara en Quito.</i>
Director del Proyecto	<i>M.Sc. Ximena del Rocío Hidalgo Bustamante.</i>
Colaboradores del Proyecto	<i>M.Sc. Patricio Rubén Ortega Lara. Ing. Pablo Alberto Vera Romero</i>
Departamento	<i>Ingeniería Civil y Ambiental (DICA).</i>
Líneas de Investigación	<i>Modelación física de fenómenos hidráulicos.</i>



Objetivo General	<i>Investigar el funcionamiento hidráulico-sanitario de separadores de caudales propuestos en el programa de descontaminación de los ríos de Quito y plantear una geometría optimizada útil en alcantarillados combinados para poblaciones de topografía pronunciada, con el fin de garantizar el vertido de agua a los receptores cumpliendo la legislación ambiental vigente y la eficiente conducción de aguas contaminadas hacia las plantas de depuración futuras, que justifique sus altos costos de inversión y así logren efectivamente descontaminar los cuerpos hídricos en cuestión.</i>
Duración del Proyecto	<ul style="list-style-type: none">• Inicio: 03 de abril del 2017.• Fin: 03 de abril del 2018.• Prórroga Ordinaria: 6 meses, hasta el 03 de octubre de 2018.• Duración total: 18 meses.
Entrega del Informe Final	07 de mayo de 2019.
Presupuesto Asignado:	\$ 0,00

3. INFORME FINAL:

Mediante Memorando Nro. EPN-DICA-2019-0808-M, del 7 de mayo de 2019, la M.Sc. Ximena del Rocío Hidalgo Bustamante presenta el Informe Final del proyecto, que es revisado por la Dirección de Investigación y Proyección Social (DIPS), mismo que se anexa y forma parte integrante del Acta de Finalización; y, cuyas conclusiones, recomendaciones y productos generados son:

CONCLUSIONES:

- a) Se cumplieron con los objetivos general y específicos del proyecto de investigación en vista que el modelo físico del separador de caudales PE36A fue construido a una escala 1:5, el cual fue ensayado mediante un plan de pruebas establecido en función del rango de caudales para el cual fue diseñado el sistema. Posterior a las conclusiones obtenidas de dicha investigación y en base al uso de la herramienta de modelación numérica, fueron propuestas y ensayadas 2 modificaciones previas y una modificación final que optimiza el funcionamiento hidráulico de esta estructura y paralelamente alcanza a cumplir con los parámetros establecidos en la legislación ambiental vigente en el país.
- b) Posterior al análisis teórico de las memorias técnicas de diseño se concluye que: las dimensiones propuestas para las estructuras de derivación del separador de caudales fueron obtenidas bajo hipótesis y ecuaciones de la hidráulica básica, es decir, de flujo unidimensional; asimismo, no se realiza un análisis en torno a la calidad del agua que se aspira a separar, siendo el único criterio propuesto aquel que indica que la separación de caudales se debe producir cuando el caudal combinado alcance un valor cinco veces mayor al caudal sanitario, lo cual se plasma en la curva de derivación teórica del diseño original.



- c) El modelo del separador de caudales fue construido posterior a un análisis en torno a la fuerza preponderante del fenómeno en estudio, en este caso la gravedad, por lo cual se aplicó el criterio de similitud de Froude para la determinación de sus escalas, escogiéndose a la 1:5 como la más adecuada en función de los factores propios de la estructura y del laboratorio. Una vez realizado el levantamiento topográfico respectivo, se verificó la similitud geométrica del modelo construido con respecto al diseño en escala en base al prototipo.
- d) Una vez que fue ejecutado el plan de pruebas sobre el modelo original se concluye que éste tiene un funcionamiento ineficiente puesto que cumple de forma parcial e insuficiente con los objetivos para los cuales fue diseñado. Lo anterior se evidencia en que el caudal sanitario efectivamente separado llega a un valor máximo del 15% del caudal combinado mientras que el diseño indica que este caudal debería representar el 51%.
- e) Al no tomar en cuenta que el régimen del flujo para todo el rango de caudales de operación es supercrítico, se tiene un inadecuado diseño del conjunto umbral orificio derivador, lo cual determina la ineficiencia del separador de caudales; es así que éste cumple de manera satisfactoria su propósito únicamente para caudales bajos, mientras que, para caudales medios y altos la derivación se produce como resultado del choque del flujo en la margen izquierda contra la arista viva en la pared del colector, la cual constituye el orificio, mas no como un efecto del trabajo en conjunto con el umbral.
- f) Posterior a la realización de los cálculos de los parámetros adimensionales que caracterizan al flujo en modelo y prototipo, se concluye que: los números de Reynolds en modelo son proporcionalmente menores a los números de Reynolds en prototipo, conforme a la escala establecida; los números de Froude en modelo y prototipo son iguales; los coeficientes de fricción en modelo y prototipo son similares, siendo los primeros ligeramente menores, lo cual se traduce en que el modelo es hidráulicamente más liso que el prototipo, verificando así que el modelo del separador PE36A cumple con la similitud restringida de Froude.
- g) Debido a que el proyecto está enmarcado en torno a las aguas urbanas, se utiliza la convención establecida para definir su grado de contaminación, es decir en función de la carga de materia orgánica en el agua mediante el parámetro de la DBO; es por esto que se determinó éste parámetro tanto para el punto límite del vertido, como para el promedio característico de la ciudad. En base a ambos valores y a los caudales de diseño del colector, fue ejecutado un cálculo de balance de masas con el que se determinó la curva de derivación teórica de caudales, con la cual se alcanzaría de manera exacta al vertido que cumpla la norma vigente en el país.
- h) En base a las mediciones cualitativas y cuantitativas del plan de pruebas ejecutado sobre el modelo original, se hizo uso del software de modelación numérica ANSYS como una herramienta para la determinación y comprobación de la funcionalidad de las posibles modificaciones necesarias en la geometría del separador de caudales, la misma que permitió un mayor grado de asertividad en las modificaciones físicas efectivamente realizadas y por ende un ahorro de tiempo en el desarrollo del proyecto (M-1).



- i) Se ejecutaron las modificaciones más relevantes en el modelo físico del separador de caudales, teniendo como guía los resultados arrojados por la modelación numérica y los valores obtenidos a partir del balance de masas (caudales a ser separados en el rango de operación del diseño). En primera instancia se realizó un plan de pruebas sobre éste modelo modificado (M-2), cuyos resultados fueron aceptables, sin embargo, su curva de derivación de caudales aún fue distante de la curva de derivación teórica a ser alcanzada; por éste motivo se ejecutó una última ampliación en la sección del orificio derivador, que al ser evaluada alcanzó una curva de derivación óptima, lo más cercana a la mencionada curva teórica; convirtiéndose ésta en la modificación final (M-3).
- j) El funcionamiento en conjunto vertedero – orificio derivador conforme la modificación final (M-3) consiste en: un aumento del caudal combinado implica un aumento en la carga de agua sobre el orificio y, por ende, un mayor caudal sanitario derivado; consecuencia de ello, el caudal sanitario no es constante, lo cual difiere de lo aspirado teóricamente, es decir que la curva de derivación real siempre diferirá de la teórica. Se demuestra con la curva de derivación real que los aspectos contemplados en el diseño original y aquellos tomados en cuenta en función de cumplir con un límite de vertido, son conseguidos en un amplio rango de caudales, y al mismo tiempo procurando no sobrepasar en exceso con dichos caudales los límites de diseño en las secciones de los colectores y de la planta de tratamiento de aguas residuales.
- k) La geometría de la modificación definitiva favorece al funcionamiento hidráulico del separador de caudales en los siguientes aspectos:
- Cambio de régimen del flujo de aproximación de supercrítico a subcrítico, como consecuencia de la presencia del vertedero como estructura de control y la subsecuente formación del resalto hidráulico aguas arriba del mismo en el canal combinado.
 - Eliminación del choque brusco del flujo en la arista viva del orificio derivador en el canal combinado y de la deflexión sobre el umbral hacia el canal pluvial para todo el rango de caudales de operación, dando lugar a un flujo ordenado, cuyo cambio de dirección se facilita debido a que su régimen es subcrítico, además que, la ubicación, geometría y alineación del vertedero y orificio posibilitan dicho fenómeno.
 - Eliminación del choque frontal del flujo contra las paredes internas del pozo de revisión y plataforma de inspección debido al cambio en la geometría y en la alineación a la salida del orificio vertedero, así como la presencia de la rampa en el inicio del canal sanitario.
 - Eliminación de vórtices y choques del flujo en el fondo del pozo de revisión debido a las modificaciones geométricas, principalmente la presencia de la rampa de ingreso al canal sanitario.
 - Imposibilidad del ingreso de flujos en la zona sobre la plataforma de revisión para todo el rango de operación de caudales del sistema, debido a los cambios de la geometría en la zona de separación y a que ésta fue elevada en su cota.



- Facilidad para la evacuación de sólidos y sedimentos presentes en el flujo debido a la eliminación de las zonas muertas presentes en el diseño original.
 - Favorecimiento en el desempeño hidráulico en el vertido hacia el canal pluvial debido a la geometría de la cresta semicircular del vertedero, la cual permite que la lámina inferior del flujo se adhiera al contorno de la estructura, evitando así la presencia de presiones negativas y el subsecuente desgaste del material utilizado en prototipo.
 - Favorecimiento para la aireación del flujo en la descarga hacia el canal pluvial una vez que éste sobrepasa el vertedero, debido al ensanchamiento de su cresta en relación a su base.
- l) Los ábacos adimensionales son producto del análisis dimensional y la aplicación del teorema de Buckingham, estos ábacos permiten entender el funcionamiento de la estructura separadora en función de números adimensionales que puedan generalizar su comportamiento para estructuras con características similares. Los ábacos propuestos dentro de éste estudio permiten realizar el pre dimensionamiento de estructuras separadoras de caudales que se enlacen a colectores de aproximación rectangulares con pendientes pronunciadas, generalmente instalados en ciudades andinas dentro de un rango de números de Froude y que cumplan con las relaciones b/w y a/l .
- m) Los ábacos demuestran que, una vez que empieza el vertido hacia el canal pluvial, el porcentaje de derivación (Q_s/Q_c) aumenta cuando el número de Froude se reduce, esto quiere decir que la factibilidad de derivación en el separador de caudales aumenta con un flujo de aproximación subcrítico; esta es la razón por la cual se justifica la altura del vertedero de cresta semicircular, el cual obliga a que el flujo cambie de régimen, aun así y dentro del rango de aplicación de ésta investigación, a medida que el caudal combinado aumenta, el flujo presenta una tendencia hacia su condición supercrítica, esta es la razón por la que, mientras mayor sea el caudal combinado (mayor carga sobre el orificio), el porcentaje de derivación será menor, lo que se traduce en un menor coeficiente de descarga, y un menor valor de DBO.
- n) Mediante la presente investigación se ha ratificado la importancia de la modelación física como una herramienta útil y complementaria para el diseño hidráulico, puesto que, a partir de ésta se obtienen datos y resultados cualitativos y cuantitativos del flujo tridimensional que en muchas ocasiones resultan imposibles de prever o detectar mediante el uso de abstracciones de carácter teórico. Asimismo, se confirman y/o se rechazan las hipótesis asumidas previamente con respecto al funcionamiento de la estructura hidráulica en investigación.

RECOMENDACIONES:

Recomendaciones para modelación física

- a) La presente investigación queda abierta a diferentes modificaciones (cambio de pendientes o dimensionamiento de sección), se recomienda que las mismas estén enfocadas en ampliar el rango de números de Froude del flujo en el canal



combinado, de manera que, los ábacos adimensionales sean una herramienta de más amplia funcionalidad para el diseñador.

- b) Es recomendable tener un amplio conocimiento alrededor del análisis dimensional, debido a su versatilidad y funcionalidad dentro del campo de la investigación experimental.
- c) La modelación física y la modelación numérica son mutuamente complementarias, de manera que, las falencias de una puedan ser resueltas con las fortalezas de la otra, esto optimiza el tiempo de ejecución de un proyecto enmarcado dentro del campo de la modelación de fenómenos hidráulicos.

Recomendaciones para el separador de caudales PE36A

- a) Los resultados experimentales obtenidos del funcionamiento del modelo con la geometría definitiva; muestran que para el caudal máximo de diseño el flujo alcanza y sobrepasa los límites constructivos en zonas específicas de la estructura, para evitar la creación de estas zonas donde el flujo podría trabajar a presión se recomienda:
 - Incrementar la altura de la sección transversal del canal combinado en 0.20 m; es decir de una sección de 1.80 metros de ancho por 1.80 metros de alto a una de 1.80 m de ancho por 2.0 metros de alto, a lo largo de una longitud de 10 metros medidos desde el vertedero hacia aguas arriba, longitud que se determinó experimentalmente con el caudal máximo de diseño, esto con la finalidad de evitar flujos pulsatorios en la zona de separación y a lo largo del desarrollo del resalto hidráulico en el canal combinado.
 - Modificar la sección transversal del tramo inicial del canal sanitario, de manera que a la salida del pozo de revisión tenga una altura de 1.75 metros por 1.20 metros de ancho y su altura disminuya paulatinamente con un ángulo de 26°, hasta empatar con la altura normal del canal sanitario en 1.20 metros, facilitando así el ingreso de flujo hacia el canal sanitario y evitando la creación de zonas que trabajen a presión.

Recomendaciones para diseño

- a) Una de las principales contribuciones de la presente investigación es el enfoque sanitario a partir del cual se proponen las modificaciones, por lo que, es recomendable que en el proceso de diseño de separadores de caudales con otro tipo de condiciones de borde en cuanto a cantidades y calidades de flujo, se defina un cálculo de balance de masas similar al realizado en esta investigación para la determinación de la calidad límite en el vertido al cuerpo hídrico receptor conforme a la normativa vigente, así como la determinación de los valores de los caudales sanitario y pluvial a combinarse, de tal manera que se alcance dicho límite en el proceso de dilución.
- b) En el diseño de separadores de caudales con otro tipo de condiciones de borde y con la finalidad de satisfacer a una curva de derivación teórica resultante de los caudales obtenidos en el balance de masas descrito en el punto anterior, es recomendable dimensionar los componentes de la estructura conforme a la geometría elegida y las condiciones propias del proyecto que se esté diseñando,



teniendo como pauta los problemas presentados en la primera parte de esta investigación (aristas vivas, choques del flujo, ondas cruzadas, etc.) y las ventajas de la modificación geométrica ejecutada en la segunda parte (adecuadas alineaciones en planta, cambios suavizados de las secciones, eliminación de zonas muertas, estructuras acordes al régimen y comportamiento de flujo, etc.), los cuales resultan una guía pertinente en el momento del planteamiento de las hipótesis y abstracciones teóricas que se hagan al respecto.

PRODUCTOS:

1. Artículo: "Physical modelling of flow separators towards pluvial and sanitary collectors for combined sewer system used in Andean cities in Ecuador"; Hidalgo X., Ortega P., Casa E., Vera P., Santamaria J., Lucero C., Calderón D.; Revista Facultad de Ingeniería (Q3); ISSN: 1206230; febrero 2019.
2. Proyecto de Titulación de Ingeniería Civil - Mención Hidráulica: "Estudio experimental en modelo físico de una estructura separadora de caudales con umbral transversal, orificio lateral y régimen de aproximación supercrítico, caso de estudio "Quebrada Caupicho""; Lucero Méndez Carolina Elizabeth, Santamaría Chamorro Jorge Andrés; <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19089>; enero 2018.
3. Difusión de Resultados a la Comunidad de la EPN: "Modelación física y numérica CFD de estructuras separadoras de caudal en alcantarillado combinado para ciudades andinas"; Ortega Patricio; CIERHI, EPN; septiembre 2018.
4. Aplicación Tecnológica: "Modelación física de separadores de caudales hacia colectores pluvial y sanitario para alcantarillados combinados usados en ciudades andinas en Ecuador. Caso de la descontaminación y recuperación del Río Machángara en Quito"; CIERHI; enero 2017.
5. Simposio: "Modelación Física y Numérica CFD de Estructuras Separadoras de Caudal en Alcantarillado combinado para ciudades Andinas"; Ortega Patricio; II Simposio Internacional del Agua y Meteorología; marzo 2018.
6. Propuesta de Proyecto de Mayor Alcance: "Análisis experimental en modelo físico de cuencos disipadores de energía para descarga de colectores en cauces naturales"; Hidalgo Ximena; Proyecto Interno.
7. Patente de Invención: "Separador de caudales aplicado a colectores combinados de aguas residuales urbanas ubicados en zonas con pendientes"; Hidalgo X., Ortega P., Casa E., Vera P., Santamaría J., Lucero C., Calderón D.; enero 2018.
8. Concurso: "Separador de caudal para alcantarillados combinados en ciudades andinas, eslabón clave en la descontaminación hídrica"; Lucero Carolina, Santamaría Jorge; V Concurso de reconocimiento a la investigación universitaria estudiantil: Galardones Nacionales; septiembre 2017.



4. LIQUIDACIÓN ECONÓMICA:

El Proyecto Interno PII-DICA-02-2017 no contó con asignación presupuestaria.

5. FINALIZACIÓN:

Con la presente Acta se declara finalizado y cerrado el Proyecto Interno *PII-DICA-02-2017 "Modelación física de separadores de caudales pluvial y sanitario en alcantarillados combinados para ciudades andinas en Ecuador. Caso de la descontaminación y Recuperación del Río Machángara en Quito"*.

Para constancia de lo ejecutado y por estar de acuerdo con el contenido de la presente Acta, las partes libre y voluntariamente suscriben la misma, en tres ejemplares de igual contenido, tenor y valor legal.

Dado en la ciudad de Quito, D.M. a los veinte días del mes de junio del año dos mil diecinueve.

Ph.D. Alexandra P. Alvarado C.
**Vicerrectora de Investigación y
Proyección Social**

fc/sp



ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
VICERECTORADO DE INVESTIGACIÓN
Y PROYECCIÓN SOCIAL

M.Sc. Ximena Hidalgo B.
**Directora del Proyecto
PII-DICA-02-2017**

Aceptado 12 Sept 2019