



UNIVERSIDAD
CENTRAL
DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA, CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICA

INGENIO

Vol.II, N°2, 2019 / ISSN: 2588-0829



Autoridades:

Dr. Fernando Sempértegui Ontaneda, PHD
Rector de la Universidad Central del Ecuador

Ing. Cecilia Flores Villalva, MSc.
Decana Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática

Ing. César Morales Mejía, MSc.
Subdecano Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática

Consejo Editorial:

Ing. Cecilia Flores Villalva, MSc Directora
Ing. César Morales Mejía, MSc. Editor
Ing. Mauricio Basabe Moreno, PHd
Ing. Rodrigo Herrera Heredia, MSc
Ing. Salomón Jaya Quezada, MSc
Ing. José Augusto Rosero, PHd
Ing. Gonzalo Sandoval, MSc
Ing. Paulina Viera Arroba, MSc

Consejo Asesor y Evaluador:

Ing. Lauro Lara, MSc. Pontificia Universidad Católica
Ing. Gustavo Yáñez, MSc. Pontificia Universidad Católica
Ing. Carlos Celi, MSc. Pontificia Universidad Católica
Ing. Oscar Jaramillo, MSc. Pontificia Universidad Católica
Ing. Wilson Cando, MSc. Pontificia Universidad Católica
Ing. Jorge Albuja, MSc. Pontificia Universidad Católica
Ing. Fredi Paredes, MSc. Pontificia Universidad Católica
Ing. Gonzalo Moya, MSc. Pontificia Universidad Católica
Ing. Juan Merizalde, MSc. Pontificia Universidad Católica

Revista Ingenio:

Fundada en 2017

Este número 2 estuvo bajo coordinación editorial de Ing. César Morales Mejía, MSc

Diseño Portada:

Ing. Yuri García, MSc

Diagramación:

Editorial Universitaria / cxe

Foto Portada:

Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática – UCE

Impresión:

Editorial Universitaria

Universidad Central del Ecuador

Correo electrónico: vicedecanat.fing@uce.edu.ec

ISSN: 2588-0829

ÍNDICE

Materiales Cementantes Compuestos (CCM): estado del arte, situación actual y aplicaciones en la ingeniería civil.....	5
<i>Carpio V.; Viera P.</i>	
Análisis de la eficiencia sanitaria de las obras hidráulicas construidas para descontaminar la Quebrada Ortega por parte de la EPMAPS, Quito.....	17
<i>Enríquez C.; Torres P.</i>	
Diseño de un sistema de aprovechamiento de agua lluvia bajo criterios de Eficiencia hídrica en edificios. Caso de estudio: edificio de clases y laboratorio de hidráulica de la Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática de la Universidad Central del Ecuador	25
<i>Valenzuela C.; Muñoz F.; Gomes R.</i>	
Uso de isótopos estables para el estudio de las fuentes de agua superficiales en el Ecuador y sus implicaciones para la gestión de los recursos hídricos.....	38
<i>Lima P.</i>	
Análisis en flujo permanente de los factores que inciden en la disminución de la capacidad hidráulica de la línea de conducción del sistema La Mica-Quito Sur.....	46
<i>Andrade J.; Escobar G.; Paredes D.</i>	
Hormigón estructural de baja densidad para edificaciones	58
<i>Morales L.; Santamaría J.; Caicedo W.; Tipán F.</i>	
Estudio de factibilidad de tubos plásticos para flujo a gravedad fabricados con material reciclado.....	71
<i>Ortiz E.; Madero G.; Lima P.</i>	
Normas para publicar en la revista Ingenio	79

Materiales Cementantes Compuestos (ccm): estado del arte, situación actual y aplicaciones en la Ingeniería Civil

Carpio López Víctor Andrés¹, Viera Arroba Luisa Paulina²

^{1,2}Universidad Central del Ecuador
vacarpio@uce.edu.ec, lviera@uce.edu.ec

Información del artículo
Recibido: julio 2018
Aceptado: septiembre 2018

Resumen

El presente artículo trata acerca del desarrollo de los materiales cementantes compuestos (CCM), desde el hormigón convencional hasta los más complejos como los compuestos con propiedades auto-reparantes y auto-sensitivas. Además, se hace una descripción de los estudios más relevantes de este tema, así como las propiedades que los CCM presentan y sus posibles aplicaciones en el desarrollo de nuevos materiales para la ingeniería civil.

Abstract

The present paper it is about the development of cementitious composite materials (CCM), from conventional concrete to more complex ones such as compounds with self-healing and self-sensing properties. In addition, a description is given of the most relevant studies of this topic, as well as the properties that the CCM present and their possible applications in the development of new materials for civil engineering.

1. Introducción

El estudio y uso de los compuesto cementantes para la construcción, según fuentes históricas data de hace 5600 años a. C., con la construcción más antigua realizada con conglomerado que corresponde al piso de una cabaña en Lepensky Vir (Serbia) (IECA, s.f.). Posteriormente, civilizaciones tales como las de Egipto, Grecia, y Creta emplearon morteros en diversas construcciones.

Alrededor del año 82 d.C., se desarrolla el primer hormigón, que es acreditado a los ingenieros romanos (Hendrik, 2005). Las mezclas de cemento Portland usadas en compuestos cementantes modernos fueron estudiadas inicialmente por Joseph Aspdin en 1824 (Carpio, 2014b)

A finales de 1930 se empiezan a utilizar aditivos químicos en el hormigón para modificar su viscosidad y fluidez (Aïtcin, 1998), naciendo así lo que se conoce como tecnología del hormigón, cuyo campo de estudio desde aquel entonces y hasta hoy en día no se enfoca en el entendimiento de las interacciones a nivel atómico-molecular del material sino mayormente en su comportamiento mecánico (Sedahat, 2014) (Lu et al., 2016).

En el año de 1998 con el desarrollo de los Engineered Cementitious Composites (ECC) (Li y Kanda, 1998), se introducen nuevos materiales en las mezclas del hormigón, por ejemplo, microfibras, mejorando las capacidades de resistencia mecánica del material, pero sin estudiarse a fondo, todavía, la interacción entre todos los materiales constituyentes del compuesto, como la capacidad auto-sensitiva (Han et al., 2015) o auto-raparante (Sierra et al., 2015). Con estudios de este tipo se abre un campo más amplio que es el de los materiales cementantes compuestos (cementitious composite materials “CCM”, en inglés) cuyos componentes y características son analizados a nivel cuántico.

Cabe aclarar que hoy en día debido al desarrollo de “hormigones flexibles” (bendable concrete), que emplean los criterios de los CCM para su elaboración, algunos investigadores han optado por emplear de manera equivalente al término CCM el de Engineered Cementitious Composites

(ECC). (Khmurovska y Stemberk, 2018) (Yildirim et al., 2018) (Yu, et al. 2018).

Los nuevos CCM constituyen un paso más allá de la tecnología del hormigón tradicional, estos se fundamentan en los más recientes avances de la ciencia e ingeniería de materiales (materials science and engineering “MSE”, en inglés). Los materiales constituyentes de los CCM y del hormigón tradicional inciden de manera distinta en el estudio de sus propiedades y desempeño físico-mecánico. Por lo que los CCM no pueden ser catalogados usando los criterios tradicionales del hormigón (Zhou, 2014) (Baera, 2015) (Hazelwood, 2015).

2. La ciencia e ingeniería de materiales (mse)

La MSE es un campo interdisciplinario que estudia y manipula la composición y estructura de los materiales a través de escalas de longitud para controlar sus propiedades por medio de la síntesis y el procesamiento (Askeland y Wright, 2017). Su objetivo final es caracterizar o describir a los materiales. La correlación de las distintas ramas que componen a la MSE así como el área de conocimiento específico de cada una se lo puede evidenciar mejor en la siguiente figura 1.

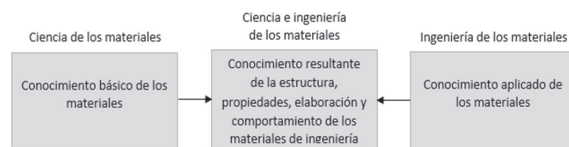


Figura 1. Correlación entre la ciencia y la ingeniería de los materiales. Fuente: Smith y Hashemi, 2006.

Los principios de la MSE se encuentran representados en el tetraedro de la ciencia e ingeniería de materiales (figura 2), donde el término “Propiedades” se refiere a la constitución química de un material; “Estructura” a la descripción del arreglo de los átomos, es decir, cómo se observa el material a diferentes niveles de detalle; el término “Síntesis” concierne a la forma en que se fabrican materiales a partir de sustancias químicas de estado natural o hechas por el hombre y “Procesamiento” implica cómo se transforman materiales

en componentes útiles para provocar cambios en las propiedades de otros materiales.

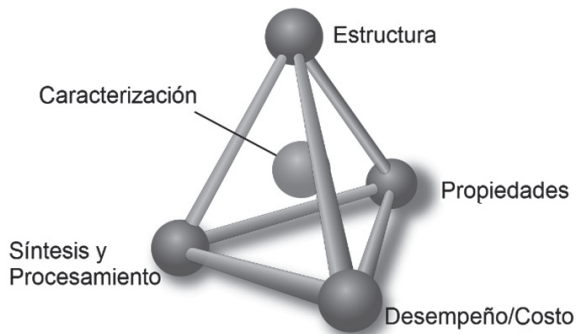


Figura 2. Tetraedro de la ciencia e ingeniería de los materiales. Fuente: Doug Hatfield

Nota: Adaptación al español de elaboración propia.

Dentro de la MSE existen diferentes formas de clasificar a los materiales. La manera más común en el caso de sólidos es agruparlos en tres categorías básicas: metales, cerámicos y polímeros. Según lo manifiestan Callister y Rethwisch (2009), esto se lo realiza considerando su composición química y estructura atómica. Pero, además, se toma en cuenta otro grupo concerniente a los materiales compuestos, mismos que son el resultado de una ingeniosa combinación de dos o más materiales diferentes. Como ejemplo de lo expuesto, en la figura 3 se puede observar un gráfico de valores de rigidez, a temperatura ambiente, donde se correlacionan las categorías anteriores y algunos de los materiales que son contenidos en éstas.

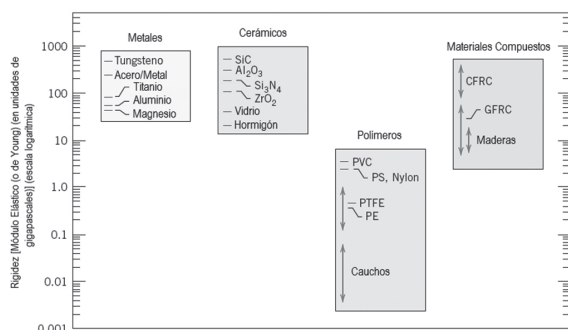


Figura 3. Gráfico de barras temperatura ambiente – valores de rigidez (módulo de elasticidad). Fuente: Callister y Rethwisch, 2009.

Nota: Adaptación al español de elaboración propia.

3. La ciencia de los materiales en la ingeniería civil

La relación entre la MSE y la ingeniería civil data desde los inicios de la civilización humana, evolucionando con el pasar del tiempo desde los niveles más básicos del conocimiento empírico hasta constituirse hoy como ramas de estudio técnico-científicas (Quora, 2015) (Gupta y Chander, 2017).

En la ingeniería civil, los materiales y la materia en general (desde el contexto físico) juegan un rol muy importante, ya que es a través de ellos que los proyectos de infraestructura se hacen realidad. Las estructuras y los materiales en su mayoría son estudiados conforme los criterios y conceptos de la mecánica del medio continuo misma que estudia el comportamiento de los sólidos deformables, sólidos rígidos y fluidos mediante la aplicación de modelos matemáticos que aportan una mejor comprensión sobre sus propiedades físico-mecánicas (Reedy, 2013).

Sin embargo, el constante avance en áreas aplicadas del conocimiento como es el caso de la tecnología del hormigón, donde la profundidad de algunos temas investigados ha sobrepasado la competencia de la mecánica del medio continuo (continuum mechanics, en inglés), como se evidencia al estudiar los modelos de sensibilidad característica de hormigones auto-sensibles basados en polvo de nickel donde Han et al. (2015) consideran los efectos cuánticos dentro del material. Esto ha fomentado que la MSE incorpore nuevas áreas de estudio con la finalidad de dar solución a los diferentes problemas que se presentan actualmente en la ingeniería.

Una de estas áreas es la de los materiales compuestos, la cual estudia la interacción entre las combinaciones o mezclas de dos o más materiales a fin de caracterizar no solo sus propiedades físico-mecánicas y químicas sino además entender su composición y estructuración desde niveles atómicos a macroscópicos y con esto ver su aplicabilidad en las diferentes ramas de la ingeniería. En la figura 4 se puede observar un esquema de clasificación para varios tipos de materiales compuestos (Callister y Rethwisch, 2009).

Según la ciencia de ingeniería de los materiales (MSE) todos los compuestos cementantes (sin inclusión de fibras) son estudiados dentro de los materiales compuestos reforzados con grandes partículas (Large Particle Reinforced Composites, en inglés) lo cual es correcto si se considera que las interacciones partícula-matriz no son tratadas a nivel atómico o molecular tal y como lo mencionan Callister y Rethwisch (2009), es decir, si el estudio se lo realiza desde un nivel nano -a macro- estructural desde el punto de vista de la mecánica del medio continuo.

Sin embargo, si a los hormigones y ECC se les realiza diferentes adiciones químicas y minerales como los materiales cementantes suplementarios (supplementary cementitious materials “SCM”, en inglés), aditivos químicos modificadores visco-reológicos (HRWR, por sus siglas en inglés) y adiciones de nanocompuestos, que modifican la composición química de la matriz así como la inclusión en algunos casos “conjunta” de fibras de refuerzo, sería un error clasificarlos específicamente dentro de alguna de las categorías mostradas en la figura 4.

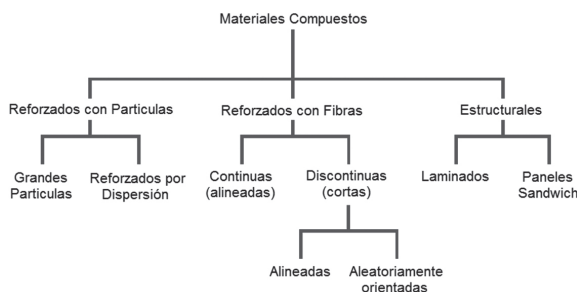


Figura 4. Esquema de clasificación para varios tipos de materiales compuestos. Fuente: Callister y Rethwisch, 2009.

Nota: Adaptación al español de elaboración propia.

La tecnología del hormigón desde la conceptualización de investigadores como Aitcin (1998), Neville y Brooks (2010), Li (2011b) y Xincheng (2017) estudia única y exclusivamente al hormigón desde su composición a nivel molecular, meso-/macroscópico hasta su interacción con el ambiente. También comprende los estudios sobre su elaboración, proceso de producción, usos,

comportamiento físico-mecánico y clasificación de los diferentes tipos de hormigones creados. Pero, hoy en día debido a la profundidad a la que ha llegado la investigación de este material sumado al extenso listado de tipos de hormigón que siguen en desarrollo; se pone en tela de duda si se debe continuar llamando hormigón a un material compuesto que ha alcanzado un alto grado de complejidad, y más aún, si debe continuarse nombrando a la rama que lo estudia como *tecnología del hormigón*.

Es así que en la actualidad investigadores como Baera (2015) y Hazelwood (2015) hablan ya de materiales cementantes compuestos (CCM) en vez de hormigones especiales o de algún otro tipo.

4. Los materiales cementantes compuestos (ccm)

El estudio de los CCM se deriva de un campo más amplio que son los materiales compuestos de matriz cerámica (Ceramic Matrix Composites “CMC”, en inglés) (Olivares et al., 2003) (Askeland y Wright, 2017) desarrollados generalmente a base de cemento Portland. Los materiales constituyentes de los CCM por lo general, son: agua, cemento, agregado fino, agregado grueso, adiciones minerales, adiciones químicas, nanocompuestos o nanomateriales y fibras (Bang et al., 2015).

Actualmente, los criterios sobre tecnología del hormigón que eran estudiados hace más de medio siglo han evolucionado de tal manera que, como fue mencionado anteriormente, es complicado establecer a ciencia cierta las categorías en las que se deben ubicar a los diferentes compuestos cementantes desarrollados, tal como es el caso de los hormigones de ultra-alto desempeño (UHPC, por sus siglas en inglés) reforzados con nanocompuestos (Badak et al., 2014) (Sedahat et al., 2014) (Zhou, 2014) (Lu et al., 2016) (Lu y Ouyang, 2017) o el de los diferentes tipos de hormigón con inclusiones de materiales y compuestos que le aportan propiedades como la auto-reparación (Hazelwood, 2015).

A diferencia de compuestos cementantes como el hormigón, los CCM presentan propiedades mecánicas mucho mayores que lo convencional para materiales de características anisotrópicas, por ejemplo, su flexibilidad y ductilidad son superiores, tal que, a pesar de llegar a deformarse considerablemente, pueden volver a su estado original sin evidenciar pérdidas sustanciales en sus capacidades resistivas a esfuerzos de compresión, tracción, corte e inclusive impacto. Esta capacidad y adaptabilidad de recuperación de la energía de deformación de un material es conocida de manera ingenieril como “resiliencia” (Fisher, 2006).

Muchas de estas cualidades han sido estudiadas por Baera et al. (2015), quien además menciona que:

“Los compuestos a base de cemento han probado, con el pasar del tiempo, ciertas habilidades de auto-reparar los daños (fisuras y especialmente microfisuras) que ocurren dentro de su estructura. Dependiendo del nivel de daño y del tipo de compuesto en que ocurre, la auto-reparación puede variar desde el cierre de una fisura o reparación de una fisura al estado de parcial o incluso completo de recuperación de las propiedades físico-mecánicas del material” (p. 12).

Respecto a CCM ligeros y ultraligeros, su estudio a nivel mundial ha quedado relegado en parte al área del hormigón donde se han desarrollado mezclas ligeras (LWC, por sus siglas en inglés) (Esmaeili, 2012) y de alto desempeño reforzado con fibras (HPLWFRC, por sus siglas en inglés) (Carpio, 2014a) (Hamad, 2017) empleando agregados de baja densidad como arcilla expandida, esquistos y pizarras, pero cuya accesibilidad para la industria de la construcción es limitada (Short y Kinniburgh, 1963). Debido a esto, el empleo de granulado de poliestireno expandido (EPS) como alternativa para la fabricación de LWC ha sido estudiado en diferentes trabajos como los de Limuta y Zhunio (2015), Mulla y Shelake (2016), Carrera y Cevallos (2016), donde se muestra que el uso de EPS abre una nueva alternativa para la elaboración de materiales ligeros a base de cemento.

La tendencia actual de obtener CCM ligeros y ultraligeros ha fomentado el uso de SCM, lo que se evidencia en las investigaciones de Yeginobali et al. (1998), Sajedi y Shafigh (2012), Carpio (2014a) y Hamad (2017). En algunos de estos trabajos se realizan inclusiones de fibras de refuerzo metálicas, sintéticas, naturales o recicladas para mejorar aún más el desempeño mecánico del material, tal y como lo muestran Sadrmomtazi et al. (2014) en su estudio.

Por otro lado, dentro de los CCM, los ECC conforme lo manifiestan Li (2008), Li y Kanda (1998), son una variante a los hormigones de alto desempeño reforzados con fibras (HPFRC, por sus siglas en inglés) cuya diferencia principal radica en el comportamiento que este presenta ante la acción de una carga. El comportamiento del ECC una vez se presenta la primera grieta es de una “deformación con endurecimiento” (strain-hardens, en inglés) a diferencia de un FRC (hormigón reforzado con fibras, en español) que después de la primera grieta muestra un “suavizado por tensión” (tension-softens, en inglés), esto puede ser apreciado de mejor manera en la figura 5. Al igual que los hormigones, a los ECC se los ha intentado categorizar en familias de acuerdo a sus resistencias a tensión y ductilidades, determinándose así las siguientes: ECC Auto-compactante (Self-consolidating ECC, en inglés), ECC de Alta resistencia inicial (High early strength ECC “HES-ECC”, en inglés), ECC Ligero (Light-weight ECC “LW-ECC”, en inglés), ECC Verde o Ecológico (Green ECC “G-ECC”, en inglés) y ECC Auto-reparador (Self-healing ECC “SH-ECC”, en inglés).

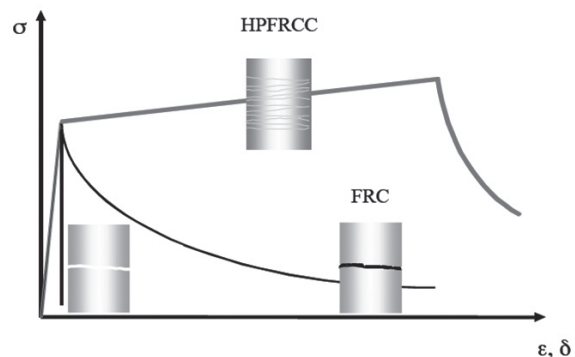


Figura 5. Relación esfuerzo-deformación en tensión uniaxial del hormigón, FRC, y HPFRC. Fuente: Li, 2008.

Si se observa detenidamente las categorías de los ECC indicadas por Li (2008), en relación con los conceptos de la tecnología del hormigón estos también podrían ser catalogados como UHPC conforme las definiciones mostradas desde las investigaciones de Collepari et al. (1997) pasando por Fehling et al. (2008) hasta Graybeal (2013).

En la figura 6, se presenta una alternativa para la clasificación de los hormigones, ECC y compuestos cementantes en general dentro de una macro-área de estudio conocida como los materiales cementantes compuestos (CCM), convirtiéndose así en la rama de los CMC que abarca desde los

conceptos más elementales de la Tecnología del Hormigón en la Física Clásica hasta las aproximaciones a nivel de la Física de la Materia Condensada.

En la tabla 1, se presentan valores característicos de algunas propiedades mecánicas relevantes de los CCM; dichos valores mostrados corresponden a los más críticos obtenidos en diversas investigaciones, ofreciendo así una base comparable de la capacidad físico-mecánica que presentan las diferentes categorías de CCM mostradas en la figura 6.

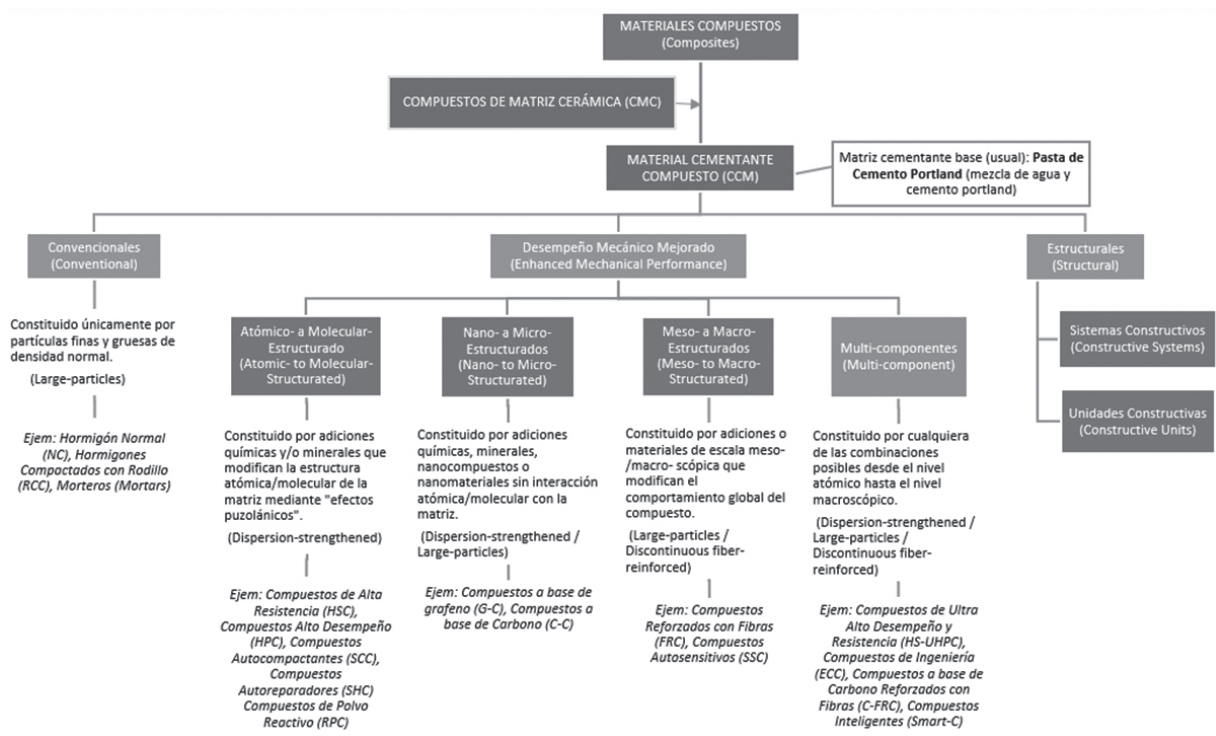


Figura 6. Propuesta para la clasificación de los materiales cementantes compuestos.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 1. Valores Característicos de algunas propiedades mecánicas de los diferentes materiales cementantes compuestos.

Fuente: Elaboración propia

Categoría	Sub-categoría	Esfuerzo a Compresión (MPa)	Esfuerzo a Tracción Último (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Esfuerzo a Flexión (MPa)	Densidad (gr/cm ³)	Auto-Reparación	Auto-Sensibilidad
CCM Convencional	-	hasta 38 ⁸	hasta 3 ⁸	hasta 30 ⁸	hasta 6 ⁸	2.3 a 2.5 ³	NO	NO
CCM Desempeño Mecánico Mejorado	Atómico- a Molecular-estructurado	hasta 180 ²	hasta 4 ²	hasta 32 ²	hasta 16 ²	2.3 a 2.5 ³	NO	SI ⁴
	Nano- a Micro-Estructurado	hasta 217 ¹	hasta 4 ¹	hasta 70 ¹	hasta 30 ¹	2.3 a 2.6 ^{3,7}	NO	SI ⁴
	Meso- a Macro-Estructurado	hasta 190 ¹	hasta 6 ¹	hasta 45 ¹	hasta 20 ¹	0.4 a 2.6 ^{3,7}	NO	SI ⁴
	Multi-componente	hasta 217 ¹	hasta 6 ¹	hasta 70 ¹	hasta 30 ¹	0.4 a 2.6 ^{3,7}	SI ⁶	SI ⁴
Estructurales	-	-	-	-	-	-	SI ⁶	SI ^{4,5}

¹ Willey Loh., 2015

² Kusumawardaningsih et al., 2016

³ FHWA., 2013

⁴ Han et al., 2015

⁵ Wang et al., 2012

⁶ Vijay et al., 2017

⁷ Balakrishna, 2013

⁸ Madhkhan, 2015

Nota: En los CCM Estructurales sus propiedades mecánicas dependen de las propiedades de cada uno de los materiales constituyentes, pero conforme los criterios de la MSE, la determinación de sus capacidades estructurales son aproximados perfectamente en base a los conceptos de la Mecánica de Sólidos. (Callister y Rethwisch, 2009) (Askeland y Wright, 2017)

5. Propiedades de los materiales cementantes compuestos

En los CCM al ser su matriz constituyente más común, la pasta de cemento Portland, sus propiedades presentan similitud con las evidenciadas en mezclas de hormigón o compuestos cementantes como los morteros, tal como se reporta en algunas investigaciones: Fehling et al. (2008), Zhou (2014), Baera et al. (2015), entre otros; por lo cual se pueden establecer dos estados principales del material: el Estado Primario o conocido también como “Fase Líquida” y el Estado Secundario o “Fase Sólida”. En cada uno de dichos estados el material presenta comportamientos reológicos diferentes por lo cual es necesario definirlos para tener una comprensión mayor sobre sus características.

A. Estado Primario (Fase líquida).

Este estado es el inicial del CCM y es caracterizado por presentarse como una masa líquida y que según los materiales constituyentes del que esté elaborado el CCM dependerá su grado de fluidez

y viscosidad que a su vez son los parámetros reológicos predominantes para este estado. Esta masa líquida es obtenida después de ingresar todos los materiales con los que se fabrica el CCM en una máquina mezcladora por un lapso de tiempo determinado. Entre las propiedades más relevantes que se pueden evaluar en consideración con lo expresado en el Manual de la Asociación del Cemento Portland (PCA, por sus siglas en inglés) de Kostmatka et al. (2004) para el caso de mezclas de hormigón, se tiene: *consistencia, trabajabilidad, homogeneidad, exhudación, fraguado.*

B. Estado Secundario (Fase sólida).

Luego de transcurrido el proceso de fraguado del CCM, este adquiere un estado sólido y macizo, por eso suele decirse en el caso del hormigón que éste presenta una apariencia similar a la de una “roca artificial”. En este estado el CCM muestra propiedades físicas, químicas y mecánicas muy diferentes al estado primario.

En el caso de los CCM las principales propiedades

mecánicas que pueden estudiarse son: densidad, ductilidad, dureza, elasticidad, rigidez, tensión mecánica, viscoelasticidad.

6. Aplicaciones de los materiales cementantes compuestos

Aun cuando en la actualidad el desarrollo de los CCM se encuentra en fase experimental, se han realizado diversas aplicaciones a nivel constructivo para evaluar su comportamiento en el mediano y largo plazo. Una de estas aplicaciones estudiada por Rokugo et al. (2005) analiza el comportamiento del ECC empleado como material de reparación en un muro a gravedad para contención de tierra que fue severamente dañado con agrietamientos por una reacción Alkali-Sílice (ASR, por sus siglas en inglés). En dicho estudio se realizó el análisis entre un mortero de cemento portland convencional y un ECC, y los resultados obtenidos demostraron que luego de un mes de aplicar los métodos de reparación, el mortero se vio nuevamente afectado por la ASR tal que, luego de 2 años se había producido una grieta con un ancho de 300 μm , mientras que el ECC luego del mismo periodo de tiempo apenas presentó un agrietamiento de 120 μm .

7. Conclusiones

Las continuas modificaciones y desarrollo de nuevos hormigones cada vez con composiciones más complejas, dificulta su caracterización y clasificación dentro de alguna de las categorías que la tecnología del hormigón tradicional ha establecido. Por consiguiente, los CCM se perfilan como una nueva rama de estudio capaz de abarcar la conceptualización tradicionalista de los hormigones y los nuevos desarrollos en las mezclas a base de cemento portland.

La interacción entre los niveles de nano-, micro-, meso- y macro- estructuración que hoy en día se estudia en los CCM permite obtener una comprensión mayor sobre su comportamiento mecánico. Características como la durabilidad del material, conductividad, resiliencia, entre otras, que antes eran estimadas mediante exhaustivas

pruebas experimentales en laboratorio hoy se las podría estudiar de manera directa con la ayuda de análisis computacionales mediante modelación multifísica, logrando de esta manera una optimización de recursos y tiempo.

Las interacciones químicas que tienen lugar en la matriz cementante de los CCM como consecuencia de las diferentes adiciones químicas y minerales, hoy son estudiadas a profundidad con los conocimientos incorporados por la MSE, sin embargo, han sido consideradas durante décadas por la tecnología del hormigón como un parámetro empírico validado únicamente por las diferentes pruebas de laboratorio sin llegar a una comprensión total sobre su rol fundamental.

El empleo de los CCM en el campo de la construcción, hoy en día se encuentra en una fase de estudio experimental a nivel de factibilidad con excelentes resultados, por lo que a futuro se perfila como una alternativa sustentable y sostenible frente al hormigón tradicional como hoy se lo conoce.

El estudio de los CCM permite encontrar materiales que respondan a necesidades particulares de forma más eficiente.

8. Referencias

- AÏTCIN P.-C. (1998). High-Performance Concrete, E&FN Spon, London, UK.
- ASKELAND, D. R., Wright, W. J. (2017). Ciencia e ingeniería de materiales, 7ma edición, Cengage Learning Editores S.A., México, D.F.
- BADAK, F., Abolfazl, H., Alimorad. R., Parviz. G. (2014). Preparation and Mechanical Properties of Graphene Oxide: Cement Nanocomposites. The Scientific World Journal, Volumen 2014. Artículo ID 276323. 10 págs. Hindawi Publishing Corporation. DOI: 10.1155/2014/276323
- BAERA, C., Mircea, C., Szilagyi. H. (2015). Cementitious Composite Materials with im-

- proved Self-Healing Potential. Constructii, Bucharest. Romania.
- BALAKRISHNA, B. (2013). Cellular Concrete. An alternative for sustainable design & Construction. The Masterbuilder.
- BANG, J., Prabhu, G., Jang, Y., Kim, Y. (2015). Development of Ecoefficient Engineered Cementitious Composites Using Supplementary Cementitious Materials as a Binder and Bottom Ash Aggregate as Fine Aggregate. International Journal of Polymer Science, Volumen 2015. Artículo ID 681051. 12 págs. Hindawi Publishing Corporation. DOI: 10.1155/2015/681051
- BARBERO, M., Flores, N., Guardia, C. (2017). Influence of the addition of waste graphite powder on the physical and microstructural performance of hydraulic lime pastes. Construction and Building Materials, Volumen 149, 15 de septiembre 2017, págs. 599-611, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.156
- CALLISTER, W. D., Rethwisch, D. G. (2009). Materials Science and Engineering: An Introduction, 8va edición. Hoboken: John Wiley.
- CARPIO, V. (2014a). Memorias de investigación sobre hormigones ligeros de alto desempeño reforzados con fibras "HPLWFRC" para el concurso ACI FRC Bowling Ball Competition 2014. Reno/Nevada, EE.UU.
- CARPIO, V. (2014b). Módulo estático de elasticidad del hormigón - Caso: ECUADOR. "Estudio, investigación final e informe global de las tesis sobre módulo de elasticidad del hormigón realizadas en la Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática de la Universidad Central del Ecuador. Quito, Ecuador, 2014, 39 págs. ISBN: 978-9942-20-405-9
- CARPIO, V., Molina, M. (2016). Análisis experimental de un hormigón elaborado con residuos industriales de polvo de grafito. Ponencia del área de infraestructura, desarrollo urbano, industria e innovación, IV Congreso REDU. Investigación que obtuvo el 2do lugar en el Concurso de Pósters Científicos. Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE), Sangolquí, Ecuador. Recuperado de <http://www.redu.edu.ec/images/MEMORIAS-IV-CONGRESO-2016-Comprimido.pdf>
- CARRERA, D., Cevallos, D. (2016). Bases de diseño para la construcción sostenible con bloque alivianado con poliestireno (tesis de pregrado). Universidad Central del Ecuador, Quito - Ecuador.
- COLLEPARDI, S., Coppola, L., Troli, L., Collepardi, M. (1997). Mechanical properties of modified reactive powder concrete. ACI Special Publication, Volumen: 173 (1), págs. 1-22
- ESMAEILI, K. (2012). Elastic Composite Reinforced Lightweight Concrete as a type of Resilient Composite Systems. International Journal of Innovative Technology and Creative Engineering (IJITCE), Volumen 2, No.8. ISSN: 2 045-8711, Agosto 2012.
- Federal Highway Administration Research and Technology (FHWA). (2013). Ultra-High Performance Concrete: A State-Of-The-Art Report for The Bridge Community. CHAPTER 3. MECHANICAL PROPERTIES. FHWA-HRT-13-060.
- FEHLING, E., Schmidt, M., Stürwald, S. (2008). Ultra high performance concrete (UHPC): Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete. Kassel, Germany, March 05-07, 2008. Kassel: Kassel University Press.
- FISHER, F. (2006). Chapter 15: Stress analysis. Myer Kutz. Mechanical Engineers' Handbook: Materials and mechanical design. Volumen 1, 3ra edición. John Wiley & Sons, Inc.
- FLORES, N., Barbero, M., Bustamante, R. (2017). Filler de grafito reciclado de EDM en pastas de yeso. Anales de edificación, Volumen 3, No. 2, págs. 27-38 (2017), ISSN: 2444-1309, DOI: 10.20868/ade.2017.3569

- GUPTA, R.B., Chander, S. (2017). *Material Science [For Civil Engineering]*. Satya Prakashan. New Delhi. India.
- GRAYBEAL, B. (2013). *Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community*. FHWA-HRT-13-060. Recuperado de <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/hpc/13060/13060.pdf>
- HAMAD, A. J. (2017) Size and shape effect of specimen on the compressive strength of HPLWFC reinforced with glass fibres, *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, Volume 29, Issue 4, 2017, Pages 373-380, ISSN 1018-3639. DOI: 10.1016/j.jksues.2015.09.003
- HAN, B., Yu, X., Ou, J. (2015). *Self-Sensing Concrete in Smart Structures*. Butterworth-Heinemann. Elsevier. DOI: 10.1016/C2013-0-14456-X
- HAZELWOOD, T. (2015). *Investigation of a novel self-healing cementitious composite material system (tesis de doctorado)*, Cardiff University.
- HENDRIK, G. (2005). *Background Facts and Issues Concerning Cement and Cement Data*. US Dept. of the Interior & US Geological Survey.
- Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA). (s.f). *Historia del cemento*. Recuperado de <https://www.ieca.es/historia-del-cemento/>
- KHMUROVSKA, Y., Štemberk, P. (2018). Comparison of engineered cementitious composites and concrete for strengthening of concrete structural details using RBSM. *MATEC Web of Conferences* 146, 02004. 9th International Scientific Conference Building Defects (Building Defects 2017). DOI: 10.1051/mateconf/201814602004
- KOSMATKA, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C., Tanesi, J. (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*. Portland Cement Association. Skokie/Illinois, EE.UU.
- KUSUMAWARDANINGSIH. Y., Fehling. E., Ismail. M., Aboubakr. A. A. M. (2015). Tensile Strength Behavior of UHPC and UHPFRC, *Procedia Engineering*, Volume 125, 2015, Pages 1081-1086, ISSN 1877-7058. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.11.166.
- LI, V.C. (2008). *Engineered Cementitious Composites (ECC) – Material, Structural, and Durability Performance*. *Concrete Construction Engineering Handbook*, Capítulo 24, Ed. E. Nawy, CRC Press.
- LI, V. C., Kanda, T. (1998). *Engineered Cementitious Composites for Structural Applications*. *ASCE J. Materials in Civil Engineering*, Volumen 10, No. 2, págs. 66-69, 1998.
- LI, Z. (2011b). *Advanced Concrete Technology*, 2da edición. John Wiley & Sons, Inc.
- LITUMA, M., Zhunio, B. (2015). *Influencia de las perlas de poliestireno expandido (EPS) en el peso y en la resistencia a compresión del hormigón (tesis de pregrado)*. Universidad de Cuenca, Cuenca – Ecuador.
- LU, L.L., Ouyang, D. (2017). Properties of Cement Mortar and Ultra-High Strength Concrete Incorporating Graphene Oxide Nanosheets. *Nanomaterials* 2017, 7, 187. DOI:10.3390/nano7070187
- LU, L.L., Ouyang, D., Xu, W.T. (2016). Mechanical properties and durability of ultra high strength concrete incorporating multi-walled carbon nanotubes. *Materials* 2016, 9, 419. DOI: 10.3390/ma9060419
- LU, S., Sun, L., Zhang, J., Hu, H., Lei, Y., Hou, Y. (2017). High/Ultra-high Performance Graphene Oxide/Cement-based Composites with Large-scale, Ordered and Compact Flower-like Microstructures. *Cailiao Daobao/Materials Review*. 31. 78-84. DOI: 10.11896/j.issn.1005-023X.2017.023.010

- MADHKHAN, M., Nowroozi, S., Torki, M. E. (2015). Flexural strength of roller compacted concrete pavements reinforced with glass-roved textiles. *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 55, No. 1 (2015) 000-00. DOI: 10.12989/sem.2015.55.1.000
- MULLA, A., Shelake, A. (2016). Lightweight Expanded Polystyrene Beads Concrete. *International Journal of Research in Advent Technology* (E-ISSN: 2321-9637), Special Issue, National Conference, "VishwaCon'16", 19 de Marzo de 2016.
- NEVILLE, A. M., Brooks, J. J. (2010). *Concrete Technology*, 2da edición Prentice Hall, Harlow, UK.
- OLIVARES, M., Galán, C., Roa, J. (2003). Los composites: características y aplicaciones en la edificación. *Informes de la Construcción*, Volumen 54, No. 484, marzo-abril 2003. España.
- QUORA. (2015). What is the relation between civil engineering and material science? [Mensajes en un blog]. Recuperado de <https://www.quora.com/What-is-the-relation-between-civil-engineering-and-material-science>
- REEDY, J.N. (2013). *An Introduction to Continuum Mechanics*, 2da edición. Cambridge University Press.
- ROKUGO, K., Kunieda, M., Lim, S.C. (2005). Patching repair with ECC on cracked concrete surface. *Proc. CONMAT 5*.
- SADRMOMTAZI, A., Mirgozar M.A., Fasihi, A., Haghi, A. K. (2009). An investigation on effect of using PP fibers and different cementitious materials on mechanical properties of EPS concrete. *Proceeding of 3rd International Conference on Concrete & Development*, págs. 1035–1044.
- SAJEDI, F., Shafigh, P. (2012). High-Strength Lightweight Concrete Using Leca, Silica Fume, and Limestone. *Arabian Journal for Science and Engineering*, Volumen 37, October 2012, Issue 7, págs 1885–1893.
- SEDAHAT, A., Ram, M., Zayed, A., Kamal, R., Shanahan, N. (2014). Investigation of Physical Properties of Graphene-Cement Composite for Structural Applications. *Open Journal of Composite Materials*. DOI: 10.4236/ojcm.2014.41002
- SHORT, A., Kinniburgh, W. (1963). *Lightweight Concrete*. CR Books.
- SIERRA. M. G., Jonkers. H. M., Mera, W. (2015). Field Application of Self-healing Concrete with Natural Fibres as Linings for Irrigation Canals in Ecuador. Recuperado de http://icshm2015.pratt.duke.edu/sites/icshm2015.pratt.duke.edu/files/u9/ICSHM2015_MGSB_255_0.pdf
- SMITH, W. F., Hashemi, J. (2006). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. 4ta edición. Mc-Graw Hill.
- VERNET, C. (1995) Mécanismes chimiques d'interactions ciment-adjuvants, CTG Spa Guerville Service Physico-Chimie du Ciment, Janvier, 10 págs.
- VIJAY. K., Murmu. M., Deo. S. V. (2017). Bacteria based self healing concrete – A review, *Construction and Building Materials*, Volume 152, 2017, Págs 1008-1014, ISSN 0950-0618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.040.
- WANG. Y., Li. Y., Ran. J., Cao. M. (2012). Experimental Investigation of a Self-Sensing Hybrid GFRP-Concrete Bridge Superstructure with Embedded FBG Sensors. *Hindawi Publishing Corporation International Journal of Distributed Sensor Networks*, Volumen 2012, Artículo ID 902613, 10 págs. DOI: 10.1155/2012/902613
- WILLE. K., Loh. K. (2015). Nanoengineering Ultra-High-Performance Concrete with Multiwalled Carbon Nanotubes. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board* · December 2010. DOI: 10.3141/2142-18
- XINCHENG, P. (2017). *Super-High-Strength High Performance Concrete*. CRC Press.

YEGINOBALI, A., Sobolev, K. G., Soboleva, S. V., Tokyay, M. (1998). High Strength Natural Lightweight Aggregate Concrete with Silica Fume. ACI Special Publication, Volumen: 178, Junio 1, 1998, págs. 739-758. Recuperado de <https://people.uwm.edu/sobolev/files/2016/10/CANMET-ACI-SP178-38-19q3t5j.pdf>

YILDIRIM, G & Şahmaran, M, Anıl, Ö. (2018). Engineered cementitious composites-based concrete. 387-427. DOI: 10.1016/B978-0-08-102181-1.00015-0

YU, K., Jiangtao, Y., Dai, J-G., Lu, Z-D., P Shah, S. (2018). Development of ultra-high performance engineered cementitious composites using polyethylene (PE) fibers. Construction and Building Materials. 158. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.10.040

ZHOU, F. (2014). Investigation on Properties of Cementitious Materials Reinforced by Graphene (tesis de maestría). University of Pittsburgh, EE.UU.

Análisis de la eficiencia sanitaria de las obras hidráulicas construidas para descontaminar la quebrada Ortega por parte de la EPMAPS, Quito

Enríquez, Carlos¹; Torres, Paulina¹

¹Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería Ciencias Físicas y Matemática, Carrera de Ingeniería Civil, Quito, Ecuador
cgenriquez@uce.edu.ec

²Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento, Quito, Ecuador
paulina.torres@aguaquito.gob.ec

Información del artículo
Recibido: julio 2018
Aceptado: septiembre 2018

Resumen

El presente estudio se basa en analizar la eficiencia sanitaria de las obras hidráulicas construidas para descontaminar la quebrada Ortega por parte de la EPMAPS. Se realiza el estudio hidráulico e hidrológico del sector de la quebrada Ortega, mediante el cual se definió las épocas lluviosa y seca. Para la definición de los parámetros físico-químicos y microbiológicos, se toma como referente la legislación ambiental vigente ecuatoriana, indicada en el Acuerdo Ministerial No. 097-A, Anexo 1 del libro VI, tabla 2 y tabla 2-a, Registro Oficial 387, del 4 de junio de 2015, además de los registros históricos de la quebrada Ortega de los años 2012, 2013, 2014. Adicionalmente se realiza el estudio de macroinvertebrados acuáticos, como indicadores de la calidad ecológica de las aguas de la quebrada Ortega y sus afluentes, a través del índice BMWP. Se analizaron 3 zonas de la quebrada Ortega para definir su comportamiento, estas fueron las partes alta, media y baja de la misma y sus implicaciones ambientales.

Palabras clave: quebrada Ortega, macroinvertebrados acuáticos, calidad del agua.

Abstract

The current study focuses on analyzing the sanitary efficiency of the hydraulic works constructed to decontaminate the Ortega ravine by the EPMAPS. The rainy and dry seasons were defined based on hydraulic and hydrologic studies performed on the ravine. In order to characterize the physiochemical and microbiological parameters, multiple factors were taken into account such as the current Ecuadorian environmental legislation (Ministerial agreement No 097-A, Annex 1 from book VI, tables 2 and 2-a, Official Record 387, June 4, 2015), and the historic records of the ravine of 2012, 2013, and 2014. Moreover, the study of aquatic macroinvertebrates was carried out through the BMWP index to characterize the water quality running through the Ortega ravine and its tributaries. Three zones of the Ortega ravine were analyzed to define their behavior, they were the upper middle and lower part of it and their environmental implications

Keywords: Ortega ravine, aquatic macroinvertebrates, water quality

1. Introducción

El estudio pretende definir el estado actual de la quebrada Ortega, a través de la contrastación del antes y el después de la construcción de colectores, interceptores y emisarios. Se analiza la recuperación o no de la calidad ambiental, y se comprueba si las inversiones en estas obras mejoran la calidad de vida de la población beneficiaria.

A través de este estudio se complementa el análisis realizado por parte del Departamento de Tratamiento de Aguas Residuales (DTAR) a la Línea Base de Calidad del Agua en la Quebrada Ortega, en lo que concierne con la definición de periodos de lluvia y periodos secos, que permitan conocer los meses de mayor y menor dilución de contaminantes en este cuerpo de agua.

Por último, el estudio permite la esquematización de las áreas de aportación de caudales de aguas residuales y pluviales, que convergen hacia el sitio donde se construyó la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) Quitumbe.

Esta investigación se realizó durante periodos de lluvia (enero, febrero y marzo) y seco (mayo, junio y julio) en el año 2017, mediante el muestreo y análisis del agua de la quebrada Ortega y sus dos principales aportantes, la quebrada Monjas y la quebrada San José; así como también la cuantificación de macroinvertebrados acuáticos en estaciones de monitoreo, para definir la recuperación de este cuerpo de agua, complementándose con un estudio hidráulico e hidrológico a dicha área de estudio, que consistió en definir caudales, condiciones de escorrentía, drenaje, inundaciones y la aplicación de encuestas para el análisis de la percepción de la comunidad respecto a las obras de saneamiento construidas en el sector.

En esta investigación se obtuvieron resultados de los parámetros físicos, químicos, microbiológicos, biológicos, hidráulicos e hidrológicos en cada estación de monitoreo, para mediante el análisis en comparación con la legislación ambiental vigente y los datos históricos de monitoreo a este cuerpo de agua por parte de la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento de Quito, determinar si existe el restablecimiento

de la calidad del agua y generar una metodología para el control ambiental de cursos urbanos.

2. Metodología

No existen estudios que expliquen si las obras hidráulicas han contribuido a la mejora de las condiciones ambientales de la quebrada Ortega y por ende de la población aledaña.

Por lo que en esta investigación se determina un proceso metodológico basado en el monitoreo e interpretación de parámetros físicos, químicos y biológicos, que permitan mantener un control de descargas ilícitas, de operación de los sistemas depuradores y de todas aquellas obras que fueron construidas con el objetivo de ayudar en la descontaminación de los ríos de Quito.

a. Definición del área de estudio

La EPMAPS, a través de la Gerencia de Operaciones y el Departamento de Tratamiento de Aguas Residuales, ejecutó en el año 2014, el “Proyecto piloto para el levantamiento de la línea base de calidad de agua en el área aportante a la PTAR proyectada en el sector de Quitumbe”, con el objetivo principal de levantar una línea base de los cursos hídricos urbanos, a través del monitoreo y muestreo, identificando las descargas críticas provenientes de industrias y comercios, a fin de prevenir y controlar el ingreso al sistema de alcantarillado de contaminantes tóxicos, que puedan interferir en los procesos biológicos de la PTAR Quitumbe.

Con este antecedente, se adoptó la misma área de influencia para el análisis físico, biótico y socio económico; esta área se definió considerando los siguientes criterios técnicos:

De acuerdo a Barahona (2014), la definición de los puntos de monitoreo, se basó en gran parte en la información obtenida del Plan de Saneamiento Ambiental (PSA) y el Departamento de Alcantarillado, especialmente el mapa de las áreas de aporte a los cuerpos hídricos del sur de Quito y el mapa de la microcuenca aportante a la PTAR Quitumbe.



Figura 1. Cuenca aportante PTAR Quitumbe.

Fuente: EPMAPS, Dpto. de Alcantarillado, 2014.

También se consideró el flujo del sistema de alcantarillado del sector, para así analizar las áreas de aporte respectivas y con esto, limitar la zona a solo las áreas que aportan con agua hacia la quebrada Ortega.

b. Estaciones de monitoreo

Este estudio consideró abarcar la influencia de la contaminación antropogénica sobre la calidad biológica del agua en la quebrada Ortega y sus afluentes, dentro del área aportante a la PTAR Quitumbe, que servirá en la recuperación de este curso hídrico.

La toma de decisión sobre los puntos de muestreo se realizó de acuerdo a las siguientes consideraciones:

1. Identificación de la microcuenca aportante a la PTAR Quitumbe de la EPMAPS.
2. Identificación de quebradas circundantes.
3. Altura (msnm).
4. Accesibilidad a los puntos de muestreo.
5. Estaciones meteorológicas.
6. Climatología.

7. Caudal aportante.

8. Índices ecológicos

Se tomó cuatro puntos de estudio dentro de la quebrada Ortega, la cual está conformada por dos aportantes; así:

- Quebrada Monjas punto 1
- Quebrada Monjas punto 2
- Quebrada San José
- Quebrada Ortega

c. Estaciones pluviométricas

Se identificó mediante los mapas respectivos, tanto las estaciones del INAMHI, así como de la EPMAPS que se encuentran cerca de nuestra zona de estudio, teniendo las siguientes:

- Chillogallo Buenaventura
- Atacazo
- El Troje
- Izobamba

d. Definición de parámetros físicos, químicos y microbiológicos.

La selección de los parámetros por monitorear responde a los objetivos específicos perseguidos por las entidades ambientales responsables de control, según el uso potencial y actual del curso hídrico.

Teniendo como base el uso específico del agua y el nivel de seguimiento que se desee realizar a la fuente. Los parámetros por monitorear también pueden seleccionarse a partir de los resultados de campañas preliminares que tengan como objetivo identificar los principales componentes de la contaminación.

En este estudio se realizaron 43 ensayos en el Laboratorio de Control de Calidad del Agua L3C de la EPMAPS, en función de lo descrito previamente.

e. Muestreo de macroinvertebrados

1. Identificación de microhábitats

Una vez escogido el tramo, se realizó un recorrido rápido a lo largo del mismo para identificar los microhábitats potenciales para ser muestreados. En principio los microhábitats están definidos por áreas del lecho del río, compuestas por determinados tipos de sustratos, ya sean inorgánicos u orgánicos. Algunos de los más frecuentes son los siguientes:

Sustratos minerales: bloques, piedras, cantos, grava, arena, arcilla, limo.

Sustratos orgánicos: hojarasca, macrófitas, briófitos, algas filamentosas, raíces expuestas, ramas y troncos.

Así mismo, se identificaron cuáles de estos microhábitats son marginales o dominantes. Considerando microhábitats marginales a aquellos cuya representatividad sea menor al 10% en el tramo

2. Colecta de muestras

El muestreo de macroinvertebrados se realizó con una red de marco cuadrado (Square frame net) de 500 micras de ojo de malla (tamaño de red de 25 cm de lado) y con la técnica de patada, que consiste en remover arena, materia orgánica y piedras que pueda suspenderse con facilidad presente en el lecho del cuerpo de agua, con la finalidad de obtener el mayor número de especímenes (macroinvertebrados). Se consideraron un total de 8 réplicas (cada una de aproximadamente 1 m² de área), las cuales se distribuyeron según la representatividad de los microhábitats en el tramo escogido.

Una vez escogido el microhábitat, el muestreador se colocó en dirección opuesta a la corriente y pateó el fondo del río removiendo el sustrato de modo que los macroinvertebrados adheridos se suelten y sean transportados por la corriente hacia el fondo de la red.

Este procedimiento se realizó cubriendo toda el área de muestreo definida sin exceder los dos minutos por microhábitat.

3. Procesamiento de muestras en el campo

Una vez obtenidas las ocho unidades muestrales, éstas se integraron en una sola muestra que se depositó en una bandeja para proceder a excluir los sustratos minerales u orgánicos grandes (cantos, hojarasca grande, ramas, entre otros) teniendo precaución de lavarlos previamente para desprender los macroinvertebrados que pudieron estar sobre los mismos.

Cuando se obtuvo toda la muestra limpia, la misma se depositó en un frasco hermético de plástico de 300 mL tratando de que quede la menor cantidad posible de agua, ya que se conservó con alcohol al 96%.

4. Procesamiento de muestras en el laboratorio

Una vez en el laboratorio, la muestra se lavó con agua y se pasó por dos tamices con el objetivo de dividir la muestra en dos tamaños de sustrato: grueso y fino. Uno de los tamices correspondió a un colador de cocina y el segundo a otro cernidor con una apertura igual al de la red usada en el muestreo (es decir 500 micras). Cada una de estas partes se extendió y homogeneizó en una bandeja para fraccionarlos en sub-partes.

Se empezó a revisar la octava parte correspondiente al sustrato grueso, distribuyéndola en varias placas Petri, en cantidad suficiente para que sea adecuado observar a través del estereoscopio y se separó, identificó y contó los macroinvertebrados a nivel de familia con ayuda de pinzas de punta fina.

3. Resultados y discusión

En la quebrada Ortega, objeto de este estudio, se realizaron varias mediciones, el caudal del curso hídrico, definición de los periodos de sequía y pluviosidad; así como la presencia o no de ciertos órdenes y familias de macroinvertebrados como indicadores de la calidad del agua.

Por lo expuesto, la tabla 1 contiene un resumen de resultados del análisis hidráulico de la microcuenca de la quebrada Ortega:

Tabla 1. Resultados hidráulicos microcuenca quebrada Ortega.

No.	PARÁMETRO	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
1	Área	A	Km ²	14,16
2	Perímetro de la Cuenca	P	Km	35,14
3	Longitud del Cauce principal	La	Km	10,15
4	Ancho promedio de la Cuenca	W	Km	1,40
5	Desnivel Altitudinal	DA	m	1090
6	Factor de Forma	Kf		0,14
7	Coefficiente de Compacidad	Kc		2,63
8	Pendiente media del Cauce principal	S	%	10,74%
9	Densidad de Drenaje	DD		0,86
10	Tiempo de Concentración	tc	minutos	55,99
11	Coefficiente de Escorrentía Ponderado	C		0,52
12	Intensidad de Lluvia	I	mm/h	41,17
13	Caudal	Q	l/s	84,21

El área de la microcuenca es de 14.166 km², por lo que se la trataría como un sector de la cuenca del Machángara, de acuerdo a Barros (1990). La longitud del cauce principal es de 10.15 km, se ha categorizado como de curso corto. El sector de la quebrada Ortega tiene un desnivel altitudinal de 1090 m, lo que quiere decir que la variabilidad ecológica y climática no es alta. El factor de forma Kf obtenido es de 0.14, este valor determina que tiene una forma muy poco achatada. El coeficiente de compacidad Kc es de 2.63, lo que quiere decir que de acuerdo a Aguirre (1987), tiene una baja tendencia a crecidas, con una forma oval oblonga a rectangular. La quebrada Ortega como cauce principal y de acuerdo a Heras (1986), tiene un terreno accidentado medio, la densidad de drenaje del sector de la quebrada Ortega es de regular drenaje de acuerdo a Henaos (1988).

Para determinar la cantidad de agua que ha caído en los meses en los que se realizó el estudio, se realizó la estadística de los datos de las estaciones meteorológicas, considerando que de las 4 estaciones escogidas, solo una pertenece a la red de estaciones del INAMHI. También se realizó una comparación con lo ocurrido entre los años 2000 al 2011, lo que permitió tener una idea más clara sobre la definición de los periodos de lluvia y secos en la microcuenca Ortega; así:

Tabla 2. Precipitaciones en estaciones 2000 - 2011

ESTACIÓN	PRECIPITACIÓN (mm) / MESES (2000 - 2011)					
	ENERO	FEBRERO	MARZO	MAYO	JUNIO	JULIO
IZOBAMBA	100,33	117,43	152,55	109,64	61,58	45,53
CHILLOGALLO	103,69	84,1	135,62	101,36	52,57	64,66
ATACAZO	99,8	129,74	172,18	138,31	77,35	48,52
EL TROJE	95,68	114,76	130,88	110,28	53,07	37,28

Tabla 3. Precipitaciones en estaciones 2016

ESTACIÓN	PRECIPITACIÓN (mm) / MESES (2016)					
	ENERO	FEBRERO	MARZO	MAYO	JUNIO	JULIO
IZOBAMBA	121,6	73,5	142,2	112,8	37,4	15,2
CHILLOGALLO	124,1	29,1	86,1	119,3	18,3	10,4
ATACAZO	138,4	61,2	156,3	158,9	63,1	31,6
EL TROJE	191	56,9	251,2	119,8	36,7	15,2

Como se puede constatar en las tablas 2 y 3, se observa que los meses escogidos para hacer el muestreo, coincide con los periodos de lluvia (enero, febrero y marzo) y secos (mayo, junio y julio).

Identificación de macroinvertebrados. Cuantificación y cualificación de macroinvertebrados acuáticos

Los macroinvertebrados en la quebrada Ortega y sus afluentes, de acuerdo a las estaciones de muestreo descritas previamente, estuvieron representadas por 15 órdenes y 32 familias, como se indica en la tabla 5. Siendo la familia de los *Leptociridae*, Orden *Tricoptera* el más representativo.

En el Estudio de Impacto Ambiental, Construcción y Operación-Mantenimiento de la Planta de Recuperación de Agua en el sector Quitumbe EPMAPS, pág. 182 (2013), se registró un total de 30 individuos distribuidos en seis géneros, seis familias, cuatro órdenes y dos clases. Siendo el género *Clognia Cf.* (familia de los *Psychodidae*) el más representativo con un 43% del total de macroinvertebrados registrados.

Tabla 4. Presencia en estaciones Orden *Tricoptera*, familia *Leptociridae*

ESTACIÓN	ÉPOCA	
	LLUVIOSA	SECA
SAN JOSÉ	8,84%	20,63%
MONJAS 1	16,09%	28,63%
MONJAS 2	7,81%	57,47%
ORTEGA	23,86%	0,84%

Tabla 5. Órdenes y familias encontradas en los muestreos

Orden	Familia
Acarina	<i>Hydrachnidae</i>
Amphipoda	<i>Hyalellidae</i>
Basommatophora	<i>Planorbidae</i>
Coleóptero	<i>Elmidae</i>
	<i>Hydroptilidae</i>
	<i>Dytiscidae</i>
	<i>Scirtidae</i>
	<i>Girinidae</i>
Díptera	<i>Ceratopogonidae</i>
	<i>Chironomidae</i>
	<i>Cyclorhapha muscidae</i>
	<i>Dolichopodidae</i>
	<i>Empididae</i>
	<i>Lepidoptera</i>
	<i>Limoniidae</i>
	<i>Psychodidae</i>
	<i>Simulidae</i>
	<i>Tabanidae</i>
<i>Tipulidae</i>	
Entomobryomorpha	<i>Isotomidae</i>
Ephemeroptera	<i>Baetidae</i>
Glossiphoniiformes	<i>Glossiphoniidae</i>
Gordioidea	<i>Gordiidae</i>
Oligochaetae	<i>Haplotaxida</i>
Hemíptera	<i>Notonectidaea</i>
Plecóptero	<i>Perlidae</i>
Tricoptera	<i>Leptoceridae</i>
	<i>Odontoceridae</i>
	<i>Helichopsychidae</i>
	<i>Hydrobiosidae</i>
Tricladida	<i>Planaridae</i>
Unionoida	<i>Sphaeridae</i>

La abundancia de especies de macroinvertebrados depende de los aspectos físicos del entorno de las quebradas, especialmente en lo concerniente a la composición del lecho del curso hídrico,

ya que es el hábitat de estos organismos indicadores de la calidad ecológica del agua.

Tabla 6. Índice BMWP/Col

CLASE	CALIDAD	BMWP/COL	SIGNIFICADO	COLOR
I	Buena	>150, 101- 120	Aguas muy limpias a limpias	
II	Aceptable	61-100	Aguas ligeramente contaminadas	
III	Dudosa	36 - 60	Aguas moderadamente contaminadas	
IV	Crítica	16 - 35	Aguas muy contaminadas	
V	Muy crítica	< 15	Aguas fuertemente contaminadas	

La calidad ecológica de la microcuenca de la quebrada. Ortega, de acuerdo a los datos obtenidos del muestreo, conteo y valoración de macroinvertebrados acuáticos, mediante el Índice BMWP/Col, determina que en la mayoría de sus afluentes la calidad del agua tiene calificación dudosa, es decir que sus aguas son moderadamente contaminadas.

Existen cambios en las comunidades acuáticas, evidenciadas por la disminución de la diversidad y cambios en la abundancia de las especies. Esto debido al grado de contaminación por una alteración en la cantidad de compuestos orgánicos contaminantes o condiciones físicas. El punto crítico sería la quebrada Ortega el cual limita la vida de los organismos acuáticos.

Análisis físico, químico y microbiológico

Los cuatro puntos muestreados presentan una buena saturación de oxígeno, en las dos épocas (lluviosa y seca), lo que contribuye a una eficiente recuperación de los cursos hídricos, en el aspecto de su calidad ecológica, adicionalmente la temperatura es un factor determinante que ayuda a mantener la saturación de oxígeno en toda la quebrada.

En todos los puntos muestreados, se obtuvieron resultados que indican presencia de contaminación, los mismos que se ven reflejados en el incumplimiento de la normativa ambiental vigente, que establece un límite < 20 mg /L de DQO; esto se puede atribuir a actividades de tipo antropogénico, lo que indica que es de vital importancia la implementación de un programa de vigilancia y monitoreo de esta microcuenca.

Analizando el parámetro aceites y grasas, se concluye que se presenta a lo largo de la quebrada Ortega y sus aportantes, con valores que incumplen la normativa ambiental vigente $< 0.3 \text{ mg/L}$, lo que impide la transferencia completa de oxígeno entre el cuerpo de agua y el ambiente; alterando los procesos de auto depuración del curso hídrico.

4. Conclusiones

la microcuenca Ortega, morfológicamente es de forma oval a oblonga, muy poco achatada, por lo que tiene una baja tendencia a las crecidas, el terreno por el cual atraviesa es de tipo accidentado medio con un buen drenaje.

La quebrada Ortega presenta una intensidad de lluvia muy fuerte, pero de duraciones cortas es decir que durante un día, solo se presenta la lluvia en horas determinadas.

De acuerdo con los registros meteorológicos tanto del estudio en el año 2016, como del INAMHI en el periodo del 2000 al 2011, se determina que durante la época lluviosa se registra 119.3 mm de precipitación media y durante la época seca 61.56 mm, los meses más secos son julio y agosto y los más lluviosos son marzo y abril.

Los trabajos realizados por parte de la EPMAPS en los años 2012, 2013 y 2014, son registros cortos y limitados en cobertura espacial, los cuales imposibilitan tener una lectura y análisis adecuado de los parámetros definidos para el control del curso hídrico.

La percepción de la comunidad en lo concerniente a las obras de saneamiento ambiental implantadas en la zona de estudio por parte de la EPMAPS, sugiere que en la mayoría de los casos prima el desconocimiento de dichas actividades y que se mantienen los problemas de generación de malos olores y presencia de vectores en el sector.

La calidad ecológica de la microcuenca de la quebrada Ortega, de acuerdo a los datos obtenidos del muestreo, conteo y valoración de macroinvertebrados acuáticos, mediante el índice BMWP/Col, determina que en la mayoría de sus afluentes la calidad del agua tiene calificación dudosa, es decir que sus aguas son moderadamente contaminadas.

La abundancia de especies de macroinvertebrados depende de los aspectos físicos del entorno de las quebradas, especialmente en lo concerniente a la composición del lecho del curso hídrico, ya que es el hábitat de estos organismos indicadores de la calidad ecológica del agua, esto quedó evidenciado en el muestreo del mes de julio de 2016 a la Estación Ortega, la misma que sufrió la alteración antropogénica de sus márgenes y por ende el cambio de los sustratos en el lecho del cuerpo de agua, impidiendo realizar el muestreo, ya que las comunidades de macroinvertebrados, fueron afectadas en su totalidad.

Producto de las obras de saneamiento ambiental construidas por parte de la EPMAPS, especialmente la intercepción de las aguas residuales de tipo doméstico, que se descargaban a la quebrada Ortega, se pudo verificar en función de los análisis físicos, químicos, biológicos y microbiológicos que su calidad del agua ha mejorado, ya que con los datos históricos de los años 2012, 2013 y 2014 que se contaban del monitoreo a este curso hídrico, se puede concluir con los análisis de 2016, que existe una disminución considerable de contaminantes orgánicos e inorgánicos en el cuerpo de agua.

Se constató visualmente conexiones clandestinas de aguas residuales hacia las márgenes de la quebrada Ortega, especialmente en la zona de los barrios poblados circundantes, lo que se refleja en los resultados de decrecimientos en ciertos meses de las poblaciones de macroinvertebrados, que lo evidencia también los resultados de análisis físico químico y microbiológico.

La información climática, hidrológica y de calidad del agua, ha constituido un insumo importante para el diseño de proyectos de aprovechamiento y control del agua, así también para el 'Programa de descontaminación de los ríos de Quito'; sin embargo, la información disponible por no ser continua en el tiempo y tampoco espacialmente representativa, ha sido insuficiente para el desarrollo estratégico de planes y lineamientos que permitan establecer metas concretas sobre saneamiento, recuperación y preservación del recurso agua

De acuerdo a los datos hidrometeorológicos obtenidos en la microcuenca Ortega, se puede verificar que los periodos de lluvia y secos son muy variables, por lo que para planificar un muestreo, es importante hacerlo considerando un margen de tiempo de 5 días sin precipitaciones, para garantizar los datos obtenidos luego del muestreo tanto de macroinvertebrados como de parámetros físicos, químicos y microbiológicos, buscando que estos sean homogéneos y no causen interferencia en el análisis de resultados.

Agradecimiento

a la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento por permitirnos realizar la parte experimental de nuestra investigación en su Laboratorio Central de Control de la Calidad del Agua.

Referencias

Aguirre, L. C. (1987).

[1] Abarca, M. (2007). El uso de macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua. *Biocenosis*, 323.

- [2] Agroempresarial, S. (2011). Manual de procedimientos de toma de muestras de aguas para análisis físico químico y microbiológico. Cicuco: Control Ambiental.
- [3] Aguirre, L. C. (1987). El hombre fósil de Ibeas y el Pleistoceno de la sierra de Atapuerca.
- [4] Valladolid. Ambiental, C. (2013). Estudio de impacto ambiental construcción y operación - mantenimiento de la planta de recuperación de agua en el sector de Quitumbe. Quito: Calidad Ambiental.
- [5] Barros. Gustavo (1990). Curso de hidrología. Sincelejo.
- [6] EPMAPS. (2016). Boletín de lluvias DMQ. Quito.
- [7] González, Hari. (2013). Muestreo de macroinvertebrados. Cuenca: ETAPA.
- [8] Henaos. J (1988). Introducción al manejo de cuencas hidrográficas. Bogotá.
- [9] Heras. Rafael (1986). Recursos hidráulicos: síntesis, metodología y normas. Madrid.
- [10] Roldán, Gabriel (2008). Fundamentos de limnología neotropical. Medellín: Universidad de Antioquia.

Diseño de un Sistema de Aprovechamiento de Agua Lluvia bajo criterios de Eficiencia Hídrica en Edificios. Caso de estudio: Edificio de Clases y Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática de la Universidad Central del Ecuador

Valenzuela C.*; Muñoz F.**; Gomes R.***

*Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería Ciencias Físicas y Matemática, Quito, Ecuador
Polytechnic Institute of Leiria, School of Technology and Management, Leiria, Portugal
e-mail: carvalenp88@hotmail.com

**Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería Ciencias Físicas y Matemática, Quito, Ecuador
Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento de Quito (EPMAPS)
e-mail: fpmunoz@uce.edu.ec

***Polytechnic Institute of Leiria, School of Technology and Management, Leiria, Portugal
INESC - Institute for Systems Engineering and Computers at Coimbra, Portugal
e-mail: ricardo.gomes@ipleiria.pt

Información del artículo
Recibido: julio 2018
Aceptado: septiembre 2018

Resumen

El agua es uno de los recursos naturales indispensables para el desarrollo de la vida. Lamentablemente, la condición de recurso renovable es muy cuestionada. Ecuador es uno de los países de América del Sur con mayor número de fuentes de agua dulce superficiales y subterráneas considerando su área continental. Sin embargo, existen factores influyentes que afectan la disponibilidad del agua dulce como recurso natural y que ponen en riesgo el volumen de estas reservas. El crecimiento exponencial de las poblaciones, el inclemente cambio climático, la falta de leyes y mecanismos de control para el uso responsable de agua potable y en especial, la escasez de cultura sobre la aplicación de prácticas responsables para el uso de agua potable en edificios, hace que este recurso se agote rápidamente. Las cifras estadísticas indican datos alarmantes de Ecuador con respecto a los países de la región, ya que es el mayor consumidor de agua potable con dotaciones que superan los 237 litros/(habitante.día). Esta realidad hace imprescindible que se reduzcan los consumos de agua potable en edificios para mejorar su eficiencia hídrica y convertirlos en proyectos autosustentables sin afectar la sensación de confort en los usuarios. El principal objetivo de este trabajo es el de presentar los resultados obtenidos sobre el análisis de eficiencia hídrica en edificios universitarios de Quito a través de metodologías de cálculo internacionales como la sugerida por la "ANQIP - Associação Nacional para a Qualidade nas Instalações Prediais", de Portugal. Se concluye que, la instalación de un sistema de aprovechamiento de agua lluvia reducirá considerablemente los consumos de agua potable en un edificio con bajo desempeño hidráulico. El presente estudio se da como tema de investigación de Maestría en el Instituto Politécnico de Leiria y la Universidad Central del Ecuador.

Palabras clave: Agua de lluvia, Cambio climático, Eficiencia Hídrica en edificios

Abstract

Water is one of the indispensable natural resources for the development of life. Unfortunately, the condition of renewable resource is very questioned. Ecuador is one of the countries in South America with the largest number of shallow and underground freshwater sources considering its continental area. However, there are influential factors that affect the availability of fresh water as a natural resource and that put the volume of these reserves at risk. The exponential growth of populations, the inclement climate change, the lack of laws and control mechanisms for the responsible use of drinking water and especially, the lack of culture on the application of responsible practices for the use of potable water in buildings, causes this resource to be exhausted quickly. The statistical figures indicate alarming data of Ecuador with respect to the countries of the region, since it is the largest consumer of drinking water with endowments exceeding 237 (liters/inhabitant.day) This reality makes it essential to reduce drinking water consumption in buildings to improve their water efficiency and turn them into self-sustaining projects without affecting the user's sense of comfort. The main objective of this work is to present the results obtained on the analysis of water efficiency in university buildings in Quito through international calculation methodologies such as the one suggested by the Portuguese Association for Quality in Building Services Installations (ANQIP). It is concluded that the installation of a rainwater harvesting system will considerably reduce the consumption of drinking water in a building with low hydraulic performance. The present study is given as a subject of Master's research at the Polytechnic Institute of Leiria and the Central University of Ecuador.

Keywords: Rainwater, Climate change, Water Efficiency in Buildings

Introducción

El principal inconveniente que incrementa los consumos de agua potable es precisamente la dotación que se asigna a cada ciudad. En el Ecuador, la dotación promedio de agua potable es de 237 litros/(habitante.día), lo cual representa una de las cifras más altas de la región. Si a este dato referencial se añade la falta de conciencia y cultura de la sociedad por hacer un buen uso del recurso natural, es lógico que los indicadores de desempeño reflejen tal gasto volumétrico de agua potable durante cada año. [1] [2]

La figura 1, muestra el consumo promedio de agua potable de los países que forman parte de la región. El consumo exagerado de agua potable en Ecuador, no se justifica ni por el número de habitantes en el país, ni tampoco por las condiciones climáticas ya que no son extremas como en otros países de la lista.

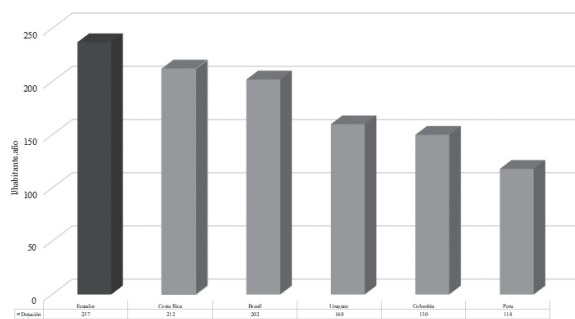


Figura 1. Consumo promedio de agua potable por países.

La investigación realizada muestra, a través de la figura 2, el análisis de las tasas por metro cúbico de agua potable en las capitales de los países de América del Sur.

Como es evidente, Quito durante el 2017, tiene una de las tarifas más bajas, por lo tanto, el consumo de agua potable es extremadamente alto, ya que no hay impacto económico sobre los usuarios.

El impacto del uso indiscriminado e incontrolado de agua dulce en América del Sur también está relacionado con la disponibilidad de recursos naturales y la falta de leyes que regulen el consumo

de agua potable. Por lo tanto, ha sido necesario aumentar las tasas económicas en los países de la región como una medida emergente para reducir el consumo de agua potable en los sectores residencial e industrial. [3] [4]

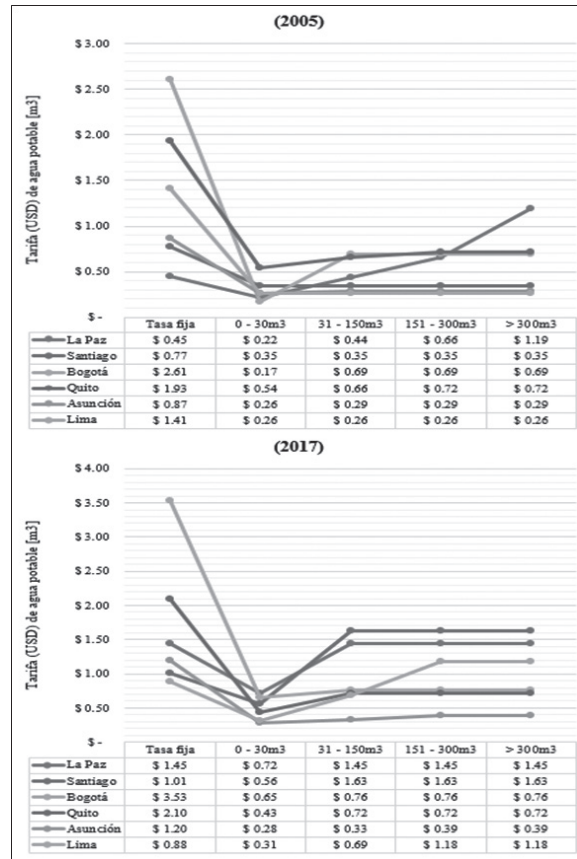


Figura 2. Tarifas de agua potable en las capitales sudamericanas.

Materiales y métodos

el análisis de eficiencia hídrica se ejecuta sobre dos edificios. El Edificio de Clases tiene aproximadamente 22 años y el Laboratorio de Hidráulica tiene más de 40 años. Ninguno de estos edificios tiene una certificación o evaluación de la eficiencia hídrica en este momento, su suministro de agua depende cien por ciento del sistema público de agua de Quito.

La ocupación de estos edificios, especialmente en el Edificio de Clases, es muy alta ya que es en este lugar donde se imparten las clases de las diferentes especialidades de lunes a viernes en periodos de 12 horas. La metodología empleada

para evaluar la eficiencia hídrica de ambos edificios es la siguiente:

- a) **Caracterización arquitectónica:** La importancia de la caracterización arquitectónica está relacionada con la identificación de puntos o instalaciones sanitarias que deben ser consideradas para mejorar el desempeño hídrico y el confort de los usuarios.
- b) **Caracterización hidrosanitaria:** permite identificar todos los dispositivos sanitarios y caracterizarlos en base a sus consumos. Para el Laboratorio de Hidráulica se inspeccionan 3 dispositivos sanitarios (2 llaves de baño y 1 inodoro). En el caso del Edificio de Clases, se obtienen los resultados que se detallan en la tabla 1.

Tabla 1. Caracterización sanitaria del Edificio de Clases

Dispositivo	Cantidad	Categoría
Sanitarios	17	-
Llaves de baño	18	-
Llaves de cocina	4	-
Urinarios	10	C

- c) **Certificación y etiquetado:** La certificación emitida sobre eficiencia hídrica, es la categorización que se da a un edificio en base al resultado calculado de sus consumos totales de agua potable. Para ello, se toman en consideración las dotaciones que por normas o reglamentos nacionales son establecidas para cada ciudad. En este caso, se consideran las normas nacionales vigentes que establecen una dotación promedio para edificios universitarios de 40 a 60 litros por estudiante por día. [5]

Con base en el promedio de consumo de referencia útil, dispositivos sanitarios y el mercado ecuatoriano, se propone a través de una proporción análoga del modelo de certificación y etiquetado que la ANQIP sugiere para Portugal, una certificación que se ajuste a los requerimientos de Quito basada en una dotación referencial para edificios universitarios de

50 litros/(estudiante.día). Esta certificación sugerida se resume con la tabla 2 [5] [6].

Tabla 2. Dotación de agua potable para edificios universitarios

Categoría	Consumo admisible establecido por la NEC
	litros/(estudiante.día)
A ⁺⁺	$0 < c \leq 20$
A ⁺	$20 < c \leq 25$
A	$25 < c \leq 30$
B	$30 < c \leq 35$
C	$40 < c \leq 60$
D	$60 < c \leq 70$
E	$c > 70$

El etiquetado sugerido según la certificación de la eficiencia hídrica de un edificio y sus dispositivos sanitarios se basa en el volumen total de agua potable que consume mensualmente, donde A⁺⁺ se considera el grado más alto de eficiencia y E, el más bajo. El sistema de etiquetado se propone de acuerdo con las categorías establecidas en la tabla 2.

La figura 3, detalla el rotulado que se diseña para evaluar la eficiencia hídrica de los edificios residenciales y no residenciales en Ecuador.

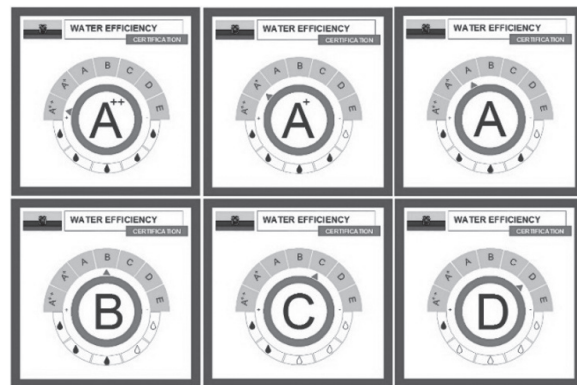


Figura 3. Rotulado de eficiencia hídrica para edificios



- d) Patrón de uso interno del agua: se determina cómo el agua es utilizada en los edificios, en base a los dispositivos que forman parte de las instalaciones sanitarias. Se descarta, por ejemplo, la presencia de duchas o máquinas de lavado.
- e) Consumos unitarios de dispositivos: considerando las normas vigentes en el país, se establecen cuáles son los consumos mínimos que requiere cada dispositivo sanitario estándar para categorizarlo en base a la certificación propuesta.
- f) Factores de uso: se determinan los factores de uso para cada dispositivo sanitario evaluado, los cuales son parámetros que establecen la frecuencia con la cual se utiliza cada dispositivo sanitario.

- g) Determinación de consumos: para determinar el volumen de cada dispositivo sanitario en ambos edificios, se utilizan dos métodos. El primero, hacer aforos volumétricos tradicionales y el segundo, con la ayuda de un dispositivo electrónico patentado que permite determinar el caudal en litros por minuto de cada dispositivo sanitario. [7]

Resultados y discusión

Un total de 49 puntos de instalaciones y servicios hidrosanitarios forman parte del Edificio de Clases y 3 puntos del Laboratorio de Hidráulica, por lo que es esencial determinar su categorización sobre eficiencia hídrica. El consumo promedio de agua es más alto en el Laboratorio de Hidráulica, porque los dispositivos que se instalan son muy antiguos y requieren mayores volúmenes de agua para su funcionamiento.

La tabla 3 muestra la eficiencia hídrica obtenida del Edificio de Clases.

Tabla 3. Eficiencia hídrica del Edificio de Clases

Dispositivo	Unidades	Flujo (Promedio)	Factor de Uso	Total litros/(persona/día)
		(A)	(B)	(C) = (A) X (B)
Inodoro	litros	5.94	1.14	6.77
Llave de baño	litros/min	4.03	2.24	9.03
Llave de cocina	litros/min	6.17	0.60	3.70
Urinario	litros	0.50	6.71	3.36
Consumo total calculado (litros/persona.día) Suma de Columna (C) = (1)				22.86
Factores de corrección		Multiplicativo	(No hay lavadoras)	1.00
	l/lavado	Adicional CWM	(=0, no lavadoras)	0.00
	l/(persona.día)			
	l/lavado	Adicional DM	(=0, no lavadoras)	0.00
l/(persona.día)				
Contribución por uso de agua lluvia l/(persona.día)				0.00
Contribución por reciclaje de aguas servidas l/(persona.día)				0.00
Contribución por uso de aguas subterráneas l/(persona.día)				0.00
CONSUMO DE AGUA TOTAL l/(persona.día)				22.86
USOS EXTERNOS l/(persona.día)				0.00
CONSUMO TOTAL l/(persona.día)				22.86
CATEGORÍA DE EFICIENCIA HÍDRICA DADA AL EDIFICIO				A+

La sorpresa es evidente. Como se muestra en la tabla 3, el Edificio de Clases logra una categoría muy aceptable de eficiencia de agua en comparación con la categoría del Laboratorio de Hidráulica cuyos resultados se detallan en la tabla 4 y que realmente reflejan una deficiencia en el sistema hidrosanitario existente. Esto es producido principalmente por los dispositivos ecoeficientes instalados en el primer edificio a pesar del mayor número de usuarios.

El consumo total de agua es de 22.86 litros/(persona.día) para el Edificio de Clases de la Facultad de Ingeniería. Comparando este valor con la clasificación por consumo estándar para edificios

universitarios de la tabla 2, se asigna una categoría equivalente a “A+”, ya que está dentro del rango de 20 a 25 litros/(persona.día).

Por el contrario, la eficiencia hídrica del Laboratorio de Hidráulica está en un rango intermedio a pesar de que solo tiene tres dispositivos sanitarios y un mínimo de 10 personas trabajando en este lugar, como lo demuestra la tabla 4.

En ambos casos, el sistema de recolección de agua de lluvia es una alternativa muy importante para mejorar estas categorías, especialmente el Laboratorio de Hidráulica.

Tabla 4. Eficiencia hídrica del Laboratorio de Hidráulica

Dispositivo	Unidades	Flujo (Promedio)	Factor de Uso	Total litros/(persona/día)
		(A)	(B)	(C) = (A) X (B)
Inodoro	litros	8.44	2.64	22.28
Llave de baño	litros/min	4.00	5.43	21.72
Consumo total calculado (litros/persona.día) Suma de Columna (C) = (1)				44.00
Factores de corrección		Multiplicativo	(No hay lavadoras)	1.00
	l/lavado	Adicional CWM	(=0, no lavadoras)	0.00
	l/(persona.día)			
	l/lavado	Adicional DM	(=0, no lavadoras)	0.00
l/(persona.día)				
Contribución por uso de aguas lluvia l/(persona.día)				0.00
Contribución por reciclaje de aguas servidas l/(persona.día)				0.00
Contribución por uso de aguas subterráneas l/(persona.día)				0.00
CONSUMO DE AGUA TOTAL l/(persona.día)				44.00
USOS EXTERNOS l/(persona.día)				0.00
CONSUMO TOTAL l/(persona.día)				44.00
CATEGORÍA DE EFICIENCIA HÍDRICA DADA AL EDIFICIO				C

Dimensionamiento del sistema de aprovechamiento de agua lluvia

con el objetivo de dimensionar los componentes del sistema de captación de agua de lluvia, es importante determinar el consumo mensual de agua en ambos edificios para identificar el volumen total que se requerirá para suministrar a través del sistema de recolección de agua de lluvia los usos no potables.

Consumo mensual de agua potable en el Edificio de Clases:

Para calcular el consumo mensual, se toman en cuenta 22 días debido a que los fines de semana se descartan (sábado y domingo) porque no se consideran como días en los que hay consumo de agua en las instalaciones que forman parte del caso de estudio. El promedio de usuarios en este edificio es de 228 personas, entonces:

- Usos no potables (inodoros y urinarios) – Volumen considerado para el Sistema de recolección de aguas pluviales:

$$(6.77 + 3.36) \frac{\text{litros}}{\text{pers. día}} \times \frac{228 \text{ pers} \times 22 \text{ día}}{1000} = 50.81 \text{ m}^3$$

Consumo mensual de agua potable en el Laboratorio de Hidráulica:

El promedio de usuarios en este edificio es de 10 personas, entonces:

- Usos no potables (inodoros y urinarios) – Volumen considerado para el Sistema de recolección de aguas pluviales:

$$(22.28) \frac{\text{litros}}{\text{persona. día}} \times \frac{10 \text{ persona} \times 22 \text{ día}}{1000} = 4.90 \text{ m}^3$$

Por lo tanto, el volumen total de agua requerido durante cada mes del año para satisfacer las necesidades de los usuarios en consumo de agua no potable de los dos edificios en estudio es igual a:

$$\text{Consumo Mensual} = 50.81 + 4.90 = 55.71 \text{ m}^3$$

Consumo mensual \approx 56.00 m³

Es decir, el sistema de aprovechamiento de aguas lluvia deberá suministrar 56.00 m³ cada mes para dispositivos como urinarios, inodoros, o para usos exteriores.

Superficie de recolección de aguas lluvia

La figura 4, muestra a la izquierda, la superficie considerada para la recolección de agua lluvia del Edificio de Clases que es de 970 m² y al lado derecho la superficie de la cubierta del Laboratorio de Hidráulica que es igual a 138 m².

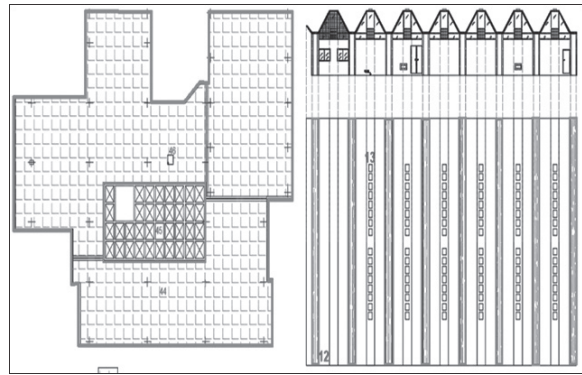


Figura 4. Cubiertas para recolección de aguas lluvia.

Sin embargo, y teniendo en cuenta el alto consumo mensual calculado, se considera como una solución adicional, la colección de agua que se infiltra en el área verde que se encuentra junto al Edificio de Clases. La figura 5, indica el área considerada como zona de infiltración de agua de lluvia (polígono amarillo) con una extensión de 4000 m², sin embargo, se utilizan 1500 m² inicialmente.

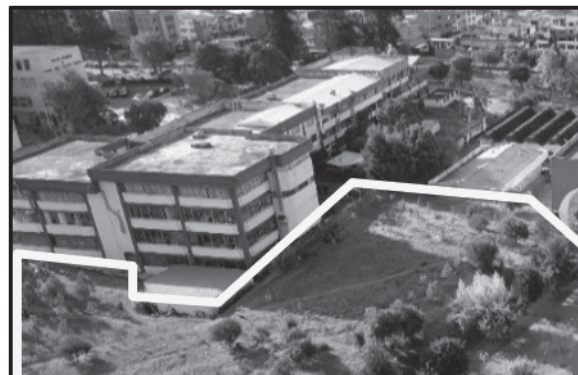
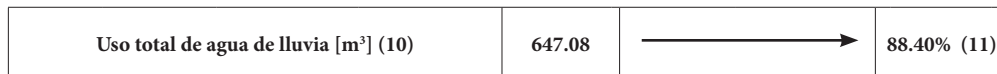


Figura 5. Zonas verdes consideradas en el diseño

Con respecto al caso de estudio, la estación pluviométrica operativa más cercana es la de Iñaquito cuyo código es el M0024 y que posee datos desde el año de 1975. Para el presente diseño se utilizan los datos pluviométricos de los últimos 10 años y se obtiene a través de la tabla 16, el promedio de intensidad de lluvias en milímetros, por mes. [8] [9] [10]

Tabla 5. Cálculo del sistema de aprovechamiento de aguas lluvia

Mes	Lluvia mensual promedio	Consumo mensual	Volumen que aporta la lluvia	Diferencia	Diferencias de cálculo	Volumen adoptado de la reserva	Volumen de agua en el reservorio (m ³)		Suministro
	(mm)	(m ³)	(m ³)	(m ³)	(m ³)	(m ³)	Inicio	Fin	(m ³)
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
Ene	113.78	56.00	188.83	132.83	132.83		15.00	15.00	0.00
Feb	113.83	56.00	188.92	132.92	132.92		15.00	15.00	0.00
Mar	173.33	56.00	287.66	231.66	231.66		15.00	15.00	0.00
Abr	148.24	56.00	246.02	190.02	190.02		15.00	15.00	0.00
May	134.72	56.00	223.58	167.58	167.58		15.00	15.00	0.00
Jun	28.56	56.00	47.40	-8.60	0.00	15.00	15.00	6.40	0.00
Jul	11.90	56.00	19.75	-36.25	0.00		6.40	0.00	29.85
Ago	9.60	56.00	15.93	-40.07	0.00		0.00	0.00	40.07
Sep	46.93	56.00	77.88	21.88	21.88		15.00	15.00	0.00
Oct	119.35	56.00	198.07	142.07	142.07		15.00	15.00	0.00
Nov	70.88	56.00	117.62	61.62	61.62		15.00	15.00	0.00
Dic	47.68	56.00	79.12	23.12	23.12		15.00	15.00	0.00
Total	1018.79	672.00							69.92

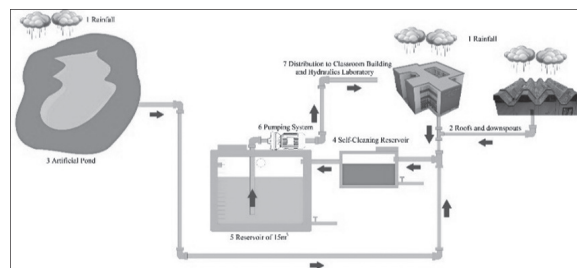


Se considera un volumen de 15.00 m³ para el reservorio que, para los cálculos realizados, permitirá utilizar el 88.40% del agua de lluvia. Se garantiza que el volumen considerado para el reservorio, puede tener agua para usos no potables en el Edificio de Clases y el Laboratorio de Hidráulica en el mes de junio, donde la lluvia no cubre la demanda de consumos mensuales de estos edificios.

Diseño de los componentes del sistema de aprovechamiento de aguas lluvia

El diseño propuesto, conserva algunos elementos como las cubiertas de los edificios, que están en buenas condiciones y son capaces de recoger el agua de lluvia requerida de acuerdo con la metodología de cálculo, tal como lo muestra la figura 6.

Figura 6. Zonas verdes consideradas en el diseño.



Diseño del estanque artificial

Para diseñar el estanque artificial es importante llevar a cabo la descomposición del volumen de agua generado por la contribución del propio estanque y de los techos considerados, tal como lo muestra la tabla 6.

Altura para el estanque artificial:

- Área de captación de agua = 1500.00 m² (aprobado)
- Coeficiente de escorrentía = 0.50 (área verde)
- Eficiencia hídrica de filtración = 0.95

Tabla 6. Contribución del estanque artificial y cubiertas

Mes	Contribución del estanque artificial	Contribución de las cubiertas	Volumen de agua utilizable
	(m ³)	(m ³)	(m ³)
Ene	81.07	107.76	188.83
Feb	81.11	107.81	188.92
Mar	123.50	164.16	287.66
Abr	105.62	140.40	246.02
May	95.99	127.59	223.58
Jun	20.35	27.05	47.40
Jul	8.48	11.27	19.75
Ago	6.84	9.09	15.93
Sep	33.43	44.44	77.88
Oct	85.04	113.03	198.07
Nov	50.50	67.12	117.62
Dic	33.97	45.15	79.12

Por lo tanto, y considerando que el volumen máximo que el estanque artificial puede contribuir al sistema de recolección de agua de lluvia es de 123.50 m³, se debe dimensionar para este parámetro.

Se establece como dato de inicio, que el estanque debe poseer una altura mínima de 55 centímetros, por lo tanto el área del estanque se obtiene a través de (1).

$$A_{ESTANQUE} = \frac{V_{ALMACENADO}}{H_{EA}} \tag{1}$$

$$A_{ESTANQUE} = \frac{123.50m^3}{0.55m}$$

$$A_{ESTANQUE} = 224.55m^2$$

Como se verifica, una de las ventajas de este componente es que no requiere grandes profundidades para cumplir su función.

Es muy importante que el estanque artificial contribuya con un alto valor estético a la zona, especialmente que esté en armonía con el entorno que existe en el área planificada para su construcción.

Su concepción arquitectónica debe buscar mejorar este espacio mediante la implementación de formas irregulares que permitan jugar con el paisaje sin alterarlo y sin caer en un exceso de simplicidad.

La propuesta es la detallada en la figura 7 y las dimensiones del estanque artificial detalladas en la figura 8, garantizan un área de 225 m².



Figura 7. Arquitectura del estanque artificial.

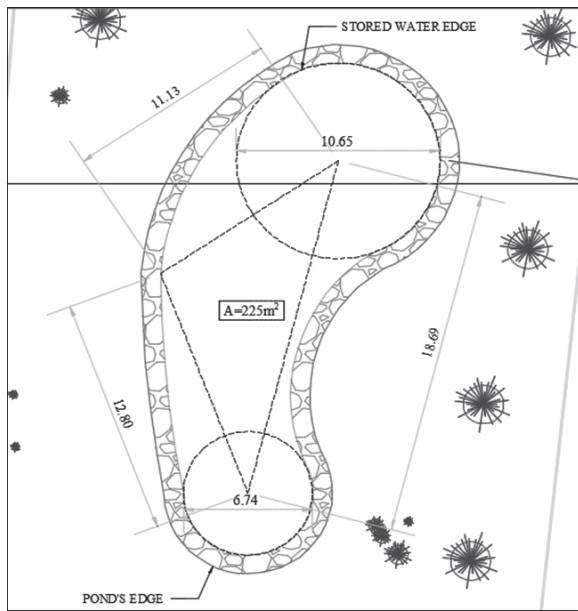


Figura 8. Zonas verdes consideradas en el diseño.

La suma de la columna tres de valores en la tabla 21 muestra la cantidad de agua que llega al estanque artificial y los techos durante el año. Considerando que la demanda de agua para usos no potables por año es de 672 m^3 , se puede establecer el volumen de reserva de este elemento a través de (2).

Volumen del estanque artificial

$$V_{EA} = A_{ESTANQUE} \times H_{ESTANQUE} \quad (2)$$

$$V_{AP} = 225 \text{ m}^2 \times 0.55 \text{ m} = 123.75 \text{ m}^3$$

Reserva del volumen de estanque artificial por año: Total de agua lluvia que ingresa al sistema, menos la demanda de consumo no potable existente.

$$V_{R(AP)} = 1690.77 \text{ m}^3 - 672.00 \text{ m}^3$$

$$V_{R(AP)} = 1018.77 \text{ m}^3/\text{year}$$

Este volumen representa la reserva de agua de lluvia del estanque artificial para hacer frente a las fluctuaciones de precipitación y consumo.

Reservorio de auto limpieza

Se estima que el volumen que para cubiertas de concreto armado se debe considerar un volumen de 0.80 litros por cada metro cuadrado para poder realizar la limpieza de esta superficie. Por lo tanto, el volumen del depósito auto limpiante es:

$$V_{SCR} = 0.80 \frac{l}{\text{m}^2} \times 1107.70 \text{ m}^2$$

$$V_{SCR} = 886.16 \text{ l}$$

$$V_{SCR} = 0.89 \text{ m}^3$$

Por lo tanto, se considera una base de 1 metro por 1 metro para este depósito. Teniendo en cuenta que debe haber al menos 30 a 40 centímetros libres entre el nivel máximo de agua y la superficie inferior de la cubierta del depósito, el siguiente valor se da como altura de acuerdo con (3).

$$H_{RA} = \text{Nivel máximo de agua} + \text{Altura libre} \quad (3)$$

$$H_{RA} = 0.89 \text{ m} + 0.40 \text{ m} = 1.29 \text{ m}$$

$$H_{RA} = 1.30 \text{ m (Asumido)}$$

Usando un espesor de pared de 20 centímetros, la figura 9 muestra el diseño final de este componente.

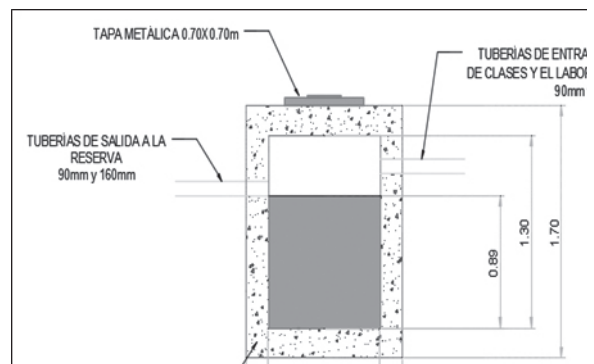


Figura 9. Reserva de auto limpieza.

Reserva de aguas lluvia

La sección circular, admite una sola malla de acero que se puede instalar a lo largo del perímetro ya que esta sección es continua y no tiene esquinas. Además, es más adecuado para actividades de limpieza y mantenimiento. Por este motivo, se adoptan las siguientes dimensiones internas para almacenar un volumen de aguas lluvia de 15 m³:

- Sección: circular
- Radio = 1.70 m
- Nivel máximo de agua de lluvia = 1,65 m

Sin embargo, es importante agregar alturas de seguridad entre el borde inferior de la losa superior del tanque y el nivel máximo de agua de lluvia. Por lo tanto, su altura final se calcula con (4).

$$H_R = \text{Nivel máximo de agua} + \text{Altura libre} + 2(\text{espesor de pared})$$

$$H_R = 1.65 + 0.40 + 2 \times (0.20) \quad (4)$$

$$H_R = 2.45\text{m}$$

Las figuras 10 y 11, respectivamente muestran el diseño en vista en planta y vista en elevación del tanque de reserva para el sistema de recolección de agua de lluvia.

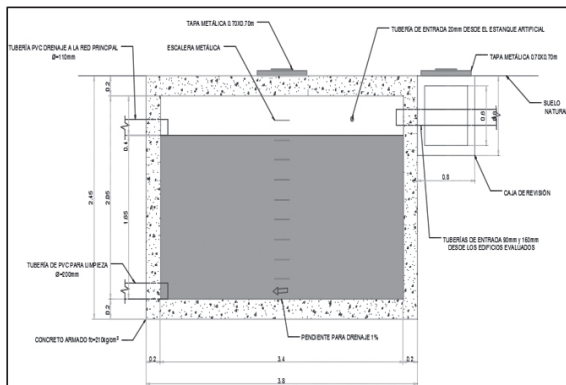


Figura 10. Vista en elevación del reservorio.

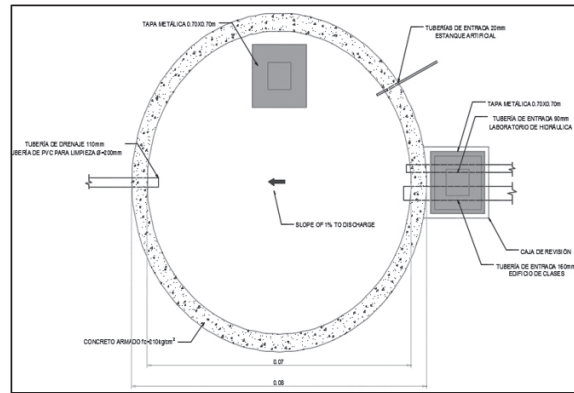


Figura 11. Vista en planta del reservorio.

Sistema de bombeo

Para el cálculo del sistema de bombeo, se realizan dos procedimientos. El primero de ellos, las pérdidas de agua son descartadas por la tubería y los accesorios donde se estima la instalación de una tubería de PVC de 32 mm de diámetro nominal.

El segundo proceso considera el diseño de un sistema de bombeo teniendo en cuenta las pérdidas por tubería y accesorios instalados en el sistema con una tubería de acero galvanizado de 32 mm de diámetro. En ambos casos, se determina la potencia de la bomba. El caudal de bombeo se calcula por segundo.

Flujo volumétrico requerido por mes = 61.0 m³

$$61.0 \frac{\text{m}^3}{\text{mes}} \times \frac{1 \text{ mes}}{22 \text{ días}} \times \frac{1 \text{ día}}{14 \text{ hora}} \times \frac{1 \text{ hora}}{3600 \text{ s}} = 5.5 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$Q_{\text{BOMBEO}} = 5.5 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

1. Bombas con tuberías de pvc (pérdida de carga descartada)

- Altura total de impulsión (H) = 17.38 m (al nivel donde se instala el reservorio en la cubierta)

- Densidad del agua = 1000 kg/m³
- Fuerza de gravedad = 9.81 m/s²

La potencia de la bomba se calcula aplicando (5).

$$P = \rho \times g \times H \times Q \quad (5)$$

$$P = 1000 \frac{kg}{m^3} \times 9.81 \frac{m}{s^2} \times 17.38m \times 5.5 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s}$$

$$P = 9.38 \frac{Nm}{s} \approx 10W = \mathbf{0.013HP}$$

La potencia requerida para la bomba es de solo 0.013 HP.

2. Bombas con tuberías de acero galvanizado (se considera la pérdida de carga)

- Viscosidad = 0.001003 kg/ms (según la temperatura asumida)
- Material = Acero comercial
- Diámetro de tubería = 32mm (nominal); 28.8mm (interno)
- Longitud de tubería = 50.0 m
- Caudal de bombeo (Q) = 5.5 x 10⁻⁵ m³/s
- Altura total de impulsión (H) = 17.38 m
- Fuerza de gravedad = 9.81 m/s²

La velocidad del flujo en el interior de la tubería se calcula con (6).

$$S = \frac{Q}{A} \quad (6)$$

$$S = \frac{Q}{\pi \times \frac{D^2}{4}}$$

$$S = \frac{5.5 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s}}{\pi \times \frac{(0.0288m)^2}{4}}$$

$$s = \mathbf{0.084m/s}$$

El cálculo de las pérdidas de carga por diferentes factores que se dan en el sistema de bombeo se enlistan a continuación:

- Pérdidas de carga por fricción entre paredes de tubería y fluido: $h_f = 0.019$ m.
- Pérdida de carga debido a estrechamiento de tubería: $h_N = 0.00018$ m.
- Pérdida de carga debido a ensanchamiento de tubería: $h_B = 0.00036$ m.
- Pérdidas de carga debido al uso de accesorios: $h_a = 0.00311$ m.

La suma de todas las pérdidas calculadas será el valor determinado para las pérdidas hidráulicas de este sistema través de (7).

$$h_T = h_f + h_N + h_B + h_a \quad (7)$$

$$h_T = 0.019m + 1.80 \times 10^{-4}m + 3.6 \times 10^{-4}m + 3.11 \times 10^{-3}m$$

$$h_T = 0.02265m$$

$$h_T = \mathbf{0.03m}$$

Como se aprecia, la pérdida de carga en el sistema es mínima. La altura dinámica según Bernoulli tiene un resultado igual a 19.16 m para los datos considerados en este proceso de cálculo. Por lo tanto, la potencia final de las bombas se calcula aplicando (5).

$$P = 1000 \frac{kg}{m^3} \times 9.81 \frac{m}{s^2} \times 19.16m \times 5.5 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s}$$

$$P = 10.33 \frac{Nm}{s} = 10.33W = \mathbf{0.014HP}$$

No es necesario repetir el proceso de cálculo para el Laboratorio de Hidráulica porque la altura de bombeo es menor y, por lo tanto, el resultado de la potencia de la bomba también será menor. Es suficiente considerar dos bombas de 0.5 HP para cada edificio.

Conclusiones

este documento es una referencia a nivel nacional, de la metodología de cálculo aplicada sobre la base de estudios internacionales, para la determinación de la eficiencia hídrica en edificios no residenciales. La certificación y el etiquetado sugeridos deben considerarse como una contribución al desarrollo de un sistema científico que permita calificar los edificios y convertirlos en proyectos sostenibles para el desarrollo de Ecuador. El ejemplo de un cambio amistoso con el ambiente debería comenzar en casa, especialmente en el país que representa el centro de nuestro hermoso planeta.

El presente trabajo de investigación sugiere una solución integral para mejorar la eficiencia hídrica del Edificio de Clases y el Laboratorio de Hidráulica ubicado en la Facultad de Ingeniería, mediante la evaluación de sus sistemas hidrosanitarios, la certificación y el etiquetado de su rendimiento hídrico. El Edificio de Clases obtiene una categoría "A+" y el Laboratorio de Hidráulica, una categoría equivalente a "C", de acuerdo con el sistema de certificación propuesto con respecto a la dotación de agua establecida por el estándar ecuatoriano para edificios universitarios. Es muy satisfactorio poder llegar a estas categorías, teniendo en cuenta que los edificios evaluados son bastante antiguos.

Se concluye que, matemáticamente, la eficiencia hídrica de un edificio no residencial no solo está relacionada con el número de usuarios, sino también con la eficiencia de cada dispositivo sanitario que se instala. Como fue posible verificar, el Laboratorio de Hidráulica tiene dispositivos sanitarios antiguos y aunque solo hay 10 usuarios, su eficiencia de agua en comparación con el Edificio de Clases es menor. En ambos casos, el uso de recursos hídricos alternativos mejora sustancialmente su rendimiento hídrico, lo que resulta en la reducción del consumo de agua potable y la facturación asociada con el gasto de este recurso.

Se verifica que la reducción del consumo de agua potable se obtiene mediante el diseño de un sistema de uso de agua de lluvia que se compone de diferentes elementos hidráulicos y arquitectóni-

cos. Su efecto sobre las instalaciones sanitarias actuales, produce una reducción del 31% del consumo de agua potable, que es suministrada por el sistema de uso de agua de lluvia para usos no potables (urinarios e inodoros). Esta reducción en el consumo de agua potable se traduce en un beneficio en la facturación y el gasto de agua del 45,04% debido a la demanda de ambos edificios.

El volumen de agua que se recolecta a través de los techos y las áreas verdes que están al lado de los edificios de estudio, reduce considerablemente la posibilidad de inundaciones. El sistema de recolección de agua de lluvia considera un estanque artificial de 123.75 m³ y un reservorio de 15 m³ para almacenar temporalmente el agua de lluvia antes de conducirla a través de las redes hacia las instalaciones sanitarias de los edificios. Este sistema alivia y reduce el trabajo de los sistemas de drenaje actuales que, debido a su edad, colapsan cuando las lluvias son de alta intensidad.

Reconocimiento

La elaboración de este artículo fue posible gracias a la Universidad Central del Ecuador, que permitió analizar el caso de estudio en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática.

El desarrollo de este artículo fue posible gracias a la ANQIP - Associação Nacional para a Qualidade nas Instalações Prediais que con su metodología de cálculo para la eficiencia hídrica de edificios, hizo posible aplicar esta técnica al caso de estudio localizado en Ecuador. Al profesor Armando Silva y a Carla Rodrigues.

Valenzuela, C. agradece a la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación del Ecuador (Senescyt), por la concesión de la beca de maestría a través del Contrato No. AR2Q-000482-2016, para realizar estos estudios en el Instituto Politécnico de Leiria.

REFERENCIAS

- [1] United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). (2015). Water for a Sustainable World - The United Nations World Water Development Report 2015. Paris. Obtenido de: <http://unesdoc.unesco.org/images/0023/002318/231823E.pdf>
- [2] Ortiz J. Acceso y consumo de agua potable para todos. El Universo. 2018/20/6. Accessed 20 June 2018. Available from: <https://www.eluniverso.com/opinion/2018/06/20/nota/6819557/acceso-consumo-agua-potable-todos>
- [3] Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO. (2002). Crops and Drops making the best use of water for agriculture. Rome.
- [4] Comisión Económica para América Latina y el Caribe - CEPAL. (2012). Diagnóstico de la estadística del agua en Ecuador. Obtenido de: <http://aplicaciones.senagua.gob.ec/servicios/descargas/archivos/download/Diagnostico%20de%20las%20Estadisticas%20del%20Agua%20Producto%20IIIc%202012-2.pdf>
- [5] Norma Ecuatoriana de la Construcción. (2011). Norma Hidrosanitaria NHE - NEC 11. Quito. Obtenido de: <https://inmobiliariadja.files.wordpress.com/2016/09/nec2011-cap-16-norma-hidrosanitaria-nhe-agua-021412.pdf>
- [6] Silva-Afonso, A. & Pimentel-Rodrigues, C. (2011). The importance of water efficiency in buildings in Mediterranean countries. The Portuguese experience. *International Journal Of Systems Applications, Engineering & Development*, 5(1), 17–24.
- [7] Innoquest Inc. (2018). Innoquest Inc. Obtenido de: <https://innoquestinc.com/product/spoton-irrigation-flow-meter>
- [8] Secretaría Nacional del Agua - Senagua. (2011). Estado situacional del Ecuador en cuanto al manejo de los recursos hídricos. Quito. Obtenido de: https://www.cepal.org/deype/noticias/noticias/1/44071/SENAGUA_oferta-demanda.pdf
- [9] Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2018). INAMHI. Obtenido de: <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/red-de-estaciones-meteorologicas/>
- [10] Associação Nacional para a Qualidade nas Instalações Prediais - ANQIP. (2011). ANQIP. Obtenido de: http://www.anqip.pt/images/stories/Folheto_ANQIP_AUDITAQUA_3.pdf

Uso de Isotopos Estables para el Estudio de las Fuentes de Agua Superficiales en el Ecuador y sus Implicaciones para la Gestión de los Recursos Hídricos

Lima P.*

*Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería Ciencias Físicas y Matemática, Instituto de Investigación y Posgrado, Quito, Ecuador
e-mail: prlima@uce.edu.ec

Información del artículo
Recibido: julio 2018
Aceptado: septiembre 2018

Resumen

Esta investigación está enfocada en el análisis de los procesos de lluvia-escorrentía en las Montañas del Ecuador con énfasis en las implicaciones de la gestión de recursos hídricos mediante el uso de los valores de los isotopos estables de hidrogeno (δD) y oxígeno ($\delta 18O$). La pregunta que guía este estudio es ¿Cómo pueden los valores de δD y $\delta 18O$ variar en procesos hidrológicos tales como lluvia-escorrentía en los proyectos hidráulicos? En primer lugar, se realiza un análisis de la variación espacial y temporal de la composición de isotopos en la lluvia en el Ecuador. Adicionalmente, se comparan estas variaciones con los datos tomados de aguas superficiales durante diciembre 2016 y abril 2017 en ríos y glaciares ecuatorianos. Los resultados del análisis de datos de las precipitaciones muestran que los isotopos estables varían especialmente con la altitud y estacionalmente. En el caso de las aguas superficiales a pesar que es más difícil definir cuáles son sus principales fuentes, la composición de isotopos estables exponen la misma variación de las aguas lluvias. Esta dependencia muestra el gran potencial que tienen los isotopos estables para representar y estudiar las fuentes de aguas superficiales en el Ecuador.

Palabras clave: Isotopos estables, lluvia, escorrentía, cuenca

Abstract

This study is focused on an investigation of rainfall and runoff processes in the Ecuadorian Andean Mountains with emphasis on implications to the management of hydraulic resources using of δD and $\delta 18O$ values. The following question have guided this project: (1) How do the δD and $\delta 18O$ values vary in runoff-rainfall processes in two adjacent watersheds that have different rainfall patterns? By answering this question, a broader question of how can hydrogen and oxygen isotope compositions be used to improve understanding of runoff sources in mountain streams and their contribution to hydraulic resource projects? First, I analyzed the temporal and spatial variation of isotope composition of rainfall data in Ecuador. I compared the previous data with surface water in streams and glaciers during two different seasons in December 2016 and April 2017. The results of this analysis exposed that rainfall isotope values are more affected by altitude and seasonal factors than amount effect factors. Although in hydrologic studies, surface water is difficult to understand, in this case, the results in runoff during both months expose the same variation of the rainfall values. This dependency exposes the high potential that stables isotopes have to represent and understand the sources of surface water in Ecuador.

Key Words: Stable Isotopes, streams, rainfall, runoff, watershed

Introducción

Las interacciones del agua en una cuenca producen diferente composición de isótopos estables de oxígeno y el hidrógeno debido a los cambios de las fases del agua dentro del ciclo hidrológico [1]. Los isótopos estables tienen como característica principal que el número de masa atómica es diferente en estos átomos debido al cambio del número de neutrones. Esta diferencia en el número de neutrones no afecta en las propiedades químicas del elemento y sus compuestos, sin embargo, la diferencia de masa puede afectar sutilmente en diferencias químicas y físicas en los procesos que resultan en fraccionamiento isotópico [2]. Existen dos isótopos estables de hidrógeno que son protio (^1H), y deuterio (D), y existen tres isótopos estables de oxígeno (^{16}O , ^{17}O y ^{18}O) dando la posibilidad a la formación a nueve posibles isotopólogos de agua. La abundancia en la tierra del isótopo ^{18}O es de 0.20004% mientras que la del isótopo ^{16}O es del 99.7621% [2].

Las Montañas Ecuatorianas (ME) contienen fuentes importantes de aguas superficiales las mismas que dependen de procesos hidrológicos que resultan en infiltración, precipitación, evaporación y desglaciación (Figura 1). Del mismo modo, estas fuentes influyen en otros mecanismos geomorfológicos, ecológicos, químicos, y socio-económicos aguas abajo [3].

La mayor parte de proyectos hidráulicos en el Ecuador dependen altamente de los procesos hidrológicos en las montañas (Figura 1). Por ejemplo, el Proyecto Hidroeléctrico Manduriacu tiene el 39% de la superficie de su cuenca en zonas más altas de los 3000 m.s.n.m. mientras que el Proyecto Coca Codo Sinclair tiene un 54%. El objeto de este estudio es analizar las diferentes composiciones de los isótopos en los procesos de lluvia y escorrentía con el fin de usarlos en la gestión de los recursos hídricos.

Generalmente el entendimiento de los procesos hidrológicos es muy complejo debido a factores globales y locales que pueden influir. Entre los factores globales que afectan las lluvias en el Ecuador se cuenta con mecanismos climáticos como: la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP), los efectos del Niño y la Niña (ENSO), y la zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) [4]–[6]. Los factores locales relevantes son la orografía, e interacciones biogeoquímicas. Adicionalmente, a esta complejidad se le

suma la problemática del déficit de estaciones hidrometeorológicas en zonas del páramo debido a su difícil acceso.

En este estudio se analiza la variación de las lluvias en el Ecuador usando los datos de la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA), se comparan dichos valores con la variación de los isótopos en aguas superficiales en el Ecuador durante el mes de diciembre 2016 y abril 2017. Este análisis de la composición de los isótopos de hidrógeno (δD) y de oxígeno ($\delta^{18}\text{O}$) se basa en la consideración de los principales factores que controlan la composición isotópica de la precipitación que son: temperatura, el efecto continental o de distancia, el efecto de la altitud, el efecto de la latitud, el efecto de la cantidad de lluvia y el efecto estacional.

Metodología

Con el fin de entender la distribución espacial de las lluvias en el Ecuador, en este estudio se usan las medias mensuales de 1712 valores de δD y $\delta^{18}\text{O}$ publicados en la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA) que cubren 24 estaciones en Ecuador. Además, para este análisis con el fin de analizar la influencia de las lluvias en la escorrentía, se complementan 56 resultados de isótopos estables obtenidos de 28 muestras de ríos en el Ecuador durante diciembre 2016 y abril 2017 (Tabla 1) la ubicación de estas muestras se exponen en la Figura 1.

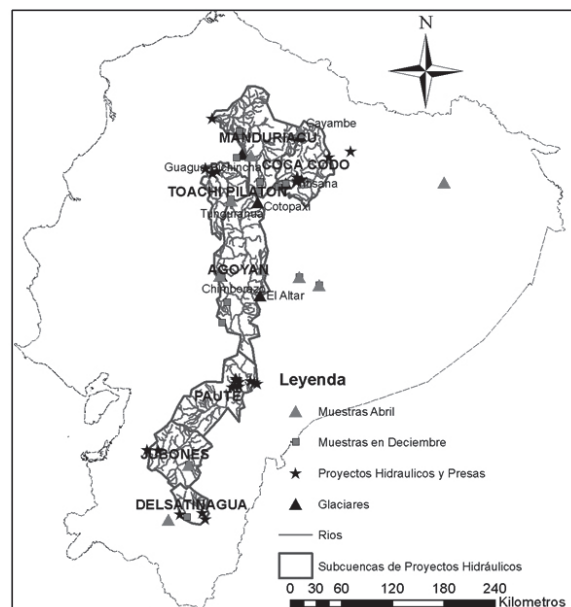


Figura 1. Localización de puntos de muestreo, proyectos hidráulicos y sus subcuencas.

Las muestras de agua superficiales fueron obtenidas en los lugares descritos en la Tabla 1, recolectadas en botellas de plástico de alta densidad, fueron herméticamente tapadas y selladas. Las muestras de glaciación fueron recolectadas en envases de plástico de alta densidad pasando naturalmente a la fase líquida debido al aumento de temperatura. El análisis de dichas muestras se lo realizó en el Centro de Isotopos Estables (CSI) de la Universidad de Nuevo México. La ubicación de los proyectos hidroeléctricos fue proporcionada por la Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC).

Los datos de precipitación se encuentran disponibles libremente en la página web de la IAEA [7]. Los resultados obtenidos en aguas superficiales y glaciares en este estudio se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1 Ubicación y valores de la composición de isotopos de oxígeno e hidrogeno de las muestras de agua en aguas superficiales durante diciembre 2016 y abril 2017

Descripción de la muestra	Elevación (m)	$\delta^{18}O$ (‰)	δD (‰)
Muestreo en diciembre 2016			
ILLINIZA NORTE	5116	-10,24	-68,35
CAYAMBE NORTE	5773	-13,45	-92,19
ANTISANA	5712	-11,95	-82,61
CUMBRE VEINTIMILLA	6234	-12,66	-86,9
CUMBRE MAXIMA	6271	-12,02	-85,59
LOJA	2180	-6,97	-39,09
OÑA	2250	-8,5	-52,85
RIO BLANCO-LLOA	2370	-10,69	-70,56
CASCADA MINDO VIA CALACALI	1315	-8,09	-51,99
RIO MINDO	1340	-9,11	-58,8
ANTISANA	3870	-14,29	-100,99
COTOPAXI P14	3195	-11,31	-77,37
PITA	3580	-11,48	-79,88
BOBONAZA	590	-5,46	-28,87
QUEBRADA ISHIQU-EYACU	3750	-12,58	-87,8
LAGUNA COLTA	3250	-3,31	-38,34
RIO PUYO	970	-5,62	-29,36
CAYAMBE	5773	-12,58	-87,8
CAYAMBE	5773	-14,69	-102,13

Muestreo en abril 2017

ILLINIZA NORTE	5116	-10,24	-68,35
CAYAMBE NORTE	5773	-13,45	-92,19
ANTISANA	5712	-11,95	-82,61
CUMBRE VEINTIMILLA	6234	-12,66	-86,9
CUMBRE MAXIMA	6271	-12,02	-85,59
LOJA	2180	-6,97	-39,09
OÑA	2250	-8,5	-52,85
RIO BLANCO-LLOA	2370	-10,69	-70,56
CASCADA MINDO VIA CALACALI	1315	-8,09	-51,99

Isotopos Estables en Precipitación

Existen un sin número de factores que gobiernan la composición de agua meteórica. Entre los procesos hidrológicos más importantes que contribuyen a los proyectos hidráulicos están la precipitación, escorrentía, infiltración, y desglaciación. En este estudio se analizará los procesos de precipitación, escorrentía y desglaciación.

La gráfica que relaciona δD y $\delta^{18}O$ de las aguas de origen meteórica, es decir las aguas que se originan de la atmósfera, presenta una relación lineal con una pendiente de 8. Este no es el caso de todas las aguas superficiales, ya que las fuentes de agua que han experimentado procesos de evaporación, como es el caso de los embalses, exponen altos valores de $\delta^{18}O$ [1], [2]. Al realizar una regresión de ambos datos se obtiene que la mayoría de las aguas meteóricas se alinean con la línea meteórica global:

$$\delta_D = 8.0\delta_{18}O + 10 \quad (1)$$

$$\delta_D = 8.0\delta_{18}O + 10.2 \quad (2)$$

Isotopos Estables en Aguas superficiales

Los resultados obtenidos en la composición de los isotopos estables de aguas superficiales están alineados con el agua meteórica (Figura 2). El caso de la Laguna de Colta presenta un valor alto de $\delta^{18}O$ exponiendo los procesos de evaporación a través del fraccionamiento isotópico entre las fases del aire y la laguna que es típico en embalses con tiempos de retención elevados.

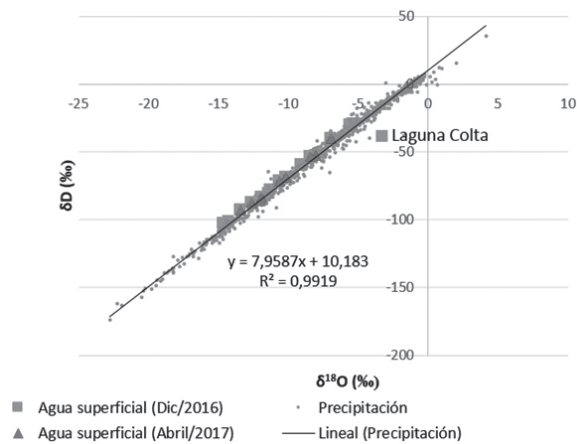


Figura 2. relación de δD y δ¹⁸O de la precipitación y aguas superficiales en el Ecuador

Principales Factores que Controlan la Composición Isotópica de la Precipitación en el Ecuador

Entre los principales factores que pueden afectar la variación isotópica en la precipitación son el cambio estacional, efecto espacial, efecto de la cantidad de lluvias, temperatura, distancia continental, y altitud. En este documento se analizan estos efectos y se destacan los más importantes.

Las aguas naturales están sometidas principalmente al proceso de evaporación. Este proceso cinético se destaca en las aguas mostrando un gran fraccionamiento de los isotopos estables encontrándose principalmente en las nubes, embalses, suelo, y respiración en plantas y animales. La condensación, por otro lado, es un proceso de equilibrio que depende solamente de la temperatura. Es importante reconocer los efectos isotópicos de estos procesos en las masas de aire y de los reservorios para mejorar nuestro entendimiento acerca del ciclo hidrológico [2].

La figura 3 muestra cómo estos factores que intervienen en el ciclo hidrológico interactúan con dos proyectos hidráulicos. En este caso, se expone que la variación anual de los isotopos estables en los procesos de lluvia en el Ecuador varía principalmente con la altitud. Adicionalmente,

en este mismo perfil es posible identificar dos proyectos hidroeléctricos que dependen de la escorrentía proveniente de las montañas andinas que son Manduriacu en la parte del drenaje hacia el Océano Pacífico y Coca Codo Sinclair que drena hacia el Amazonas.

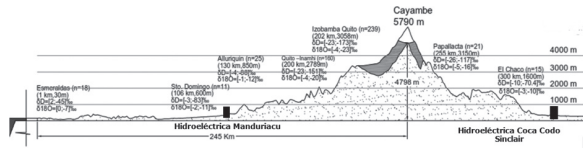


Figura 3. Variación anual de los isotopos estables en un corte de las montañas del Ecuador y los proyectos hidráulicos a los que influyen.

Efecto de la temperatura

En el Ecuador especialmente existe una gran dependencia de la temperatura con la altitud debido a los drásticos cambios de gradientes desde la parte costera hasta la cordillera andina y luego hacia la Amazonía. Estos cambios orográficos hacen que los valores de δD y δ¹⁸O en precipitaciones varían también fuertemente con la temperatura [8]. Este efecto no solamente es evidente en los valores de la composición isotópica de las precipitaciones sino también en aguas superficiales (Figura 4 y Tabla 1 Tabla 2).

Tabla 2 Datos de temperatura e isotopos de oxígeno en aguas superficiales durante diciembre 2016

DESCRIPCION	Temperatura (° C)	δ ¹⁸ O (‰)	δD (‰)
RIO BLANCO-LLOA	15,2	-10,7	-70,6
RIO MINDO	18,4	-9,1	-58,8
ANTISANA	9,3	-14,3	-101,0
COTOPAXI P14	15	-11,3	-77,4
PITA	11,1	-11,5	-79,9
BOBONAZA	24	-5,5	-28,9
QUEBRADA ISHIQU-EYACU	9,4	-12,6	-87,8

Las correlaciones entre δD, δ¹⁸O y la temperatura de las aguas superficiales en el Ecuador son:

$$\delta^{18}O = 0.51 T_{rio} - 18.1 \quad (3)$$

$$\delta D = 4.2 T_{rio} - 133.5 \quad (4)$$

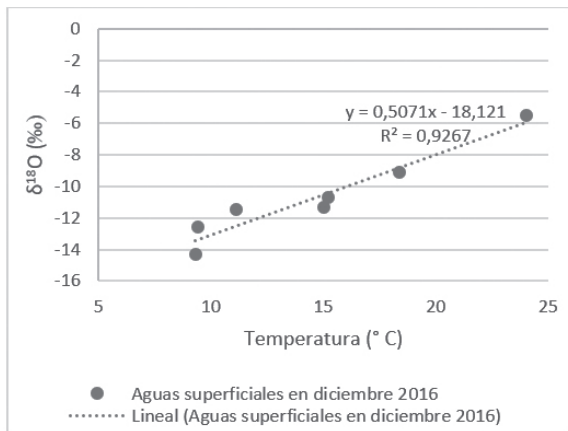


Figura 4. Variación de los isotopos de $\delta^{18}O$ en función de la temperatura en aguas superficiales del Ecuador.

Efecto continental

La precipitación se vuelve más liviana o con más déficit de isotopos estables de hidrógeno y oxígeno cuanto más se aleja de su fuente [2]. En el caso del Ecuador la principal fuente de estos isotopos es el Océano Pacífico. Por esta razón, en el presente análisis se realiza una comparación de las tendencias de valores de isotopos de las estaciones ubicadas en las cuencas que drenan hacia el Pacífico y la Amazonía considerando la distancia desde las estaciones hasta el Océano Pacífico.

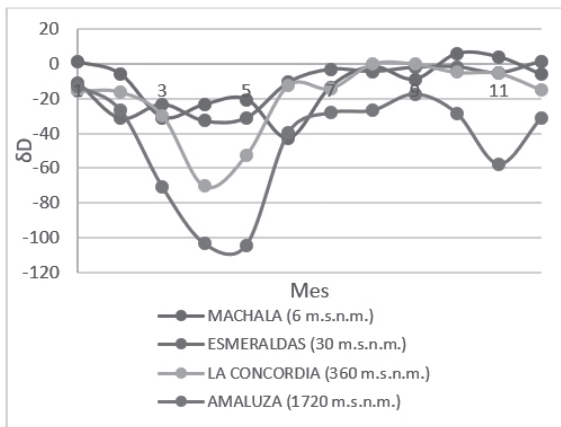


Figura 5. Variación del deuterio en lluvias en estaciones ubicadas en la zona de drenaje hacia el Pacífico. La más cercana es la de Machala a 0 km de distancia, la más lejana es Amaluza a 142 Km de la costa.

Analizando la figura 5 se puede evidenciar el efecto de la distancia en la composición isotópica de las aguas lluvias en la cuenca que drena hacia el Océano Pacífico. Por otro lado, en la figura 6, la zona que drena a la Amazonía presenta un comportamiento inverso. Esta diferencia muestra que el efecto de la distancia es menos influyente en la composición isotópica que el efecto de la altitud.

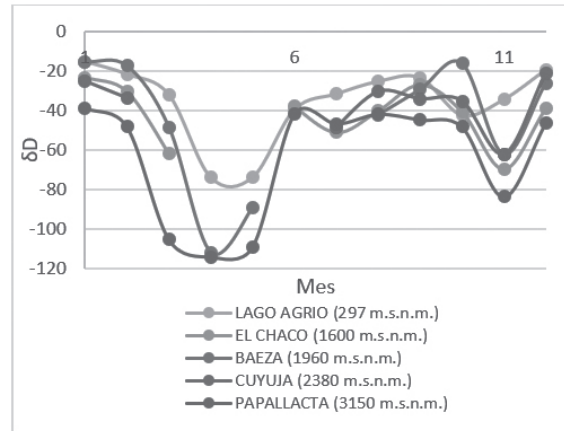


Figura 6. Variación del deuterio en lluvias en estaciones ubicadas en la zona de drenaje hacia la Amazonía. La más cercana al Océano Pacífico es la de Papallacta que se encuentra a 218 km de distancia, la más lejana es la de Lago Agrio a 350 km.

Efecto de la altitud

Este efecto hace que la composición de isotopos estables de oxígeno e hidrógeno en el agua lluvia disminuya con la altura. El efecto de la altitud en el Ecuador es el más influyente sobre la composición isotópica de las lluvias y escorrentía. La altitud varía desde una elevación de 0 m.s.n.m. en la Costa hasta los 6263.5 m.s.n.m en el Chimborazo en solamente una distancia de aproximadamente 220 km. Luego, la altitud nuevamente disminuye desde la cordillera andina hasta la región amazónica desde los 6263.5 m.s.n.m. hasta los 200 m.s.n.m. en la frontera con Perú.

La composición de isotopos estables de oxígeno en la precipitación varía linealmente con la altitud [2]. Sharp (2017) explica que el gradiente de $-0.26 \text{ ‰}/100\text{m}$ caracteriza este efecto de la mayoría de lugares en el mundo que alcancen los 5000 m. Sin embargo, en el caso del Ecuador este gradiente alcanza el valor de $-2.8 \text{ ‰}/100\text{m}$ en diciembre y $-3.5 \text{ ‰}/100\text{m}$ en mayo (Figura 7).

Debido a estos altos gradientes, el efecto de la altitud no solamente se ve reflejado en la precipitación pues las aguas superficiales también presentan gradientes similares a las de las aguas lluvias (Figura 7). Otro punto importante es que las muestras tomadas de fuentes de origen glaciar en el tope de las montañas presentan valores que no corresponden a la tendencia normal de las lluvias evidenciando la complejidad en la representación de los procesos hidrológicos usando isótopos estables en glaciares. Además, comparando estos puntos con las muestras de aguas en ríos de alta montaña muestran que la principal fuente de estos ríos del páramo no depende principalmente de la desglaciación.

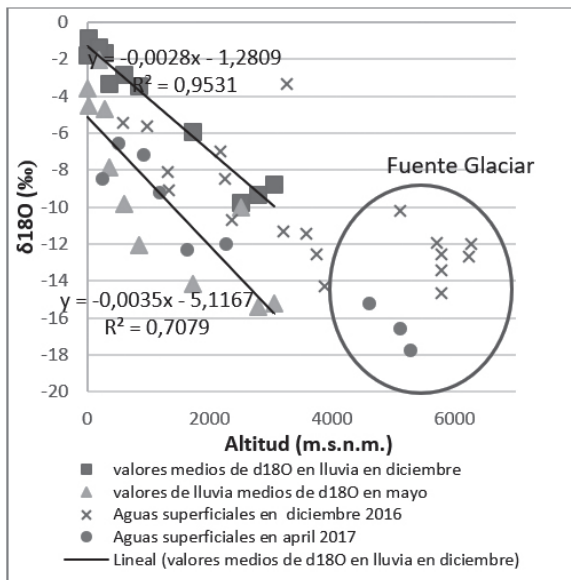


Figura 7. Variación de la composición de isótopos de oxígeno en lluvia y escorrentía en función de la altitud.

Efecto de la cantidad de precipitación

El efecto de la cantidad de lluvia tiene una correlación negativa con los valores medios mensuales de la composición de isótopos estables de oxígeno e hidrógeno [2]. Según indica toda la literatura existente se ha establecido que mientras más cantidad de lluvia ocurre, menor es el valor de delta [2], [9], [10].

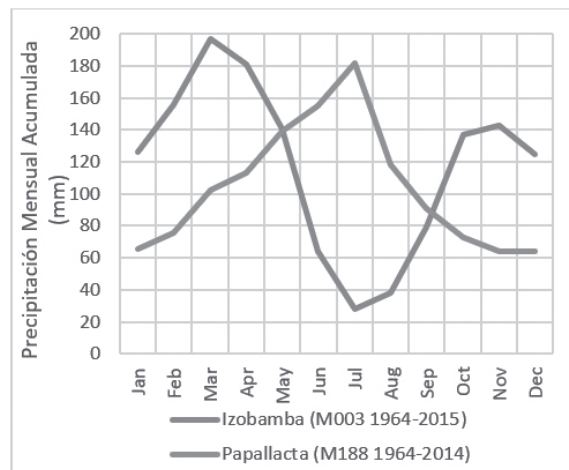


Figura 8. Variación de la cantidad de dos diferentes estaciones del Ecuador localizadas en la zona de drenaje del Pacífico (Izobamba) y Amazonía (Papallacta)

Aunque, prácticamente el efecto de la cantidad de lluvia se evidencia en la mayoría de previos estudios relacionados con hidrología isotópica, en el caso del Ecuador este efecto presenta excepciones. En las figuras 8 y 9 se representan dos estaciones que tienen variación estacional totalmente diferente. La estación de Izobamba ubicada en la cuenca que drena hacia el Pacífico tiene variación bimodal, por otro lado, la estación de Papallacta que drena hacia la cuenca de la Amazonía tiene una variación unimodal (Figura 8). La diferencia en la variación estacional en ambas estaciones evidencia la diferencia de las cantidades de lluvia durante el año en el Ecuador en ambas cuencas. Contrario a la propiedad de los isótopos relacionado con la cantidad de lluvia, estas estaciones presentan la misma tendencia de los valores de la composición de isótopos estables (Figura 9).

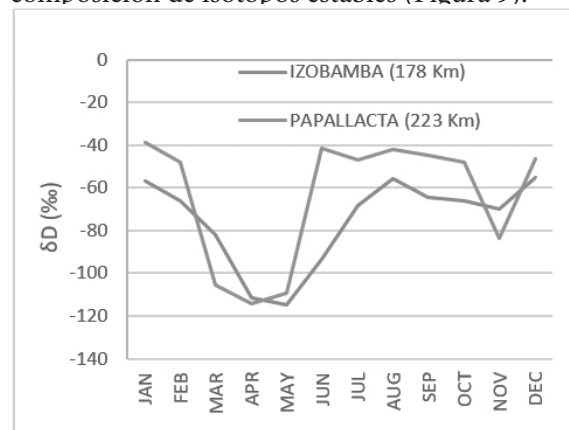


Figura 9. Variación de la composición de deuterio en la lluvia

Efecto de la variación estacional

Analizando la variación mensual de la composición de isótopos estables en la precipitación se puede observar que el efecto de la altura afecta mayormente durante los meses de marzo, abril y mayo, esto puede ser debido a efectos globales sobre el clima como son los vientos alisios que son un efecto de la ZCIT (Figura 5, Figura 6, y Figura 9).

El resto del año esta variación de isótopos tiene un rango menor evidenciando que puede existir un tipo de precipitaciones que dependen de efectos convectivos en las nubes.

El estudio detallado de estos procesos va fuera del alcance de este documento por lo que se requerirá estudios más profundos para lograr un mejor entendimiento de los efectos climáticos en el Ecuador.

Conclusiones

El presente estudio muestra que los efectos predominantes en la composición de aguas lluvias en el Ecuador son el efecto de la altitud y la variación estacional (Figura 10).

Adicionalmente, esta variación de la composición de isótopos estables δD y $\delta^{18}O$ en las aguas lluvias afecta directamente a las composiciones de las aguas superficiales mostrando que la influencia de las lluvias en los proyectos hidráulicos de la zona es predominante en comparación a otros procesos hidrológicos.

Los gradientes de la composición de isótopos estables son similares para los procesos de lluvia-escorrentía y alcanzan valores excepcionales de -3.5 ‰.

La influencia de otros factores globales como el ZCIT deberán ser considerados para el estudio hidrológico en el Ecuador usando isótopos estables.

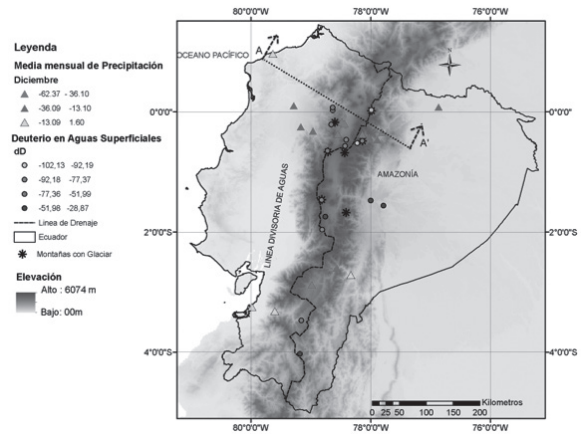


Figura 11. Ubicación y variación de la composición de deuterio en aguas lluvias y superficiales en el Ecuador

Referencias

- [1] J. R. Gat, «Oxygen and hydrogen isotopes in the hydrologic cycle», Annual Review of Earth and Planetary Sciences, vol. 24, n.o 1, pp. 225–262, 1996.
- [2] Z. Sharp, «Principles of stable isotope geochemistry», 2017.
- [3] P. Lima, M. Stone, E. Ortiz, y B. Andrew, «Analysis rainfall trends in ecuadorian andean mountains over 3000 mand their effects in hydropower projects», Congreso REDU, pp. 12–16, oct. 2018.
- [4] Y. Hu, D. Li, y J. Liu, «Abrupt seasonal variation of the ITCZ and the Hadley circulation», Geophysical Research Letters, vol. 34, n.o 18, sep. 2007.
- [5] M. C. Molles, y C. N. Dahm, «A Perspective on El Niño and La Niña: Global Implications for Stream Ecology», Journal of the North American Benthological Society, vol. 9, n.o 1, pp. 68–76, mar. 1990.
- [6] M. Newman et al., «The Pacific Decadal Oscillation, Revisited», Journal of Climate, vol. 29, n.o 12, pp. 4399–4427, jun. 2016.

- [7] «WaterIsotopes.org». [En línea]. Disponible en: <http://wateriso.utah.edu/waterisotopes/>. [Accedido: 20-jul-2018].
- [8] W. Dansgaard, «Stable isotopes in precipitation», *Tellus*, vol. 16, n.o 4, pp. 436-468, 1964.
- [9] J. Gat, *Isotope hydrology: a study of the water cycle*, 1 online resource (vii, 189 pages) : illustrations. vols. London: : Imperial College Press, 2010.
- [10] J. Galewsky, H. C. Steen-Larsen, R. D. Field, J. Worden, C. Risi, y M. Schneider, «Stable isotopes in atmospheric water vapor and applications to the hydrologic cycle», *Rev. Geophys.*, vol. 54, n.o 4, p. 2015RG000512, dic. 2016.

Análisis en flujo permanente de los factores que inciden en la disminución de la capacidad hidráulica de la línea de conducción del sistema La Mica-Quito Sur

Andrade Ramos Juan Martín¹, Escobar Cevallos Gilson Manuel², Paredes Méndez Diego Fernando³

¹Ingeniero Civil, independiente, 2095286-0984699448, Av. Intervalles y Jacpi
mail: juanmartin.jma@hotmail.com

²Ingeniero Civil, independiente, 022362097-0984963971, Av. Natalia Jarrín y Los Pinos
mail: gilson.escobar19@gmail.com

³Ingeniero Civil, Master of Science in Water Science and Engineering,
Docente Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática,
Jefe Unidad Diagnóstico Hidráulico EPMAPS, 0987509604, Quito-Ecuador
mail: dfparedes@uce.edu.ec

Artículo científico enviado para su revisión el 20 de julio de 2018. Este trabajo fue posible gracias al apoyo de la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento EPMAPS.
Aceptado: septiembre 2018

Resumen

El sistema “La Mica - Quito Sur” dota de agua a la zona sur de Quito, en la actualidad transporta un caudal de 1560 l/s, menor a 1750 l/s para el cual fue diseñado, esta disminución se debe a factores que generan pérdidas de energía en la línea de conducción lo que disminuye su capacidad hidráulica. Para disponer de un modelo hidráulico actualizado, se realizó una intensa actividad. Se recopiló planos y bases de datos del sistema, información que fue validada *in situ*. A continuación se construyó, calibró y validó el modelo hidráulico, obteniendo de su análisis las características hidráulicas actuales y los factores que influyen en la reducción de la capacidad hidráulica, los que se presentan en la conducción superior, resultados que permiten establecer que las pérdidas se dan por un mínimo mantenimiento en las estructuras y válvulas, pérdida de carga local en la torre de captación del embalse, posible acumulación de sedimentos, y una posible acumulación de aire en el sistema. Para establecer alternativas de solución se modelaron cinco escenarios que simulaban condiciones críticas, óptimas y medias de operación del embalse para diferentes caudales transportados, con lo que se determinaron presiones negativas que impiden el transporte del caudal máximo de diseño. De su análisis se concluyó que las alternativas de solución más viables para que a través de la tubería de conducción se transporte 1750 l/s son: el mantenimiento del sistema complementado con la modificación del perfil de la línea de conducción; o la implementación de una booster en la abscisa 2+908 de la conducción superior, con altura de bombeo de 30 mca.

Palabras clave: sistema La Mica - Quito Sur, pérdidas de energía, capacidad hidráulica, modelación hidráulica, presiones negativas.

Abstract

“La Mica - Quito Sur” System provides water to the southern area of Quito, it is currently carrying a maximum flow of 1560 l/s, less than 1750 l/s for which it was designed, this decrease is due to factors that generate energy losses in the line of conduction which decreases its hydraulics capacity. We were carried out an intense activity to get an updated hydraulic model. Plans and system databases were collected and validated *in situ*. Then the hydraulic model was built, calibrated and validated, obtaining from its analysis the current hydraulic characteristics and the factors that influence the reduction of the hydraulic capacity, the same that are presented in the superior conduction, results that allow establishing that the losses are due to: the lack of maintenance in the structures and valves, loss of local load in the reservoir collection tower, possible accumulation of sediments and possible accumulation of air in the system. To establish alternative solutions, five scenarios were modeled to simulate critical, optimal and average conditions of operation of the reservoir for different transported flows, which determined negative pressures that prevents the transport of the maximum design flow. From their analysis was concluded that the most viable solution alternatives so that 1750 l/s can be transported through the pipeline are: maintenance of the system complemented by the modification of the profile of the line of conduction; or the implementation of a booster on the abscissa 2 + 908 of the upper conduction, with pumping height of 30 m W.C.

Keywords: La Mica - Quito Sur system, energy losses, hydraulic capacity, hydraulic modeling, negative pressures.

I. Introducción

De acuerdo con la Organización de Naciones Unidas (ONU) en la Asamblea General del derecho humano al agua y al saneamiento [1] “reconoció el derecho de todos los seres humanos a tener acceso a una cantidad de agua suficiente para el uso doméstico y personal, que sea segura, aceptable, asequible y accesible físicamente”. De igual manera estipularon que “cada persona en la tierra requiere al menos 20 a 50 litros de agua potable limpia y segura al día para beber, cocinar o simplemente mantenerse limpios”.

El incremento poblacional del Distrito Metropolitano de Quito genera un aumento de la demanda de agua potable, por lo tanto, se ve la necesidad de satisfacer esta demanda futura adicional para garantizar el derecho de toda la población de acceder al servicio de agua potable. De allí que es necesario mejorar las condiciones de funcionamiento de proyectos existentes de suministro de agua. La Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS) en el Plan Maestro de Agua Potable [2] considera los principales proyectos de inversión a ejecutarse a corto y mediano plazo (2010-2019). Para La Mica - Quito Sur se proyecta un incremento de caudal de 180 l/s al caudal máximo de diseño de 1750 l/s, con lo cual se tiene una oferta de agua potable mayor a la demanda requerida por la población futura.

El sistema de agua potable La Mica - Quito Sur transporta agua cruda desde el embalse La Mica hasta la planta de tratamiento El Troje ubicada en la zona sur de Quito. El proyecto de evaluación hidráulica de la línea de conducción La Mica - Quito Sur, establece “condición crítica de caudal máximo de diseño $Q=1750$ l/s” [3], de igual manera este caudal se establece como: “capacidad hidráulica máxima real de 1750 l/s” [4]; debido a problemas operativos se ha llegado a determinar de manera experimental que el caudal máximo de operación es 1560 l/s.

Para aumentar el abastecimiento de agua cruda hasta la planta de tratamiento en 190 l/s, se debe analizar los factores que inciden en la disminución de la capacidad hidráulica de la línea

de conducción, para alcanzar el caudal máximo de diseño de 1750 l/s. Es importante realizar la evaluación técnica del funcionamiento actual del sistema de conducción para poder abastecer a un mayor número de personas asentadas en la zona sur de Quito.

En este trabajo se realizó un análisis en flujo permanente de los factores que inciden en la disminución de la capacidad hidráulica de la línea de conducción del sistema La Mica - Quito Sur, para lograr este objetivo se examinó la información existente, como también se verificó el catastro del sistema con mediciones *in situ*, se construyó, calibró y validó un modelo hidráulico, finalmente se evaluó el funcionamiento del sistema de conducción bajo diferentes escenarios de funcionamiento y se recomendó posibles soluciones.

II. Metodología

A. Ubicación

El sistema La Mica - Quito Sur está ubicado en las provincias de Napo y Pichincha específicamente en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), donde inicia con las fuentes de abastecimiento y termina en la planta de tratamiento El Troje respectivamente. Este sistema se encuentra dividido en: conducción superior que va desde el embalse La Mica hasta la planta generadora de energía El Carmen y en la conducción inferior transporta agua desde El Carmen hasta la planta de tratamiento, como se indica en la figura 1.

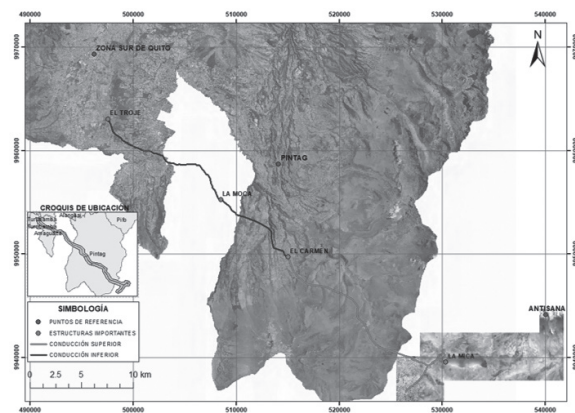


Fig. 1. Mapa de ubicación del sistema de conducción La Mica - Quito Sur.

El proyecto se encuentra a diferentes elevaciones, parte de los 3917 msnm hasta los 3154.20 msnm presentándose una variación de la temperatura en su trayecto donde: en el embalse La Mica se tiene temperaturas de 4 a 8°C y de 12 a 20°C en la planta de tratamiento.

B. Población servida

El sistema La Mica - Quito Sur dota de agua a la población asentada desde la Av. Morán Valverde hasta el límite cantonal sur de la ciudad, con una cobertura directa de 4000 Ha, de manera indirecta beneficia también a otros sectores de la ciudad como se puede muestra en la figura 2.

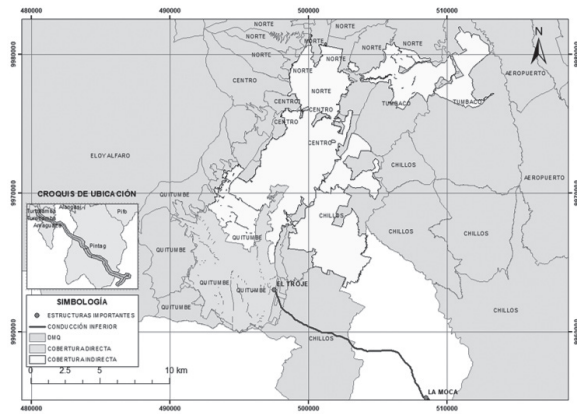


Fig. 2. Mapa de cobertura del sistema La Mica-Quito Sur.

En el año 2010 el sistema abastecía a 393.452 habitantes y a partir de este dato se realiza la proyección de la población a servir hasta el año 2040 observadas en la tabla 1.

Tabla 1 Proyección de la población servida

Variables	2010	2020	2030	2040
Población	414160	482975	566999	656585
Cobertura sistema de agua	99	99	99	99
Población servida	393452	473315	555659	643453
Dotación neta l/hab/día	183	179	174	170
Tasa de crecimiento %	2.00	1.84	1.38	1.10

El Plan Maestro de Agua Potable realizado por la EPMAPS [2] plantea el incremento de 180 l/s al caudal máximo de diseño de 1750 l/s, con este aumento se podrá abastecer a la población servida futura de 656.585 habitantes para el año 2040.

C. Componentes del sistema

Los componentes que conforman el sistema La Mica - Quito Sur se los puede clasificar en tres grupos principales: captaciones o fuentes de abastecimiento, líneas de conducción y obras complementarias, esta clasificación se visualiza en la figura 3.

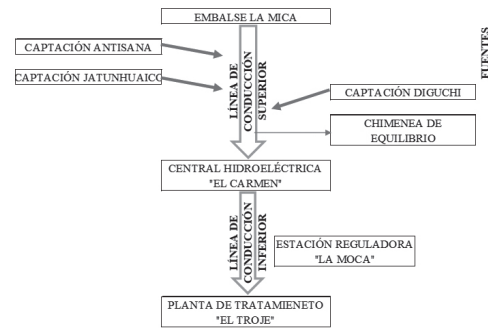


Fig. 3. Componentes del sistema La Mica - Quito Sur.

La línea de conducción superior empieza en el embalse y las captaciones hasta El Carmen donde se controla el caudal del sistema, la línea de conducción inferior comienza en el tanque de El Carmen hasta el tanque de El Troje y se regula el caudal desde La Moca.

D. Construcción del modelo hidráulico

En la construcción del modelo hidráulico se realizó el procedimiento de la figura 4. La actualización topológica es muy importante debido a que la calidad de la información ingresada en el modelo hidráulico tiene influencia directa con los resultados obtenidos.

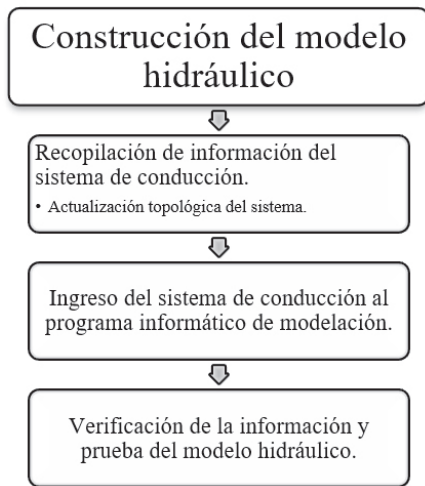


Fig. 4. Proceso de construcción del modelo hidráulico.

Se recopiló la siguiente información de la EP-MAPS: planos as-built, fotos satelitales, estudios realizados anteriormente, topología existente del sistema, manuales y datos de las válvulas del sistema. Con la información existente se realizó una actualización topológica de los nodos y tuberías para realizar la modelación en EPANET como se muestra en la figura 5.

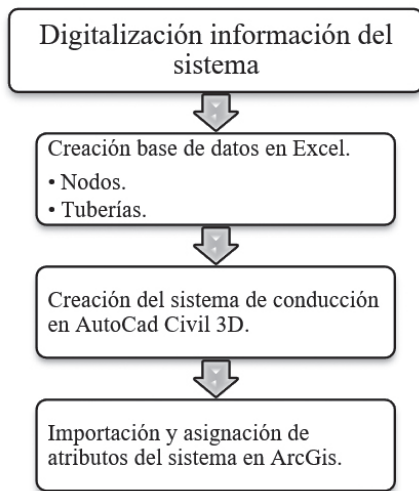


Fig. 5. Proceso de actualización topológica del sistema de conducción.

Para la topología se necesita la siguiente información de los nodos: nombre, abscisa, cota del terreno, cota de la tubería. De las tuberías: nodo

inicial, nodo final, diámetro interno, espesor de la tubería, tipo y grado de material.

Posteriormente se ingresa la topología al programa informático EPANET para realizar una verificación de los datos ingresados como también un análisis de los resultados obtenidos en la primera modelación, estos resultados deben tener una diferencia de hasta 30% entre las mediciones y los resultados, para así poder realizar el proceso de calibración de acuerdo con lo planteado por la Asociación de Nueva Zelanda de Aguas y Desechos [5].

E. Calibración del modelo hidráulico

La calibración se realizó para la conducción superior e inferior de acuerdo con los pasos de la figura 6, donde se detalla el procedimiento para periodo estático y extendido.

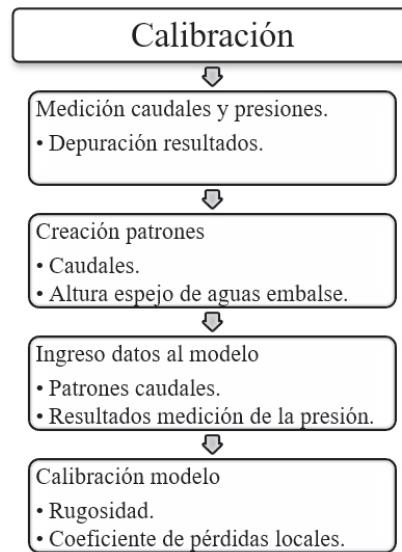


Fig. 6. Proceso de construcción del modelo hidráulico.

Los parámetros hidráulicos empleados en EPANET para las diferentes calibraciones realizadas se indican en la tabla 2, para la primera calibración se empleó un análisis estático, mientras que la segunda y tercera se modeló en periodo extendido.

Tabla 2 Parámetros hidráulicos ingresados a EPANET.

PARÁMETRO	DATO
Método de fricción	Darcy-Weisbach
Tipo de análisis	Estático-Extendido
Gravedad específica	1
Temperatura del agua (°C)	12
Viscosidad cinemática (m ² /s)	1.24*10 ⁻⁶

La instalación de los medidores de presiones o data loggers se realizó de acuerdo con la ubicación de los accesorios que generen pérdidas de carga considerable en el sistema, también en los puntos más críticos de la tubería, en la figura 7 se encuentra su ubicación para la conducción superior y en la figura 8 para la conducción inferior.

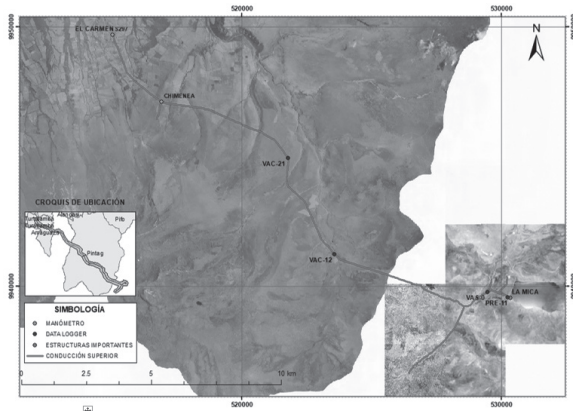


Fig. 7. Mapa de ubicación de manómetros y data loggers en conducción superior.

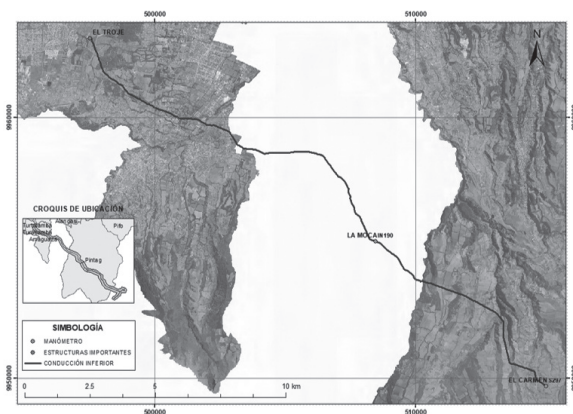


Fig. 8. Mapa de ubicación de manómetros en conducción inferior.

En la primera calibración para la conducción superior se emplean los datos proporcionados por el sistema SCADA de la EPMAPS donde los caudalímetros están ubicados en el embalse, las captaciones, a la entrada y salida de El Carmen; los manómetros están ubicados en la chimenea de equilibrio y en El Carmen (S297) como se observa en la figura 9.

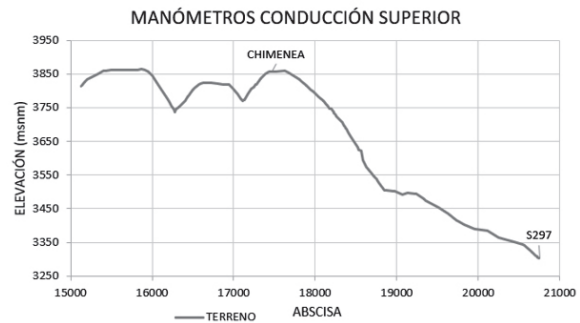


Fig. 9. Perfil de terreno entre abscisas 15+000 a 21+000 con manómetros en conducción superior primera calibración.

Se realizó un análisis para comprobar que los caudales estén dentro del primer criterio planteado por la Asociación de Autoridades del Agua (WAA) y El Centro de Investigación del Agua (WRC) [6] que se indica en la tabla 3, los caudales que cumplen este criterio son los modelados.

La rugosidad de diseño para tuberías de acero con revestimiento interno de coal-tar, enamel o epoxi es de 0.06 mm de acuerdo con la normativa vigente de la EPMAPS para el diseño de agua potable [7], dato inicial para la calibración del modelo por medio de un proceso de prueba y error.

La calibración se realiza para dos tramos que van desde el embalse a la chimenea de equilibrio y desde la chimenea hasta El Carmen. Para las presiones se utilizaron los criterios de la tabla 3.

Tabla 3 Criterios prácticos para calibración de modelos según la WAA y WRC

CRITERIOS DE CAUDAL	
1)	Precisión de 5% respecto a los caudales medidos para caudales > 10% de la demanda total; tuberías de conducción, generalmente de diámetro mayor a 16 pulgadas (406 mm).
2)	Precisión de 10% respecto a los caudales medidos para caudales < 10% de la demanda total; tuberías de distribución de diámetro generalmente menor de 12 pulgadas (305 mm).
CRITERIOS DE PRESIÓN	
1)	El 85% de las presiones medidas en pruebas de campo no deben diferir en 0.5m o 5% de la pérdida de carga registrada.
2)	El 95% de las presiones medidas en pruebas de campo no deben diferir 0.75m o 7.5% de la pérdida de carga registrada.
3)	El 100% de las presiones medidas en pruebas de campo no deben diferir en 2m o 15% de la pérdida de carga registrada.

Los resultados del primer día analizado se presentan a continuación en la tabla 4, donde se tiene las diferentes iteraciones de la rugosidad para los tramos 1 y 2 con su respectivo error hasta cumplir lo planteado en la tabla 3 para la presión.

Tabla 4 Proceso de prueba y error para la primera calibración en conducción superior

CORRI DA	DATA TIME	MEDIDOS		SIMULADOS				Error P (%)	
		CHIMENE A	S297	Tramo 1 Rugosidad	Tramo 2 Rugosidad	Presión (mca)		Chimenea	S297
		PIT201 (mca)	PIT301 (mca)	(mm)	(mm)	Chimene a	S297		
1	1/11/2016	23.537	570.000	0.060	0.060	30.480	574.090	22.778	0.712
2				0.120	0.060	28.410	572.020	17.151	0.353
3				0.210	0.060	26.050	572.020	9.646	0.353
4				0.320	0.060	23.790	567.400	1.062	0.458

Se obtuvo una rugosidad promedio de 0.829 mm para el tramo comprendido entre el embalse y la chimenea, en el tramo entre la chimenea y El Carmen se tiene una rugosidad de 0.06 mm. El tramo 1 necesita una calibración más detallada debido al alto valor de rugosidad calculado.

Para la segunda calibración de la conducción superior se instalaron tres data loggers en los puntos más críticos de la conducción VAC21, VAC12 y en la válvula de control (VAS-0) como se mues-

tra en la figura 7 y figura 10. Esta calibración se realiza en periodo extendido para garantizar que el modelo hidráulico se encuentre calibrado para los diferentes caudales de operación que se presentan en el sistema.

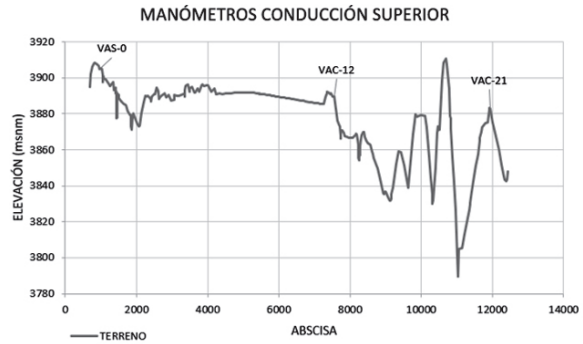


Fig. 10. Curva característica de la válvula de control (VAS-0), tipo mariposa.

Se realizó el procedimiento de la figura 6 y se busca cumplir lo planteado por la WAA y WRC en la tabla 3. Se ingresa también la curva característica de la válvula de control VAS-0 obtenida de la biblioteca del programa INFOWORKS, representada en la figura 11.

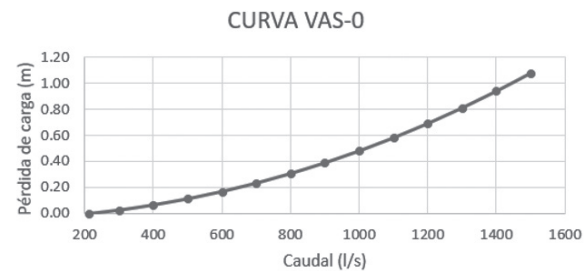


Fig. 11. Curva característica de la válvula de control (VAS-0), tipo mariposa.

Para el primer tramo comprendido entre el embalse y la VAS-0 se obtuvo una rugosidad igual 0.06 mm y un coeficiente de pérdida local en la válvula de control igual a 8. Al analizar los datos de los resultados se obtuvo que el 96.01% de los resultados están dentro del 5% de la pérdida de carga registrada, el 99.96% de los resultados están dentro del 7.5% de la pérdida de carga registrada y el 100.00% de los resultados están dentro del 15% de la pérdida de carga registrada, en la figura

12 se observa la comparación entre las presiones medidas y calculadas.

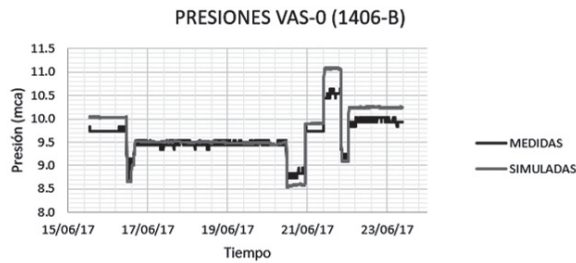


Fig. 12. Comparación presión VAS-0 (1406-B) simulada y medida en la segunda calibración conducción superior.

Para el resto de los tramos se realizó el mismo procedimiento y comparación para cumplir los criterios de calibración establecidos anteriormente en la tabla 3, se tiene los siguientes resultados de la segunda calibración.

- Embalse – válvula de control $n=0.6$ mm.
- Válvula de control – VAC-12 $n=0.30$ mm.
- VAC-12 – VAC-21 $n=0.35$ mm.
- VAC-21 – chimenea $n=0.9$ mm.
- Chimenea – El Carmen $n=0.06$ mm.
- Válvula de control $k=8$.

En el tramo del embalse y la válvula de control se encuentran accesorios que generan pérdidas de carga que necesitan un análisis más a detalle, razón por la cual se realiza la tercera calibración centrada en este tramo para determinar sus coeficientes.

En la tercera calibración se realizó el procedimiento detallado en la figura 6 y se utilizan los parámetros de calibración de la tabla 3. Se instalaron los data loggers a la salida del túnel del embalse, antes y después de la válvula de control (VAS-0) como se muestra en la figura 7 y en la figura 13.

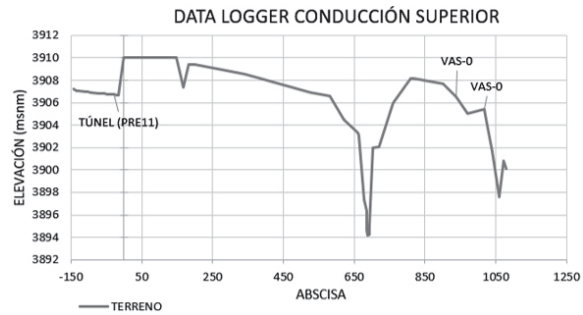


Fig. 13. Perfil de terreno con data loggers en conducción superior para la tercera calibración.

Para calibrar el tramo comprendido entre el embalse y el túnel del embalse o PRE-11 se colocó una rugosidad en la tubería igual a 0.2 mm, se realizó una reducción de 0.485 m en el nivel del espejo de aguas del embalse. Al analizar los datos de los resultados se obtuvo que el 100% de los resultados están dentro del 5% de la pérdida de carga registrada, en la figura 14 se observa la comparación realizada de la presión medida y calculada.

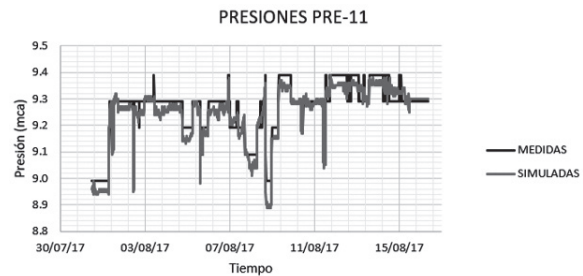


Fig. 14. Comparación presión PRE-11 simulada y medida.

Para el resto de los tramos se realizó el mismo procedimiento y comparación para cumplir los criterios de calibración establecidos anteriormente en la tabla 3, se tiene los siguientes resultados de la tercera calibración.

- Embalse – PRE-11 $n=0.2$ mm.
- PRE-11 – válvula de control $n=0.60$ mm.
- Válvula de control – chimenea $n=0.6$ mm.
- Chimenea – El Carmen $n=0.06$ mm.
- Tee conexión captación Antisana y Jatunhuayco a la conducción $k=1.7$.

- Válvula de control $k=8$.
- Pérdida de carga en la captación del embalse igual a 0.485m.

Para la calibración de la conducción inferior se utilizó los caudalímetros ubicados a la salida de El Carmen y entrada de El Troje y el manómetro instalado en La Moca de la figura 8 y figura 15, la primera calibración se realizó en periodo estático, mientras que la segunda en periodo extendido, las dos fueron realizadas de acuerdo el procedimiento de la figura 6 y cumpliendo los criterios de calibración de la tabla 3.

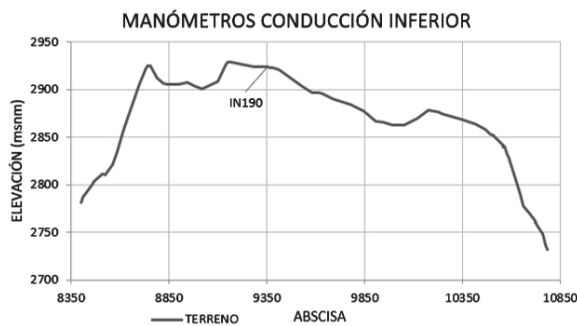


Fig. 15. Perfil de terreno entre abscisas 8+350 a 10+850 con manómetro en conducción inferior.

La rugosidad para la conducción inferior obtenido en la primera y segunda calibración es igual a 0.06 mm según la norma de diseño de agua potable de la EPMAPS [7], en esta línea no existe una pérdida de energía considerable de acuerdo con la rugosidad obtenida.

III. Resultados y discusiones

A. Evaluación

La evaluación del sistema se realizó para diferentes escenarios que fueron planteados de acuerdo con el caudal y la altura del espejo de agua del embalse.

Se tiene tres alturas diferentes que son: nivel máximo de operación de 3917.00 msnm, nivel medio de operación de 3913.38 msnm y el nivel mínimo de operación de 3909.75 msnm. A estas cotas se realizó una corrección de 28.5 cm debido

a la pérdida de carga que se genera al ingreso de la conducción en la torre de captación del embalse La Mica.

Los caudales que se modelaron son: condición actual de funcionamiento 1560 l/s, caudal máximo de diseño 1750 l/s y caudal de 1930 l/s de acuerdo con el Plan Maestro de Agua Potable de la EPMAPS [2].

Se planteó los siguientes escenarios para representar condiciones óptimas, medias y críticas de funcionamiento en el sistema de conducción.

En la conducción superior:

- Escenario 1: Nivel máximo del espejo de agua (3916.715 msnm) con caudales aportados solo por el embalse (1560, 1750 y 1930 l/s).
- Escenario 2: Nivel medio del espejo de agua (3913.09 msnm) con caudales aportados solo por el embalse (1560, 1750 y 1930 l/s).
- Escenario 3: Nivel mínimo del espejo de agua (3909.465 msnm) con caudales aportados solo por el embalse (1560, 1750 y 1930 l/s).
- Escenario 4: Nivel medio del espejo de agua (3913.09 msnm) con caudales aportados solo por las captaciones (1560, 1750 y 1930 l/s).

En la conducción inferior:

- Escenario 5: Nivel mínimo del tanque en El Carmen (3301.15 msnm) con caudal de 1930 l/s.

La modelación del escenario 1 simula las condiciones más óptimas de operación de la conducción superior cuando se encuentra únicamente funcionando el embalse. Con un caudal de 1560 l/s se observa que ya se presentan presiones negativas en el punto más crítico de la tubería el punto VAC-21 y al aumentar el caudal también aumentan las presiones negativas como se observa en la figura 16.

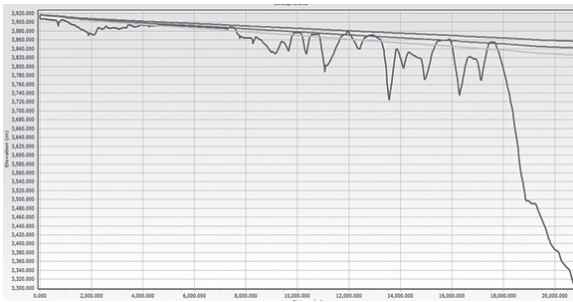


Fig. 16. Gráfica de comparación del gradiente hidráulico – perfil de la tubería del escenario 1.

En los escenarios 2, 3 y 4 se presenta un mayor número de puntos con presiones negativas debido a que estos escenarios simulan condiciones más adversas que el primero.

El escenario 5 simula las condiciones más críticas de operación para la conducción inferior donde para un caudal de 1930 l/s no se presentan presiones negativas como se muestra en la figura 17.

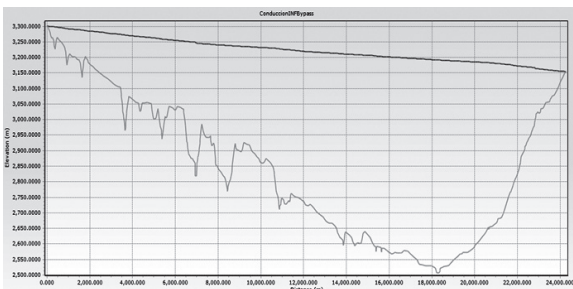


Fig. 17. Gráfica gradiente hidráulico – perfil de la tubería del escenario 5.

En la conducción superior se presentan presiones negativas para diferentes condiciones de operación como se verificó en la figura 16, por lo tanto, es importante plantear soluciones para evitar la generación de presiones negativas en la tubería y lograr transportar el caudal de 1930 l/s de acuerdo al Plan Maestro de agua potable de la EPMAPS [2].

La conducción inferior se encuentra en la capacidad de transportar 1930 l/s en sus condiciones actuales de operación debido a que no se presentan presiones negativas como se comprobó en la figura 17.

B. Alternativas de solución

Basándose en el análisis de los resultados de las calibraciones y escenarios, se establece que la conducción superior es la parte del sistema en la cual se encuentra la mayor pérdida de carga, por lo cual no permite el transporte máximo de los 1750 l/s, determinándose que las alternativas a formularse se aplican únicamente a esta parte del sistema.

La primera alternativa es la reducción de los coeficientes de rugosidad y pérdidas menores realizando un mantenimiento en las tuberías, accesorios, captaciones y válvulas para minimizar la pérdida de energía. Con esta alternativa se espera reducir la rugosidad en la tubería en todos los tramos aproximadamente a 0.06 mm y la pérdida de carga en la torre de captación debido al ingreso de la tubería igual a 0.285 m.

Para modelar esta alternativa se redujo la rugosidad de las tuberías a 0.06 mm, se consideró la altura más crítica del espejo de aguas sin corrección de 3909.75 msnm y un caudal de 1930 l/s. La figura 18 muestra los resultados obtenidos en la modelación donde se observan presiones negativas en los tramos indicados en la figura 19.

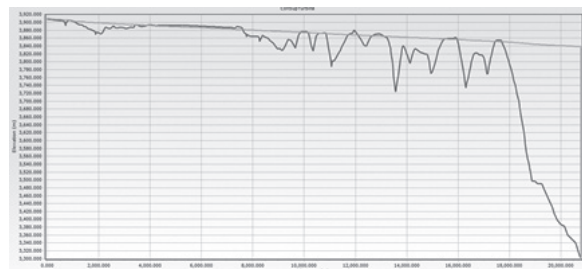


Fig. 18. Gráfica de comparación del gradiente hidráulico – perfil de la tubería, alternativa de reducción de los coeficientes de rugosidad y pérdidas menores.

Esta alternativa necesita ser complementada con un cambio del trazado de la tubería o la construcción de una línea paralela a la existente de menor diámetro que conduzca el caudal restante que no puede ser transportado en las condiciones actuales de operación, también se puede optar por la implementación de una booster.

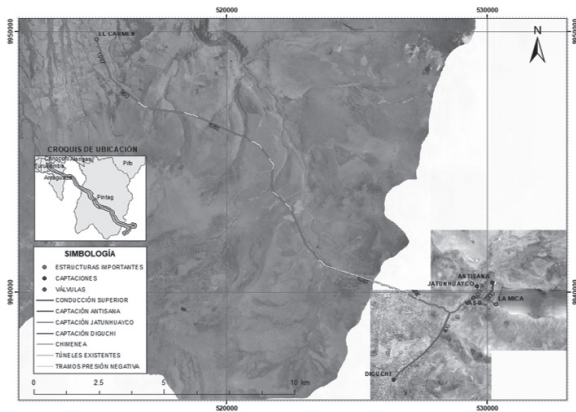


Fig. 19. Mapa de tramos con presión negativa de la alternativa 1.

Los tramos que necesitan un cambio de trazado debido a sus presiones negativas se muestran en la tabla 5, se presentan presiones negativas en una longitud total de 5482.58m.

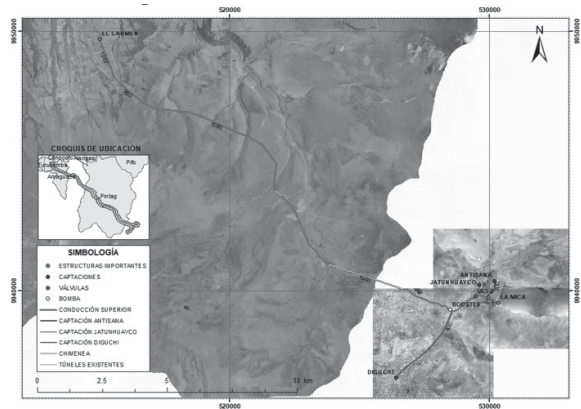
Tabla 5 Tramos que requieren modificación de la línea de conducción superior

Tramo crítico		Longitud
Nodo inicial	Nodo final	(m)
VAC8	S50	20.00
PI19	S60.1	290.55
S61	PI23	3309.78
VAC17	PI34A	262.47
POT20	S165	184.29
VAC20A	S184	298.68
POT29	PI40	359.10
PI54	S237	500.36
POT53	POT56	257.35
	TOTAL	5482.58

Para evitar la interrupción del sistema al construir el cambio de trazado de la línea de conducción, se modeló una booster ubicada después de las captaciones para mejorar su operación. La implementación de una booster tiene una inversión inicial menor al cambio de trazado o la construcción de una tubería paralela de menor diámetro, pero se debe considerar sus costos de operación a largo plazo.

La booster se instaló en el nodo S34 donde se encuentra la intersección entre la captación Diguichi y la línea de conducción, ubicada en la abscisa 2+098 para garantizar el bombeo de agua del embalse y las captaciones como también una presión mínima de tres metros luego de su instalación de acuerdo con la figura 20.

Fig. 20. Mapa de ubicación de la booster.



La ecuación 1 es de la bomba instalada y la figura 21 muestra su curva característica.

$$H = 40 - 2.5 \cdot 10^{-6} \cdot Q^2 \quad (1)$$

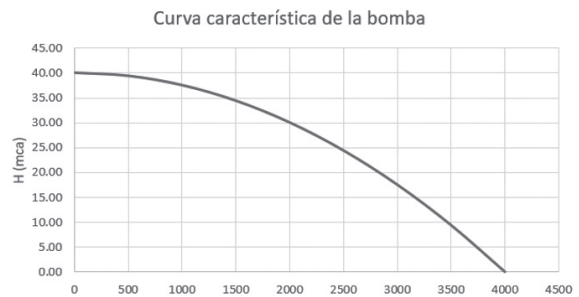


Fig. 21. Curva característica de la bomba instalada.

Para un caudal de 1930 l/s y una altura del espejo de agua del embalse de 3909.465 msnm se obtuvieron las siguientes presiones: en el punto más crítico VAC-21 de 3.76 mca y en la chimenea de equilibrio de 7.57 mca. En la figura 22 se observa que el perfil longitudinal de la tubería y su gradiente hidráulico no se cortan, por lo tanto, no se presentan presiones negativas en esta modelación.

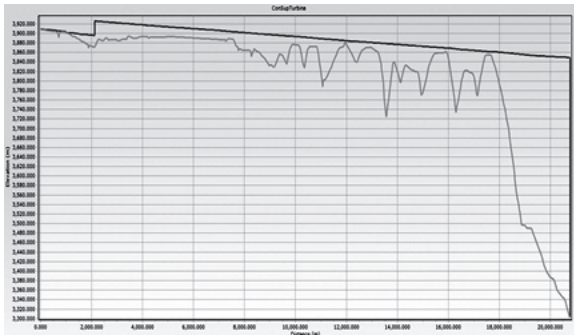


Fig. 22. Gráfica de comparación del gradiente hidráulico - perfil de la tubería, alternativa de implementación de una booster en la línea de conducción superior con un caudal de 1930 l/s.

La booster se enciende a los 1300 l/s y trabaja hasta los 1930 l/s, garantizando antes de su operación una presión mínima de 3 mca, para los 1300 l/s se tiene una presión de 3.04 mca en la VAC-21 y 19.18 mca en la chimenea de equilibrio respectivamente. La figura 23 muestra que no se presenten presiones negativas en este caudal.

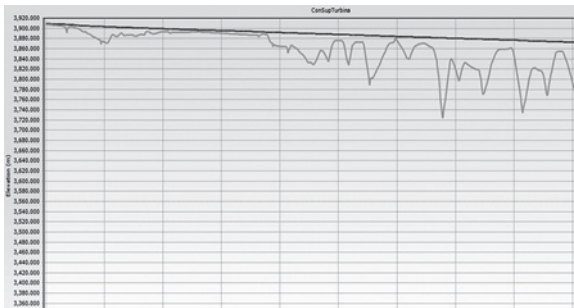


Fig. 23. Gráfica de comparación del gradiente hidráulico - perfil de la tubería, alternativa de implementación de una booster en la línea de conducción superior con un caudal de 1300 l/s.

Complementando esta alternativa con el mantenimiento de la línea de conducción se obtendrían mejores resultados teniendo mayores valores de presión en todos los nodos, pero se debe considerar cuáles serían las condiciones más críticas que se pueden presentar en el funcionamiento del sistema.

IV. Conclusiones y recomendaciones

A. Conclusiones

En la torre de captación del embalse “La Mica” existe una pérdida de energía igual a 48.50 cm de acuerdo con la tercera calibración, donde 20.00 cm corresponden a la diferencia en la calibración del nivel máximo del embalse que es igual a 3917.00 msnm según los planos de diseño definitivo, los 28.50 cm restantes se deben a la pérdida de energía local en la misma.

El tramo comprendido entre la salida del túnel del embalse (PRE-11, abscisa 0+113.95) y la válvula de control (VAS-0) ubicada en la abscisa 0+970, tiene una alta rugosidad de 0.60 mm presumiblemente por la gran cantidad de sedimentos arrastrados que provienen de la captación Antisana, por sus características geológicas y morfológicas.

Con la instalación de los data loggers utilizados para las calibraciones en la línea de conducción superior se determinó que existe una acumulación de aire en la válvula de aire VAC-12, influyendo negativamente en la capacidad hidráulica de la tubería y generando pérdidas de carga.

El tramo comprendido entre la válvula de control (VAS-0), ubicada en la abscisa 0+970 y la chimenea se encuentra operando con una rugosidad igual a 0.60 mm, se asume que esta rugosidad no es la que existe en la tubería e indica la existencia de otros factores no considerados en la modelación en flujo permanente, en este tramo se encuentra la válvula de aire VAC-12 ubicada en la abscisa 7+556.26 donde se puede considerar que la pérdida de carga no se debe únicamente a la rugosidad sino también al aire presente en el flujo que genera una contracción de la vena del fluido.

Los factores que influyen en la reducción del caudal máximo de diseño (1750 l/s) en el sistema La Mica - Quito Sur se encuentran presentes en la conducción superior, siendo los siguientes: mínimo mantenimiento en las estructuras, válvulas y medidores instalados, pérdida de carga elevada en la torre de captación del embalse siendo equivalente a una obstrucción del 50% de su sección, posiblemente una gran cantidad de sedimentos en el tramo comprendido entre PRE-11 y VAS-0,

funcionamiento incorrecto de las válvulas de aire generando una disminución en la vena del fluido transportado.

La conducción superior con un caudal de 1560 l/s y una altura del espejo de aguas en el embalase igual a 3916.715 msnm, siendo el escenario más favorable de operación presenta problemas de funcionamiento generando presiones negativas en el nodo VAC-21 ubicado en la abscisa 11+922.67.

Las características actuales de funcionamiento de la conducción inferior demuestran que en condiciones favorables permite el transporte del máximo caudal actual de 1560 l/s con el mínimo nivel del tanque de la central hidroeléctrica "El Carmen", siendo estas mismas condiciones aptas para transportar un caudal máximo de 1930 l/s con un nivel mínimo del tanque 3301.15 msnm. La reducción de los coeficientes de rugosidad y pérdidas menores en la línea de conducción superior sigue presentando presiones negativas en una longitud total de 5482.58 m donde se recomienda realizar un estudio a profundidad para realizar un cambio de trazado de la tubería en los respectivos tramos, siendo necesario complementar esta alternativa con la ejecución de otras soluciones.

La solución más viable para aumentar la capacidad hidráulica de la línea de conducción superior a 1930 l/s es la instalación de una booster en el nodo PI-1 ubicado en la abscisa 2+098, donde la altura de bombeo es 30 mca para un caudal de diseño igual a 2000 l/s, garantizando de esta manera una presión mínima de 3 m en todos los puntos aguas abajo de su instalación y operando entre los caudales de 1930 l/s y 1300 l/s.

B. Recomendaciones

Realizar mantenimiento periódico de todos los componentes del sistema, con especial enfoque a disminuir la rugosidad de las tuberías y revisar el correcto funcionamiento de las válvulas de control, desagüe y de aire, garantizando su adecuado funcionamiento con la reducción de las pérdidas de carga.

Mantenimiento, calibración y encerado de los

equipos de medición que emiten información al sistema SCADA, como también de los equipos utilizados en los levantamientos topográficos y medición de presiones para los trabajos de campo, su reemplazo inmediato en caso de ser necesario y la instalación de un medidor de presiones en la válvula de aire VAC-21 permitirá operar la línea de conducción con mayor seguridad.

Modelar el sistema de conducción La Mica - Quito Sur en flujo no permanente luego de haber sido aplicadas las recomendaciones anteriores para garantizar la exactitud de los resultados y minimizar la inversión necesaria para la implementación de las soluciones.

C. Agradecimientos

Este trabajo fue posible gracias al apoyo de la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS) por proporcionar los datos, logística y personal de campo.

Referencias

- [1] Naciones Unidas ONU. (2010). El derecho humano al agua y saneamiento. Naciones Unidas. Obtenido de: http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/64/292&Lang=S
- [2] EPMAPS. (2011). Resumen Ejecutivo Plan Maestro de Agua Potable. Quito.
- [3] EPMAPS. (2006a). Fase I Diagnóstico y formulación de alternativas Volumen No 1. Quito.
- [4] EPMAPS. (2006b). Fase I Diagnóstico y formulación de alternativas, resumen ejecutivo. Quito.
- [5] The New Zealand Water and Wastes Association. (2009, April). National Modelling Guidelines Water Distribution Network Modelling. Modelling Special Interest Group.
- [6] Water Authorities Association y Water Research Center. (1989). Network Analysis: A Code of Practice. Water Research Center.
- [7] EPMAAP-Q. (2008). Normas de diseño de sistemas de agua potable para la EMAAP-Q. Quito: Empresa Metropolitana de Alcantarillado y Agua Potable.

Hormigón estructural de baja densidad para edificaciones

Morales Gubio L. W.*, **; Santamaría Carrera J. L.*, **; Caicedo Barona W.*, **; Tipán Quinatoa F.*, **

*Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática, Carrera de Ingeniería Civil, Quito, Ecuador

**Autores correspondientes

e-mail: lwmorales@uce.edu.ec

Información del artículo
Recibido: julio 2018
Aceptado: septiembre 2018

Resumen

El Ecuador se encuentra en una zona de alta peligrosidad sísmica, por lo que el diseño que demanda en las edificaciones de hormigón armado bajo una condición crítica, es el Sismo y siendo la cortante basal, la fuerza lateral aplicada en la edificación proporcional al peso de la estructura, por lo que una alternativa para atenuar esta acción sísmica sobre las estructuras de hormigón armado es disminuir el peso de los elementos estructurales mediante el uso de hormigones ligeros. Por tanto, el objetivo principal de la investigación es fabricar un hormigón de baja densidad que a su vez tenga características estructurales y además se pueda determinar mediante ensayos y correlaciones los parámetros físicos y mecánicos del hormigón ligero para que puedan ser usados como datos dentro del análisis y diseño estructural de edificaciones.

Con base en lo descrito, la investigación consiste en la elaboración de un hormigón estructural de baja densidad con el uso de agregado ligero (piedra pómez) extraída del tramo de vía San Antonio - Calacalí, agregado fino de la cantera Pifo y cemento tipo GU de uso general. El diseño de hormigón ligero estructural se basa en tres normativas: ACI 318-14: Requisitos del Código para Hormigón estructural, ACI 211.1-98: Práctica estándar para seleccionar proporciones de hormigón estructural ligero y ACI 213R-14: Guía para concreto estructural agregado ligero, las cuales proveen de tablas para la estimación de las cantidades de material, dependiendo de la resistencia que se desee alcanzar.

La dosificación para un metro cúbico de hormigón ligero estructural es de 9.2 sacos de cemento, 208 litros de agua, 792 kg de arena, 326 kg de piedra pómez y 4.6 kg de aditivo superplastificante Aditec SF - 106. Utilizando esta dosificación se consigue un hormigón ligero estructural con una resistencia a la compresión a los 28 días de 282 kg/cm² y densidad de equilibrio de 1.81 kg/cm³, además, para poder ser usado posteriormente en un modelo matemático, se obtiene el módulo de rotura, resistencia a la tracción, módulo de elasticidad, módulo de Poisson mediante ensayos y fórmulas de correlación del ACI. El hormigón ligero puede ser utilizado en elementos estructurales como vigas, columnas y losas, pero no puede estar con contacto directo con el agua debido a su porosidad. La disminución de la densidad del hormigón trae múltiples ventajas como la reducción de cargas, secciones, cuantía de acero e incluso costo.

Palabras clave: hormigón estructural ligero, piedra pómez, hormigón de baja densidad.

Abstract

Ecuador is located in an area of high seismic hazard, so the design demanded in reinforced concrete buildings under a critical condition, is the earthquake and being the basal shear, the lateral force applied in the building proportional to the weight of the structure, so that an alternative to mitigate this seismic action on reinforced concrete structures is to reduce the weight of structural elements by using lightweight concrete. Therefore, the main objective of the research is to manufacture a low-density concrete that in turn has structural characteristics and also can be determined by tests and correlations the physical and mechanical parameters of lightweight concrete so that they can be used as data within the analysis and structural design of buildings.

On the basis of what has been described, the investigation consists in the elaboration of a low-density structural concrete with the use of light aggregate (pumice stone) extracted from the San Antonio - Calacalí road section, fine aggregate from the Pifo quarry and GU type cement. general use. The structural lightweight concrete design is based on three standards: ACI 318-14: Code requirements for structural concrete, ACI 211.1-98 Standard practice for selecting proportions of lightweight structural concrete and ACI 213R-14: Guide for light aggregate structural concrete, which provide tables for estimating the quantities of material, depending on the resistance you want to achieve.

The dosage for one cubic meter of structural lightweight concrete is 9.2 bags of cement, 208 liters of water, 792 kg of sand, 326 kg of pumice stone and 4.6 kg of Aditec SF - 106 superplasticizer additive. Using this dosage, a concrete is obtained structural light with a 28-day compressive strength of 282 kg / cm² and equilibrium density of 1.81 kg / cm³, in addition to be used later in a mathematical model, the modulus of rupture, tensile strength is obtained, modulus of elasticity, Poisson module through tests and correlation formulas of the ACI. Lightweight concrete can be used in structural elements such as beams, columns and slabs, but cannot be in direct contact with water due to its porosity. The decrease in the density of concrete brings many advantages such as reduction of loads, sections, amount of steel and even cost.

Keywords: lightweight structural concrete, pumice stone, low density concrete.

1. Introducción

El hormigón liviano con el uso de áridos ligeros fue utilizado por los romanos en la construcción de la cúpula del Panteón de Agripa de 44 metros de diámetro, que data del año 118 y 125 d. C. [1].

Existen diversos estudios realizados en el Ecuador sobre el hormigón ligero; uno de ellos, por ejemplo, es el efectuado en la Universidad Central del Ecuador denominado:

“Análisis comparativo entre hormigón convencional y hormigón de baja densidad”, en el cual se consiguieron hormigones de densidad alrededor de los 1.88 kg/cm^3 y resistencias a la compresión a los 28 días de 180 kg/cm^2 .

En esta investigación se comprobó que se pueden obtener hormigones con densidad baja ($1,81 \text{ kg/cm}^3$), pero a la vez se planteó conseguir hormigones con resistencias mayores a los 180 kg/cm^2 , de acuerdo a los ensayos se cumplió el propósito, obteniendo resistencias de hasta 280 kg/cm^2 , que permite definir al hormigón como estructural y que este sea empleado en elementos estructurales como columnas, vigas y losas.

2. Fundamentación

El diseño de hormigón ligero estructural se basa principalmente en las siguientes normas:

- ACI 318-14: Requisitos del Código para hormigón estructural.
- ACI 211.1-98: Práctica estándar para seleccionar proporciones de hormigón estructural ligero.
- ACI 213R-14: Guía para concreto estructural agregado ligero.

3. Definiciones

Hormigón ligero estructural: hormigón que posee una resistencia a la compresión mínima a los 28 días de 17 MPa, una densidad de equilibrio entre 1120 y 1920 kg/m^3 , y consiste completamente de agregado de peso ligero o una combinación de

peso ligero y agregado de densidad normal. [2]

Densidad de equilibrio: es la densidad alcanzada por el hormigón estructural ligero después de la exposición a la humedad relativa de $50 \pm 5\%$ y una temperatura de $23 \pm 2^\circ \text{C}$ por un período de tiempo suficiente para alcanzar una densidad que cambia menos del 0,5% en un período de 28 días. [2]

Agregado ligero: es aquel que tiene un peso volumétrico seco suelto como máximo 880 kg/m^3 , mientras que para el agregado normal las densidades oscilan entre 14440 a 1769 kg/m^3 . [3]

4. Formulación de objetivos y establecimiento de hipótesis

4.1 Objetivo general

- Fabricar un hormigón ligero estructural que pueda usarse como material para el análisis y diseño de edificaciones.

4.2 Objetivos específicos

- Determinar la resistencia a la compresión simple del hormigón ligero a los 7, 14 y 28 días.
- Obtener la densidad de equilibrio que defina al hormigón como ligero.
- Establecer el módulo de rotura.
- Definir la resistencia a la tracción.
- Calcular mediante fórmulas o correlaciones el módulo de elasticidad E_c del hormigón ligero.

4.3 Hipótesis

Es posible conseguir un hormigón de baja densidad que a su vez posea una resistencia estructural con el uso de piedra pómez.

5. Materiales, fuentes y métodos

5.1 Materiales

El desarrollo del proyecto se centra en la provincia de Pichincha, donde se utilizará materiales locales. El hormigón ligero tiene varios componentes como son, el cemento Portland tipo IP, arena de peso normal, agua, aditivo y piedra pómez.

Piedra pómez

Piroclasto de caída con un tamaño comprendido entre 2 y 64 mm, generado en erupciones explosivas a partir de la fragmentación de la lava que recubre las burbujas de gas que ascienden hacia la superficie y explotan por la diferencia de su presión interna con la del entorno. [4]

Agregado fino

El agregado fino consiste en arena natural proveniente de canteras aluviales o de arena producida artificialmente. La forma de las partículas es generalmente cúbica o esférica y razonablemente libre de partículas delgadas, planas o alargadas. La arena natural es constituida por fragmentos de roca limpios, duros, compactos, durables. [4]

Cemento

El cemento es un conglomerante hidráulico, es decir, un material inorgánico finamente molido que, amasado con agua, forma una pasta que fragua y endurece por medio de reacciones y procesos de hidratación y que, una vez endurecido conserva su resistencia y estabilidad incluso bajo el agua. [5]

Agua

El agua es un componente esencial en las mezclas de concreto y morteros, pues permite que el cemento desarrolle su capacidad ligante.

El agua utilizada en la elaboración del concreto y mortero debe ser apta para el consumo humano, libre de sustancias como aceites, ácidos, sustancias alcalinas y materias orgánicas. [6]

Aditivo superplastificante

Los aditivos plastificantes y superplastificantes de hormigón son aditivos para hormigón capaces de mejorar las propiedades del hormigón.

Se emplean para conferir al hormigón fresco un mejor comportamiento en cuanto a trabajabilidad y bombeabilidad, pero también se busca con su uso mejorar significativamente la resistencia y la durabilidad del hormigón final. [7]

5.2 Fuentes

La calidad del hormigón depende del tipo de agregado que se utilice en la construcción. En Quito operan 65 canteras que abarcan 1.739 hectáreas, distribuidas en las parroquias de San Antonio de Pichincha, Píntag, Calderón, Pifo, Lloa y Guayllabamba.

Según el Municipio, el 69% corresponde a concesiones otorgadas a particulares, el 27% a autorizaciones de libre aprovechamiento para obra pública y 4% a permisos para minería artesanal. Además, hay aquellas que trabajan de manera ilegal. [8]

Buena parte de los materiales de construcción para la ciudad provienen del norte de Quito, la mayoría de los sitios de extracción de los agregados se ubican en el tramo de vía Quito-Mitad del Mundo - Perucho, en la provincia existen otras fuentes de materiales como Guayllabamba, Pifo, Calacalí, Lloa, Píntag, entre otras, de donde se puede obtener los agregados para la fabricación del hormigón.

Para el desarrollo de este estudio del hormigón ligero se utilizó los agregados provenientes de las zonas de Pifo y Mitad del Mundo - Calacalí.

5.3 Métodos

Muestra

La piedra pómez fue extraída del tramo de la vía Mitad del Mundo-Calacalí, sector La Cruz, el agregado fino de peso normal de la cantera de Pifo, Cemento Holcim G.U. y el aditivo ADITEC SF-106 que se adquirió de la empresa Aditec Ecuatoriana Cía. Ltda.

Técnicas

Se efectuó los ensayos de laboratorio a los agregados, basándose en las normas INEN y ASTM que justifiquen la calidad de los materiales que van a intervenir en el proceso de fabricación del hormigón ligero.

6. Recopilación de datos

6.1 Ensayos de caracterización de los materiales

Para la caracterización de los agregados se realizaron varios ensayos en el laboratorio que incluyen la determinación de la densidad aparente real, suelta y compactada, granulometría, absorción, y contenido de humedad.

Tabla 1. Datos de las propiedades de los agregados

	Unidad	Arena	Pómez
Contenido de humedad (CH)	%	0.89	5.79
Contenido de absorción (CA)	%	2.57	33.61
Densidad en estado SSS (DSSS)	(gr/cm ³)	2.58	1.23
Densidad seca compactada (DSC)	(gr/cm ³)	1.7	0.53
Densidad seca suelta (DSS)	(gr/cm ³)	1.57	0.47
Módulo de finura (MF)	---	3.02	2.78
Tamaño nominal máximo TNM	pulgada		3/8"

Fuente: Los autores

Peso específico del cemento Holcim G.U.

P.E. = 2.90 gr/cm³

7. Diseño del hormigón estructural ligero

El método se basa principalmente en la norma ACI 211.2-98 Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete.

Este método de diseño es aplicable para mezclas hechas con agregado gruesos ligeros, agregados finos ligeros y agregado finos de peso normal, el cual proporciona la secuencia de pasos para poder hacer la dosificación del hormigón ligero. [9]

Proceso para el diseño de mezclas de hormigón ligero

1) Estudio de las especificaciones de la obra.

Dependiendo de la resistencia y densidad requeridas se procederá al diseño del hormigón ligero.

2) Definición de la resistencia promedio requerida

Cuando una instalación productora de concreto no tenga registros de ensayos de resistencia en obra para el cálculo de Ss que se ajuste a los requisitos de la desviación estándar, el f'cr debe determinarse de la tabla 2.

Tabla 2. Resistencia promedio a la compresión requerida cuando no hay datos disponibles para establecer una desviación estándar de la muestra.

Resistencia especificada a la compresión, MPa	Resistencia promedio requerida a la compresión, MPa
f'c < 21	f'cr = f'c + 7.0
21 ≤ f'c ≤ 35	f'cr = f'c + 8.3
f'c > 35	f'cr = 1.10 f'c + 5.0

Fuente: ACI, American Concrete Institute. Requisito de Reglamento para Concreto Estructural ACI 318S-08. Impreso en U.S.A. Año 2008. Pág.: 72.

3) Estimación del revenimiento

Elección del revenimiento si no se especifica, el ACI proporciona una tabla de revenimiento con valores recomendados para cada tipo de elementos estructurales que se desea construir.

Tabla 3. Revenimiento recomendado para diferentes elementos estructurales

Elemento estructural	Revenimiento(mm)	
	Máximo	Mínimo
Vigas y muros reforzados	100	25
Columnas	100	25
Sistemas de piso (losas)	75	25

Fuente: ACI, American Concrete Institute. Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete (ACI 211.2-98). Impreso en U.S.A. Año 2004. Pág.: 211.2-5.

4) *Estimación del agua de la mezcla y el contenido de aire*

La cantidad de agua por unidad de volumen para obtener el revenimiento deseado depende del tamaño máximo, de la forma y de la graduación del agregado, del contenido de aire y de los aditivos químicos que se

empleen, no depende en gran medida de la cantidad del cemento. La tabla 4 proporciona una estimación del agua requerida dependiendo del tamaño máximo de agregado y la cantidad de aire. La forma y la textura de los agregados influye en la cantidad de agua, pero los valores de la tabla dan una suficiente aproximación para esta primera estimación.

Tabla 4. Requerimientos aproximados de agua de mezcla para diferentes revenimientos y tamaño máximo de agregado

Tamaño máximo de agregado	3/8" (9.5mm)	1/2" (12.7mm)	3/4" (19mm)
Concreto con aire incluido			
Agua en Kg/m³ de concreto			
Revenimiento de 25 mm a 50 mm	181	175	166
Revenimiento de 75 mm a 100 mm	202	193	181
Revenimiento de 125 mm a 150 mm	211	199	187
Contenido total de aire recomendado para diferentes niveles de exposiciones, %			
Exposición ligera	4.5	4	4
Exposición moderada	6	5.5	5
Exposición extrema	7.5	7	6
Concreto sin aire incluido			
Agua en kg/m³ de concreto			
Revenimiento de 25 mm a 50 mm	208	199	187
Revenimiento de 75 mm a 100 mm	228	217	202
Revenimiento de 125 mm a 150 mm	237	222	208
Contenido aproximado de aire atrapado en el concreto sin aire incluido en %			
	3	2.5	2

Fuente: ACI, American Concrete Institute. Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete (ACI 211.2-98). Impreso en U.S.A. Año 2004. Pág.: 211.2-5.

En la tabla se indica los niveles recomendados de contenido de aire con respecto a la exposición que tendrá el concreto en servicio. Estos valores mejoran el manejo y la durabilidad de la mezcla, ayudando a reducir la masa de esta.

Según el ACI 213R-03, Capítulo 3, Tabla 3.1 se tiene valores de contenido de aire recomendado para el concreto ligero para diferentes tamaños máximos nominales.

Tabla 5. Contenido de aire recomendado para el concreto ligero.

Tamaño máximo de agregado	Contenido de aire por % en volumen
3/4" pulgada (19mm)	4.5 a 7.5
3/8" pulgada (10mm)	6 a 9

Fuente: ACI, American Concrete Institute. Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete (ACI 213R-03). Impreso en U.S.A. Año 2003. Pág.: 213R-9.

5) Selección de la relación aproximada agua cemento

En la relación agua-cemento w/c a emplear, no solo interviene la resistencia requerida sino también factores como la durabilidad y las propiedades finales deseadas. Dado que cuando se utilizan diferentes agregados y cementantes con la misma relación agua cemento resultan diferentes resistencias, es deseable desarrollar una relación entre la resistencia y w/c para cada material que se utilice.

Tabla 6. Relación entre w/c y resistencia a compresión del concreto.

Resistencia a compresión a 28 días MPa	Relación aproximada agua - cemento, por masa	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
41.4	0.41	----
34.5	0.48	0.4
27.6	0.57	0.48
20.7	0.68	0.59
13.8	0.82	0.74

Fuente: ACI, American Concrete Institute. Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete (ACI 211.2-98). Impreso en U.S.A. Año 2004. Pág.: 211.2-6.

6) Cálculo de la cantidad de cemento

Una vez que la cantidad de agua y la relación w/c han sido estimados, se puede obtener fácilmente la cantidad de cemento por unidad de volumen del concreto que es determinada dividiendo la cantidad de agua por la relación w/c.

$$Cemento \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \frac{Cantidad\ de\ agua}{\frac{w}{c} (para\ f'cr)}$$

Ecuación N. 1

7) Determinación del contenido del agregado grueso ligero

Agregados con el mismo tamaño máximo nominal y graduación producen concretos

con una manejabilidad satisfactoria con un apropiado volumen de agregado grueso, en la tabla 7 se proporciona una estimación de dicho volumen, este valor depende solamente del tamaño máximo del agregado y módulo de finura del agregado fino.

Tabla 7. Volumen de agregado grueso por unidad de volumen de concreto.

Tamaño máximo del agregado (mm)	Volumen del agregado grueso del suelto en horno por unidad de volumen de concreto para diferentes módulos de finura de arena				
	pulgada	mm	2.4	2.6	2.8
3/8	9.5	0.58	0.56	0.54	0.52
1/2	12.7	0.67	0.65	0.63	0.61
3/4	19	0.74	0.72	0.7	0.68

Fuente: ACI, American Concrete Institute. Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete (ACI 211.2-98). Impreso en U.S.A. Año 2004. Pág.: 211.2-6.

8) Determinación del contenido del agregado fino

A la finalización del paso 7, se han estimado todos los ingredientes del concreto excepto el agregado fino. A la determinación de la cantidad de arena se puede llegar por dos caminos que resultan al final en establecer el valor por diferencia.

El primer camino se refiere a que en ocasiones por experiencias en este tipo de mezclas se puede conocer la masa volumétrica con suficiente aproximación y una vez obtenido este valor, se determina la masa por diferencia, en ausencia de dichas experiencias, se puede recurrir a la tabla 8 que proporciona una primera estimación basada en el factor de gravedad específica del agregado grueso y el contenido de aire.

Tabla 8. Primera estimación de la masa volumétrica del concreto ligero fresco compuesto por agregado grueso ligero y arena de masa normal.

Factor de gravedad específica	Primera estimación de la masa volumétrica del concreto ligero, kg/m ³		
	Concreto con aire incluido		
	4%	6%	8%
1	1596	1561	1519
1.2	1680	1644	1608
1.4	1769	1727	1691
1.6	1852	1810	1775
1.8	1935	1899	1858
2	2024	1982	1941

Fuente: ACI, American Concrete Institute. Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete (ACI 211.2-98). Impreso en U.S.A. Año 2004. Pág.: 211.2-7.

9) Ajustes en las proporciones de la mezcla

Consiste en ajustar las mezclas por humedad y absorción a los agregados, la cantidad de agua que aportarán o absorberán los agregados, según esto se realiza una corrección al valor total de agua, de esta manera se tiene una primera estimación de las cantidades a emplear en la mezcla de concretos ligeros.

Dosificación del hormigón ligero estructural f'c 280 kg/cm².

Tabla 9. Cantidades por metro cúbico de hormigón ligero estructural

Material	Pesos kg	Dosificación
Agua	208	0.45
Cemento	462.22	1
Arena	792.40	1.71
Pómez	326.54	0.71
Aditivo	4.62	0.01

Fuente: Los autores

Tabla 10. Cantidades para 12 cilindros Ø=10cm, h=20cm.

Material	Pesos kg	Dosificación
Agua	6.820	0.44
Cemento	15.501	1.00
Arena	26.573	1.71
Pómez	10.951	0.71
Aditivo	0.1550	0.01

Fuente: Los autores

8. Proceso de fabricación del hormigón ligero

Para la fabricación del hormigón ligero se debe seguir algunos pasos en el mezclado:

1. La piedra pómez debe cumplir con los requisitos de tamaño y granulometría descritos en la norma ASTM C330: Especificación estándar para agregados livianos para concreto estructural.
2. Antes de iniciar con el proceso de fabricación del hormigón estructural ligero al agregado liviano (piedra pómez) se le sumerge en el agua aproximadamente 24 horas, es preferible usar a la piedra pómez en estado saturado en superficie seca (S.S.S.), debido a que tiende a absorber menos agua y no se vea afectada el agua de diseño de la mezcla.
3. Se procede a pesar los materiales calculados para la mezcla, el proceso de mezclado se realizó mediante la concreteira a la cual previamente se humedeció antes de colocar los componentes del hormigón ligero.
4. En las mezcladoras de eje vertical es importante primero colocar en el tambor el agregado grueso ligero (piedra pómez) y seguidamente con la concreteira en marcha se añade las 2/3 parte del agua de diseño para la pre-saturación, una forma de guiarse es que cuando el material está en ese estado las partículas no se pegan a las paredes de la concreteira, al agregado ligero se lo deja mezclar por unos 50 segundos aproximadamente.
5. Con mucho cuidado se hace girar el tambor hasta una posición que permita colocar el

agregado fino (arena), cemento y colocar las $\frac{3}{4}$ partes del agua de diseño.

6. Dejar mezclar por unos 2 minutos, se considera que a mayor tiempo de mezclado influye beneficiosamente en la docilidad del hormigón fresco con este tipo de agregado.
7. Se procede a añadir el aditivo con el agua restante de la mezcla y extender el tiempo de mezclado mínimo de 3 minutos hasta obtener una mezcla fluida y proceder a la descarga en una bandeja grande.
8. Debido a la baja densidad que presenta el agregado la compactación del hormigón varía, ya que el comportamiento del árido en el hormigón difiere del árido de densidad normal. Puesto que los áridos livianos tienden a amortiguar fuertemente las vibraciones, mientras que los áridos de peso normal se compactan al poco tiempo. Pasa lo mismo el momento de expulsar el aire contenido después de la compactación, ya que la movilidad de los áridos de peso normal en el hormigón resulta más favorable que para agregados de baja densidad, por lo cual, el número de inmersiones de la varilla y el número de golpes con el mazo se estima al doble. A continuación, se presenta la tabla 11, que resume los parámetros adoptados para la mezcla.

Tabla 11. Pautas para la elaboración de cilindros de hormigón ligero

Mezcla	HLE
Pre-saturación del agregado (seg)	50
Tiempo total de mezcla (seg)	6
Número de penetraciones de varilla	30
Número de golpes de martillo de caucho	25

Fuente: (Caiza & Martínez, 2015, págs. 21-40)

8. Tratamiento de las variables

La determinación de las propiedades en estado fresco se realizó mediante varios ensayos, entre los que destacan la consistencia que se determinó mediante el ensayo de cono de Abrams ASTM C143, densidad fresca ASTM C138, y homogeneidad.

A los 28 días se midió las propiedades mecánicas más importantes entre las principales resistencias a la compresión ASTM C39, módulo de elasticidad ASTM C469, densidad seca ASTM C567, ensayo de tracción indirecta ASTM C496 y módulo de rotura ASTM C78.

9. Resultados

Se realizó el control de calidad del hormigón, en estado fresco se tomó densidad y asentamiento, en estado endurecido las principales propiedades mecánicas tomadas a los 28 días de fabricación y la evolución de la resistencia a los 7, 14 y 28 días respectivamente.

Tabla 12. Valores de asentamientos del hormigón ligero

Canteras	Métodos	Asentamiento	Consistencia
		cm	Tipos
Pifo Mitad del Mundo-Calacalí	ASTM	8.5	Blanda
		9	Blanda
		8.5	Blanda

Fuente: Los autores

Tabla 13. Valores de densidad fresca del hormigón ligero

	Unidad	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Volumen:	g	2928	2928	2928
Peso del molde:	g	1940	1940	1940
Peso del molde + muestra:	g	7655	7649	7651
Peso de la muestra:	g	5715	5709	5711
Densidad de la muestra:	g/cm ³	1.952	1.950	1.950
Densidad fresca promedio	g/cm ³	1.951		

Fuente: Los autores

Tabla 14. Valores de densidad endurecida del hormigón ligero

N.	ϕ_m cm	hm cm	V cm ³	Peso cilindro g	γ horm. g/cm ³	γ horm promedio g/cm ³
7 días						
1	10.30	20.00	1666.4	3174	1.905	1.911
2	10.27	20.10	1663.9	3208	1.928	
3	10.33	20.00	1677.2	3187	1.900	
14 días						
4	10.23	20.00	1644.9	3123	1.899	1.901
5	10.27	20.03	1658.4	3158	1.904	
6	10.30	20.03	1669.2	3172	1.900	
28 días						
7	10.57	20.10	1762.6	3376	1.915	1.919
8	10.43	19.97	1707.0	3286	1.925	
9	10.30	20.00	1666.4	3195	1.917	

Fuente: Los autores

Tabla 15. Valores de resistencia a compresión del hormigón ligero

N.	ϕ_m cm	A cm ²	Carga kg	σ kg/cm ²	σ prom. kg/cm ²
7 días					
1	10.30	83.32	18350.00	220.23	222.06
2	10.27	82.78	19120.00	230.96	
3	10.33	83.86	18030.00	214.99	
14 días					
4	10.23	82.25	21390.00	260.07	257.09
5	10.27	82.78	20730.00	250.41	
6	10.30	83.32	21730.00	260.79	
28 días					
7	10.57	87.69	25718.00	293.27	282.30
8	10.43	85.49	24203.00	283.10	
9	10.30	83.32	22542.00	270.54	

Fuente: Los autores

Tabla 16. Valores de resistencia a la tracción indirecta del hormigón ligero

N.	ϕm cm	Lm cm	Carga kg	σt kg/cm ²	σt prom. kg/cm ²	σt prom. %
10	10.47	20.00	13173.00	40.06		
11	10.40	20.03	11929.00	36.45	35.66	12.63
12	10.40	20.03	9974.00	30.48		

Fuente: Los autores

Tabla 17. Valores de módulo de rotura del hormigón ligero

N.	b cm	d cm	L cm	Carga kg	MR kg/cm ²	MR prom. kg/cm ²
V1	15.10	14.90	49.90	2280.00	33.94	
V2	15.00	15.10	50.00	2247.00	32.85	
V3	15.20	15.10	50.00	2055.00	29.65	32.14

Fuente: Los autores

Tabla 18. Valores de módulo de elasticidad del hormigón ligero

Cilindro	Densidad	Resistencia		Módulo de elasticidad	
	kg/m ³	kg/cm ²	MPa	MPa	kg/cm ²
7	1915.3	293.2	28.7	19327	197135
8	1924.9	283.1	27.7	19132	195152
9	1917.2	270.5	26.5	18590	189625

Fuente: Los autores

Los valores del módulo de elasticidad fueron calculados con la fórmula de correlación indicada en el ACI 318-14 para hormigones de densidad entre 1500 a 2500 kg/m³.

$$E_c = w_c^{1.5} 0.043 \sqrt{f'c} \text{ en (MPa) Ecuación N. 2}$$

Siendo w_c la densidad del hormigón en kg/m³ y $f'c$ la resistencia promedio a la compresión a los 28 días en MPa.

Módulo de Poisson

Si bien esta propiedad varía ligeramente con la edad, las condiciones de prueba, y propiedades físicas

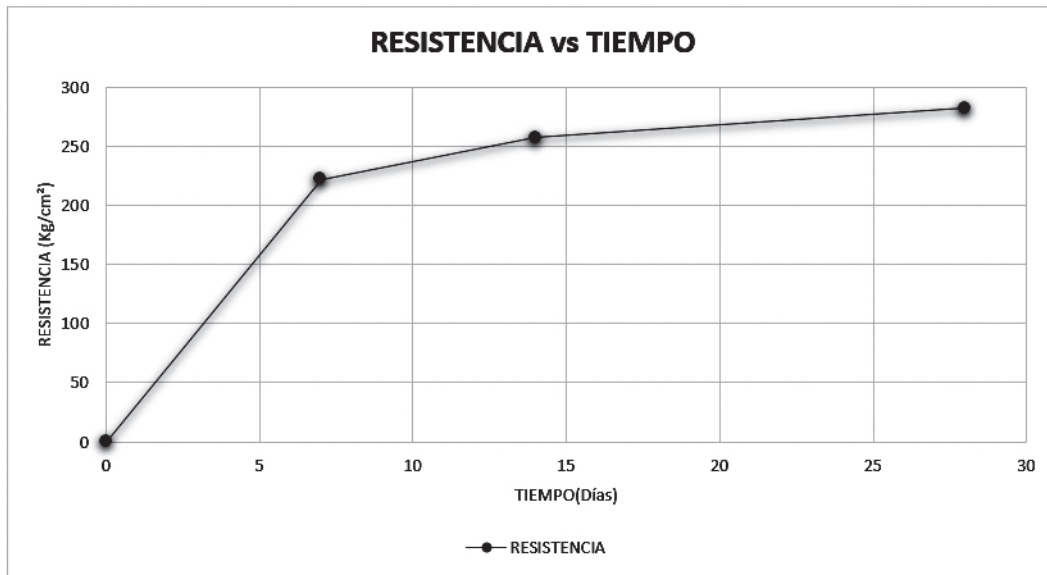
del concreto, un valor de 0.20 usualmente se asume para propósitos prácticos de diseño. [11]

Tabla 19. Datos de resistencia en diferentes edades

Tiempo	Resistencia	Evolución de resistencia
Días	kg/cm ²	%
0	0	0
7	222.1	79.3
14	257.1	91.8
28	282.3	100.7

Fuente: Los autores

Grafico 1. Resistencia a la compresión vs. Tiempo de hormigón ligero celular.



Fuente: Los autores

Densidad aparente seca

Las densidades que han sido monitoreadas son en estado endurecido a los 7, 14 y 28 días.

Tabla 20. Densidad del hormigón ligero a diferentes edades

Tiempo	Densidad
Días	kg/m ³
0	0
7	1911
14	1901
28	1919

Fuente: Los autores

Las mezclas para hormigones ligeros presentaron densidades entre 1901 kg/m³ a 1919 kg/m³, dentro del rango estipulado por el ACI 213R-03, y resultaron ser 13.77% más livianos que la misma mezcla combinada con piedra pómez y árido fino de peso normal.

10. Conclusiones

1) Con la combinación de agregado grueso liviano y agregado fino de peso normal, se llegó a obtener hormigones ligeros, con buenas ca-

racterísticas físicas y mecánicas, cuyos datos a futuro servirán para disponer de un material ligero y con ello realizar un modelo matemático aplicando a un proyecto estructural real de una edificación.

- Debido al alto porcentaje de absorción de la piedra pómez, las densidades obtenidas a los pocos días de haber retirado de la cámara de curado son mayores a la densidad de equilibrio cuyos valores están en el rango de 1810 a 1830 kg/m³, y además cumplen con la especificación de densidad del ACI 318S-14.
- El uso de la piedra pómez como agregado grueso tiende a disminuir la resistencia a la compresión del hormigón, por ello se vio necesario aumentar la cantidad de cemento, tener una relación agua cemento más baja, y la utilización de aditivo superplasticante para compensar esta disminución en la resistencia y que a su vez sea trabajable.
- Se obtuvieron valores de las propiedades físicas y mecánicas del hormigón ligero estructural apropiadas (ver tablas de la 12 a la 20), cuyos datos al compararse con valores de un hormigón convencional, cumplen los requerimientos técnicos y mecánicos para utilizarse

dentro del análisis y diseño de elementos estructurales como columnas, vigas y losas en el caso de realizar.

11. Referencias

- 1) "Lightweight Concrete—A Proven Material for Two Millennia," Proceedings of Advances in Cement and Concrete, S. Sarkar and M. W. Grutzeck, eds., University of New Hampshire, Durham, S.C.
- 2) ACI 213-03R Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete
- 3) ASTM C330 Especificación Normalizada para Agregados Livianos para Concreto Estructural
- 4) Konstruir.com. (2013). DICCIONARIO: Definición de agregado fino. Recuperado de: http://konstruir.com/definicion/letra_a/palabra_agregado%20fino.html
- 5) IECA. (s. f.). Componentes y propiedades del cemento | Características - IECA. Recuperado de: <https://www.ieca.es/componentes-y-propiedades-del-cemento/>
- 6) Arias A., V. (2009). El agua del concreto. Elconcreto.blogspot.com. Recuperado de: <http://elconcreto.blogspot.com/2009/01/el-agua-del-concreto.html>.
- 7) EHE-08. Instrucción española de hormigón estructural
- 8) ACI, American Concrete Institute. Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete (ACI 211.2-98). Impreso en U. S.A. Año 2004.
- 9) ACI, American Concrete Institute. Requisito de Reglamento para Concreto Estructural ACI 318S-08. Impreso en U. S.A. Año 2008.
- 10) ACI, American Concrete Institute. Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete (ACI 213R-03). Impreso en U. S.A. Año 2003.
- 11) Caiza, P., & Martínez, A. (2015). Fabricación de hormigones livianos con materiales volcánoclasticos (lapilli) y su influencia en la reducción de fuerzas sísmicas.

12. Elementos gráficos

Figura 1. Extracción del agregado grueso, vía Mitad del Mundo-Calacalí.



Fuente: Los autores

Figura 2. Extracción del agregado fino de la cantera Pifo.



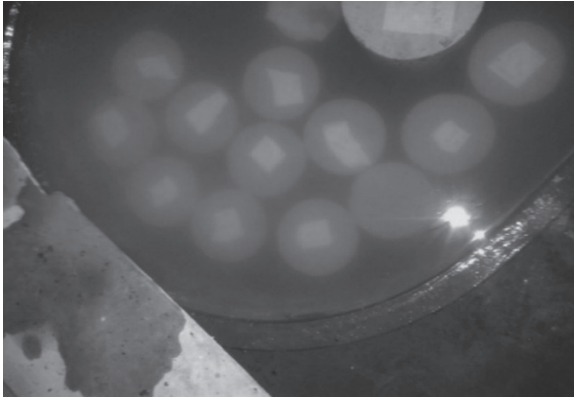
Fuente: Los autores

Figura 3. Fabricación del hormigón ligero.



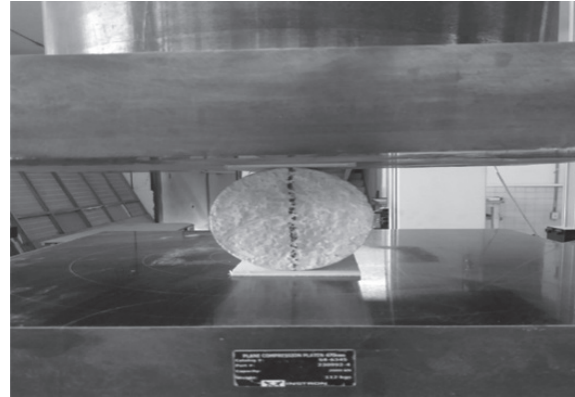
Fuente: Los autores

Figura 4. Curado del hormigón.



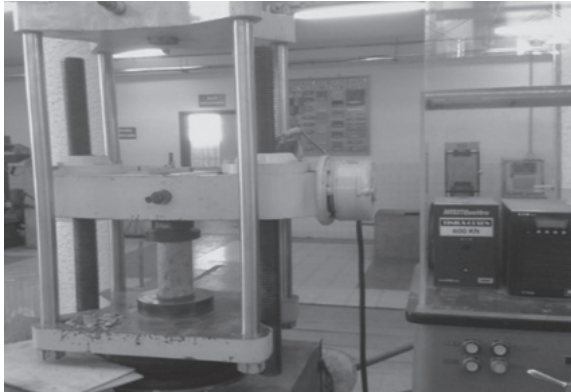
Fuente: Los autores

Figura 7. Ensayo brasileño o tracción indirecta.



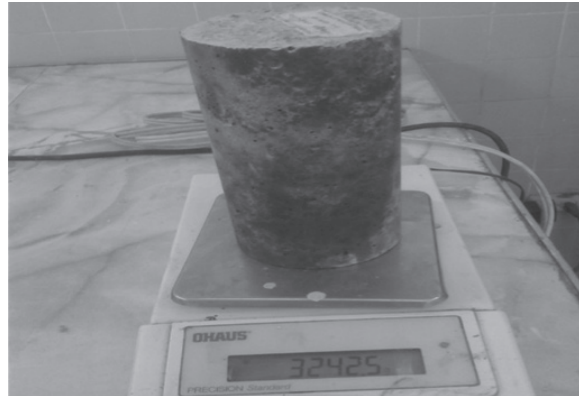
Fuente: Los autores

Figura 5. Ensayo a compresión.



Fuente: Los autores

Figura 8. Peso del cilindro para la determinación de la densidad a los 28 días.



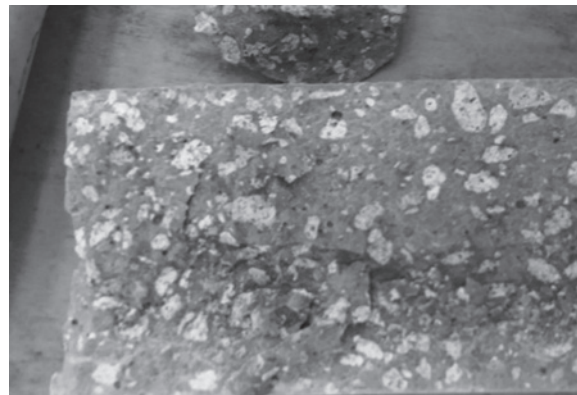
Fuente: Los autores

Figura 6. Ensayo a flexión



Fuente: Los autores.

Figura 9. Estructura interna del hormigón ligero.



Fuente: Los autores

Estudio de factibilidad de tubos plásticos para flujo a gravedad fabricados con material reciclado

Ortiz Moya E.; Madero Villalta G.; Lima Guamán P.

Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería Ciencias
Físicas y Matemática, Laboratorio de Investigaciones Hidráulicas, Quito, Ecuador
e-mail: prlima@uce.edu.ec

Información del artículo
Recibido: julio 2018
Aceptado: septiembre 2018

Resumen

Esta investigación presenta una alternativa para la fabricación de tuberías de alcantarillado en base a material reciclado de la ciudad de Quito. Se sustenta la calidad de las tuberías fabricadas con polietileno de alta densidad (PEAD) reciclado mediante los ensayos para tuberías de alcantarillado: densidad, rigidez anular, aplastamiento entre placas, resistencia al impacto, transferencia de sustancias contaminantes desde el tubo hacia el agua que circula por la tubería y agrietamiento por estrés ambiental, los cuales fueron hechos para diferentes proporciones entre material reciclado y material virgen.

Palabras clave: Polietileno de Alta Densidad, Reciclaje, Tubería para Alcantarillado, Pruebas de Calidad en Tuberías.

Abstract

This research presents an alternative for the manufacture of sewer pipes based on recycled material from the Quito city. The quality of the pipes manufactured with recycled high-density polyethylene (HDPE) is supported by the tests for sewer pipes: density, ring stiffness, crushing between plates, resistance to impact, transfer of pollutants from the pipe to the water that circulates through the pipeline, and cracking by environmental stress, which were made using different proportions between recycled material and virgin material.

Key Words: High density polyethylene, recycling, Sewer pipe. Quality Testing in Pipes.

Introducción

En el país y en la ciudad de Quito la producción de residuos sólidos es muy alta, especialmente de residuos plásticos, en mayor cantidad el Polietileno de Alta Densidad (PEAD). Estos residuos plásticos tardan mucho tiempo en degradarse, ocupando un espacio significativo en los rellenos sanitarios, disminuyendo así su capacidad y tiempo de operación. En la actualidad, en los rellenos sanitarios se clasifican los materiales con la finalidad de reciclarlos. Actualmente, el objetivo principal del reciclaje del PEAD es la fabricación de mangueras para ductos eléctricos, madera sintética de polietileno, contenedores pequeños, recipientes de varios tamaños, entre otros. Sin embargo, el porcentaje de PEAD recuperado frente al eliminado, es muy pequeño, lo que implica que el resto va a ocupar un espacio en los rellenos sanitarios. Este documento presenta la alternativa para la elaboración de tuberías de alcantarillado que cumplan con las normas vigentes de desempeño mecánico e hidráulico aplicadas a las tuberías fabricadas con materia prima virgen, para el reciclaje del PEAD.

Justificación

En la ciudad de Quito se ejecutan constantemente obras de alcantarillado en las cuales se evidencia el uso de tuberías de plástico de diferentes diámetros. Por ejemplo, durante los últimos tres años se han instalado en el Distrito Metropolitano de Quito 202 708 m de redes de alcantarillado [1].

En la figura 1 se aprecia el incremento de redes de alcantarillado instaladas con tuberías plásticas, lo que refleja la creciente necesidad de tuberías.

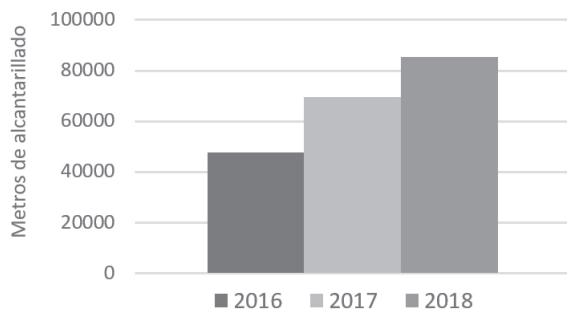


Figura 1. Redes de alcantarillado instaladas con tuberías plásticas en el DMQ

Marco Teórico

I. Residuos sólidos y reciclaje

Los residuos sólidos son producto de la relación del hombre con su medio, por lo que su mejor definición es: “Todo material descartado por la actividad humana, que no teniendo utilidad inmediata se transforma en indeseable” [2].

Los residuos sólidos, constituyen todos aquellos materiales desechados tras su vida útil, y que por sí solos carecen de valor económico. Se componen principalmente de desechos procedentes de materiales utilizados en la fabricación, transformación o utilización de bienes de consumo. Muchos de estos residuos son susceptibles de reaprovecharse o transformarse en otros productos con un correcto reciclado, llamándose por esta razón Residuos Sólidos Reciclables (RSR). Los principales “productores” de residuos sólidos están en las grandes ciudades, siendo las basuras domésticas las más voluminosas.

Los RSR, se componen de varios materiales como se indica en la figura 2, de los cuales se estima que se desecha alrededor de 53 925 kg de PEAD conocido también como “soplado”. [3].

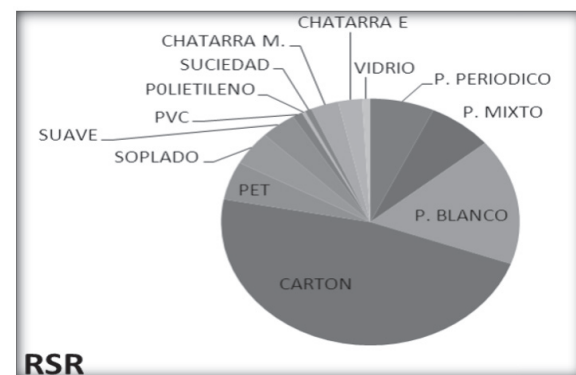


Figura 2. Composición de los RSR generados DMQ.

Por otro lado, la Constitución de la República del Ecuador, en los artículos 14 y 71, habla acerca de los derechos y necesidad de conservar el medio ambiente para garantizar así la sostenibilidad del buen vivir. Esto significa, que en el Ecuador se debe impulsar las actividades como el reciclaje. [4].

II. Polietileno

El etano es un gas compuesto, el cual, es un subproducto de la destilación del petróleo, o puede obtenerse a partir del gas natural. El etano a su vez es fraccionado (calentado hasta 800 °C y dividido en “etileno” e “hidrógeno”). El etileno es un gas compuesto de 2 átomos de carbono y 4 átomos de hidrógeno.

Los 2 átomos de carbono, en la molécula de etileno están unidos entre sí por un eslabón muy fuerte. Sin embargo, bajo ciertas condiciones, este eslabón se rompe, lo que permite que una molécula de etileno se una a otras para formar una cadena en la que todos los átomos de hidrógeno están ligados y cada uno tiene 2 átomos de hidrógeno. Una cadena de moléculas de etileno se llama polietileno [5].

El PEAD se caracteriza por su firmeza, bajo costo, fácil de moldear mediante procesos de extrusión y de inyección, y resistente a quebraduras. Se utiliza en un 50% para producir botellas de plástico en el mercado. Puede ser utilizado en productos como leche, agua y jugos de fruta; así como también para contener detergentes, blanqueadores, aceites automotrices, entre otros.

El PEAD es uno de los plásticos más fáciles de reciclar, y se lo encuentra muy fácilmente dentro de los RSR; por tal motivo, se propone a este material como base de estudio de este proyecto.

III. Tuberías de plástico

Las tuberías de plástico constituyen conductos que deben ser diseñados para flujo a superficie libre, pueden ser utilizados para alcantarillas sanitarias, pluviales o combinadas; estos pueden además ser utilizados para conducir caudales destinados a sistemas de riego y drenaje agrícolas, así como también drenaje vial. Siendo que los caudales de estos sistemas de conducción son muy variables, entonces los diámetros de los tubos para flujo a gravedad también deben tener diámetros muy variados.

El principal problema de diseñar sistemas tubo plástico - suelo y de instalarlos es el comportamiento elástico que presentan estos sistemas, lo

cual puede llevar a tener deformaciones inmediatas y a largo plazo de estos sistemas.

Para que los sistemas tubo – suelo sean estables se debe estudiar la capacidad del tubo para soportar las cargas a las cuales es sometido (rigidez anular), el comportamiento del suelo cuando es compactado en los alrededores del tubo (reacción del suelo). De esta manera luego de un correcto diseño e instalación, los sistemas para flujo a gravedad enterrados podrán soportar las cargas vivas generadas por el tráfico vehicular y peatonal, y las cargas muertas generadas por el peso del relleno final y las estructuras colocadas sobre estos sistemas.

El concepto de la rigidez anular se refiere a la carga vertical que es capaz de soportar un tubo libre (sin agua en circulación y sin suelo de relleno alrededor) sin perder la capacidad de recuperar su forma original, sin que su capacidad hidráulica se vea comprometida y sin que la hermeticidad de las juntas se pierda. Las normas NTE INEN 2360 y NTE INEN 2059 definen el valor máximo de deflexión como el 3% del diámetro nominal interno del tubo (DNI). En conclusión, la RIGIDEZ ANULAR de un tubo, se define como la carga expresada en kN/m² que debe ser aplicada a un tubo plástico para deformarse el 3% del DNI [6].

A partir del valor de la rigidez anular, se clasifica a los tubos en series como se indica en la tabla 1:

Tabla 1. Series de tubos de Polietileno de alta densidad

SERIE DEL TUBO						
1	2	3	4	5	6	7
RIGIDEZ ANULAR MÍNIMA (kN/m ²) método de ensayo ISO 9969						
0.25	0.50	1	2	3.94	7.88	15.63
RIGIDEZ ANULAR MÍNIMA (kN/m ²) método de ensayo DIN 16961						
2	4	8	16	31.5	63	125

Fuente: NTE INEN 2360

Materiales y Metodología

A. Pelletización de PEAD reciclado

Este proceso consiste en transformar el PEAD desechado en materia prima apta para la fabricación de cualquier artículo, en este caso tubos.

Para mejorar la resistencia del material a la exposición al sol se añade *carbón black* en una proporción en masa del 4%. En la figura 3 se muestra el proceso secuencial.

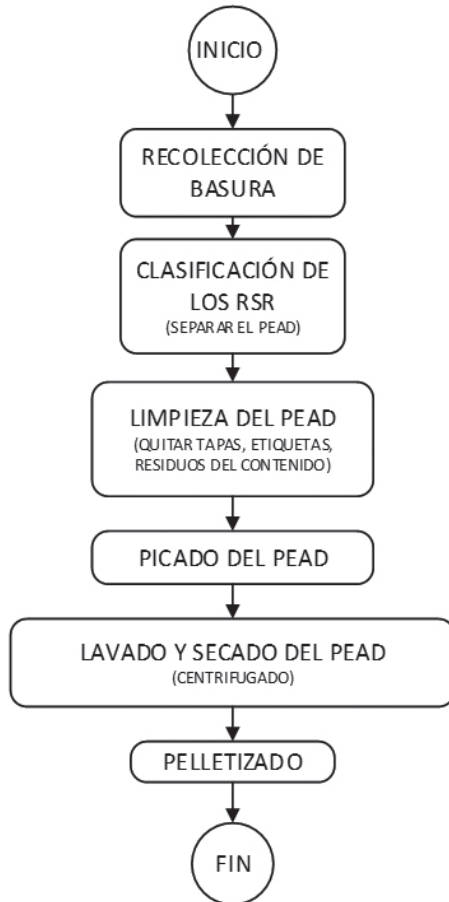


Figura 3. Proceso de Pelletización.



Figura 4. Material reciclado, Trituración del PEAD, y Centrifugado

B. Elaboración de muestras

El muestreo se realizó sobre mezclas de pellets, en diferentes proporciones de material reciclado con respecto a material virgen, con el fin de determi-

nar en cuál de ellas se obtiene el mejor comportamiento del producto terminado.

Tabla 2. Composición de la materia prima para la elaboración de muestras.

COMPOSICIÓN DEL MATERIAL	
PEAD VIRGEN	PEAD RECICLADO
100	0
75	25
50	50
25	75
0	100

La variable que define inicialmente los pellets es la densidad de la mezcla que se determina aplicando el principio de Arquímedes. Para cada composición de la materia prima se preparan muestras de 200, 600 y 1000 (mm) de diámetro para tener representatividad en las muestras, obteniendo un total de 15 muestras. El proceso de fabricación de los tubos inicia por la verificación de insumos, calibración y alimentación de tolva. A continuación, se realiza la extrusión, enfriamiento de perfil, control de espesores, ensamblado del tubo, registro de desperdicios y enfriamiento del tubo. Finalmente se realiza el corte del tubo y extracción de testigos para el control de calidad de las tuberías.

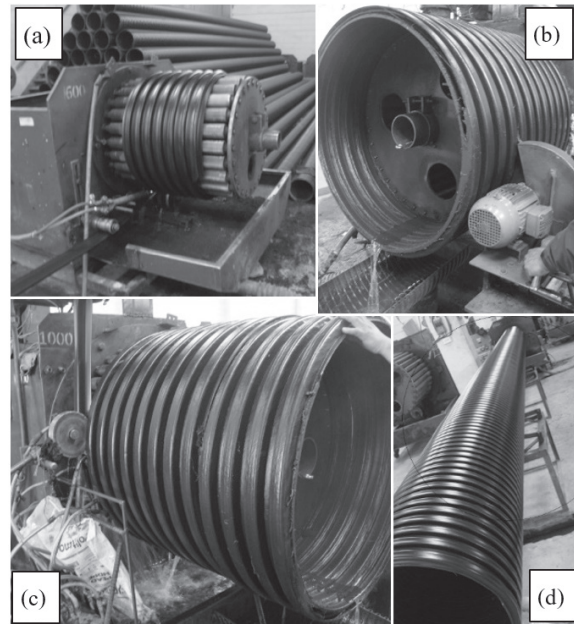


Figura 5. Fabricación de tuberías. (a)extrusión muestra de 600mm, (b)enfriamiento y control del espesor, (c)enfriamiento muestra de 1000mm, (d)ensamblado del tubo.

C. Pruebas de calidad en tuberías

Las pruebas de control de calidad realizadas se detallan a continuación:

1) Contaminación biológica

Se realiza el control del agua contenida por un lapso de 24 horas verificando que no existe migración de contaminantes bacteriológicos desde la muestra hacia el agua que está contenida en ellas.

2) Contaminación física y química

Se realiza el control del agua contenida por un lapso de 24 horas verificando que no existe migración de agentes químicos.

Los dos anteriores se comparan con los parámetros establecidos en el Libro VI del Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria. (TULAS) obteniendo como resultado que el agua analizada es apta para el consumo humano.

3) Rigidez Anular

Se realiza según la NTE INEN 2360, con una deformación radial igual al 3% del diámetro nominal.

Se calcula la rigidez anular con la siguiente ecuación:

$$RA = \left[0.0186 + 0.025 * \frac{y}{d} \right] \frac{F}{l * y} \quad (1)$$

Donde:

F: fuerza correspondiente al 3.0% de deflexión del tubo (kN)

l: longitud de la muestra de prueba (mm)

y: deflexión correspondiente al 3.0% (mm)

d: diámetro nominal interno (mm)

De tal manera que $\frac{y}{d} = 0.03$ (2)

4) Aplastamiento entre placas

Se realiza según la NTE INEN 2360. Se ejerce una carga directa a la muestra del tubo hasta que éste se deforme o aplaste el 40% del diámetro nomi-

nal; en esta prueba se verifica que no haya fallas en la tubería que podrían alterar su funcionamiento mecánico; estas fallas pueden ser:

- Fisura en el perfil.
- Fisura en la pared interna.
- Delaminación.
- Fluencia del material.
- Rotura del tubo.

5. Resistencia al impacto

Se realiza según la NTE INEN 2360. Se verifica que la muestra luego de ser sometida a un impacto con una energía especificada de acuerdo con el diámetro nominal interno no presente un daño definitivo en su estructura, tal como en el aplastamiento entre placas.

6) Agrietamiento por estrés ambiental

Se realiza según la norma ASTM D 3350. Consiste en mantener 10 muestras del material del tubo sumergidas en una sustancia agresiva a una temperatura de 100°C durante 200 horas sin que se evidencien daños en las muestras. Se considera que la prueba ha sido superada si el 80% de las muestras se presentan inalteradas luego de la prueba.

Las pruebas de contaminación biológica y contaminación química se realizan solamente sobre muestras de PEAD virgen y de PEAD reciclado.

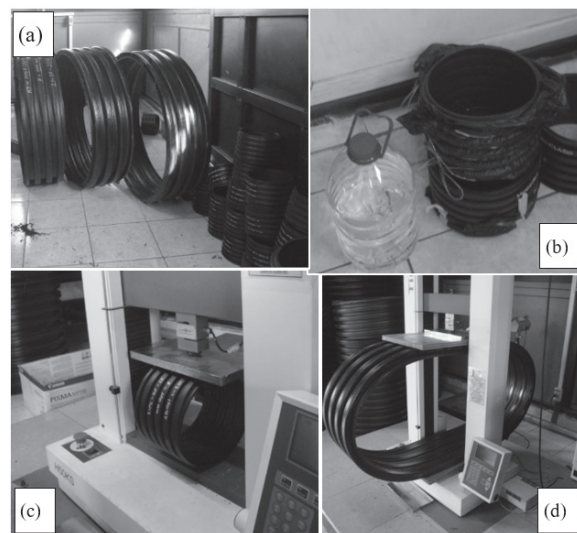


Figura 6. Pruebas en tuberías. (a) Testigos almacenados, (b) Es-tancamiento de agua, (c) Rigidez anular 600mm, (d) Aplastamiento entre placas 1000mm

Resultados

Las pruebas de calidad de las tuberías de PEAD reciclado se realizan según la Norma Técnica INEN 2360, obteniéndose los siguientes resultados:

A. Densidad del material

En la tabla 3 se muestran los resultados de los ensayos de densidad. Se evidencia que la densidad del material de los pellets es inversamente proporcional al porcentaje de material reciclado, teniendo como menor densidad 0.852g/cm^3 para una muestra preparada completamente con PEAD reciclado.

Tabla 3. Densidad de muestras de PEAD

%PEAD VIRGEN	%PEAD RECICL	Densidad (g/cm^3)		
		d1	d2	Promedio
100	0	0.940	0.944	0.942
75	25	0.953	0.927	0.936
50	50	0.906	0.905	0.906
25	75	0.883	0.887	0.886
0	100	0.865	0.843	0.852

La figura 7 muestra la disminución de la densidad al aumentar la cantidad de material reciclado.

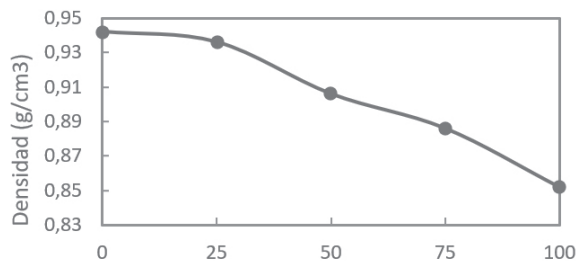


Figura 7. Variación de la densidad de los pellets de PEAD

B. Rigidez anular

Del ensayo de todas las muestras se obtienen los siguientes resultados para cada diámetro:

Tabla 4. Rigidez anular tuberías de diferentes diámetros

DIAM.	%PEAD VIRGEN	%PEAD RECICL	Espesores (mm)		Rigidez Anular
			e1	e3	
200 mm	100	0	3.49	4.85	7.31
200 mm	75	25	3.47	4.77	6.38
200 mm	50	50	3.56	4.57	7.32
200 mm	25	75	3.39	4.60	6.43
200 mm	0	100	3.29	4.63	8.17
600 mm	100	0	4.82	8.52	2.22
600 mm	75	25	4.73	8.69	2.29
600 mm	50	50	4.65	8.66	2.16
600 mm	25	75	4.70	8.59	2.13
600 mm	0	100	4.88	9.01	2.95
1000 mm	100	0	7.32	10.13	1.19
1000 mm	75	25	7.05	9.90	1.17
1000 mm	50	50	7.67	10.13	1.25
1000 mm	25	75	8.10	10.38	1.36
1000 mm	0	100	7.17	10.10	1.14

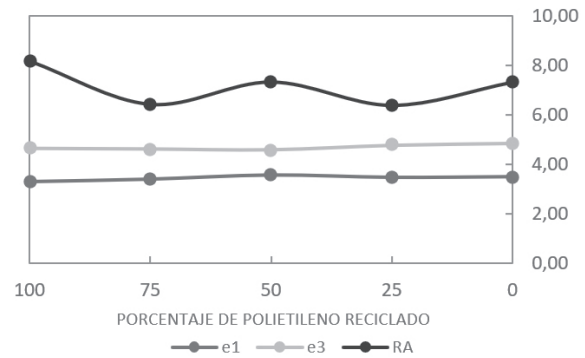


Figura 8. Variación de e1, e3 y rigidez anular tubería 200mm

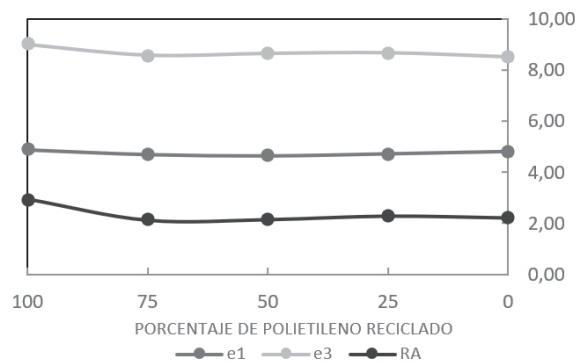


Figura 9. Variación de e1, e3 y rigidez anular tubería 600mm

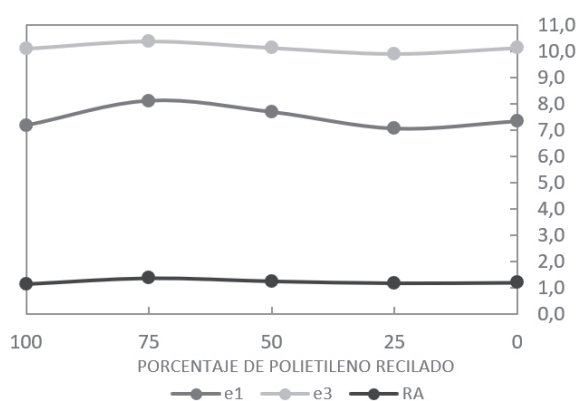


Figura 10. Variación de e1, e3 y rigidez anular tubería 1000mm

Al analizar los gráficos anteriores, se puede ver que la rigidez anular de las muestras ensayadas no presenta una variación muy grande en la rigidez anular; puede verse que incluso en los diámetros de 200 y 600 mm la rigidez anular es mayor para las muestras fabricadas con el 100% de material reciclado, obediendo esto a un proceso de cristalización del material al ser reciclado.

C. Aplastamiento entre placas

Las muestras ensayadas no presentan fallas en su estructura, lo que evidencia que todas las muestras sometidas a este ensayo tienen un desempeño estructural bueno.

D. Resistencia al impacto

Ninguna muestra sometida a esta prueba presenta una de las fallas especificadas. Por lo tanto, se considera que tanto las muestras fabricadas con material virgen como aquellas que fueron fabricadas con material reciclado superan esta prueba.

E. Agrietamiento por estrés ambiental.

Dos muestras correspondientes a una composición del 75% de material reciclado y 25% de material virgen se agrietaron en esta prueba. Se considera que incluso esta prueba es superada, ya que de esta composición fallaron 2 de 10 muestras ensayadas, es decir el 20%, lo cual está dentro de lo admisible por la norma.

Tabla 5. Determinación de variables físico-químicas

LÍNEA	CO ₂ soluble ppm	H ₂ S soluble ppm	Cloruros ppm	Conductividad μ-cm	Alcalinidad ppm	pH
Línea de transporte - descarga	100 - 130	0-0.5	20,000 - 50,000	1000 - 1500	200 - 250	5.5- 6.5
Agua de reinyección	400 - 500	0 - 0.5	50,000 - 70,000	1800 - 2500	200 - 250	5.5- 6.5

Conclusiones

La fabricación de tubos con PEAD reciclado es factible desde el punto de vista de desempeño mecánico del producto terminado, ya que supera muy bien las pruebas especificadas por las normas vigentes para estos tubos. Sin embargo, se debe realizar una investigación específica para determinar hasta cuántas veces se puede reprocesar o reciclar el PEAD sin que la cristalización del material afecte al comportamiento de los tubos.

Desde el punto de vista ambiental, el utilizar este tipo de materiales en la fabricación de tubos plásticos es prácticamente demandante, ya que se retirarían grandes cantidades de material plástico de los rellenos sanitarios.

Desde el punto de vista económico se evita la importación de materia prima, evitando pagar aranceles de nacionalización, teniendo una producción de tuberías con un componente de producción nacional al 100%.

Desde el punto de vista social se genera fuentes de trabajo para cumplir con todas las fases de los procesos inherentes a estas actividades, las mismas que pueden alcanzar niveles de organización y tecnificación muy elevados.

Referencias

- [1] EPMAPS, Departamento de Fiscalización, Información de obras de Alcantarillado ejecutadas en el DMQ, 2018.

- [2] G. Tchobanoglous, Gestión integrada de residuos sólidos: principios de ingeniería y cuestiones de gestión, New York; McGraw-Hill, 1993.
- [3] EMASEO, Caracterización de Residuos Sólidos a Nivel Cantonal, 2012.
- [4] Constitución de la República del Ecuador(2008). Ciudad Alfaro: Asamblea Constituyente.
- [5] J. Levi, reciclaje del polietileno de alta densidad (HDPE) para la fabricación de láminas, 1992. Disponible en: <http://www.dspace.espol.edu.ec>
- [6] NTE INEN 2360: Tubos de polietileno (PE) de pared estructurada e interior lisa para alcantarillado. Requisitos e inspección Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), 2004, Disponible en: <https://archive.org/details/ec.nte.2360.2004>

Normas para publicar en la revista Ingenio

Los artículos enviados a la revista Ingenio deben ajustarse a los siguientes criterios:

Aspectos generales

1. Podrán ser publicados todos los trabajos realizados por investigadores nacionales o extranjeros, una vez que cumplan los criterios de calidad científica requeridos.
2. La revista Ingenio publica artículos relacionados con investigaciones culminadas, revisiones bibliográficas, informes de desarrollo tecnológico, ensayos científicos, propuestas de modelos e innovaciones, productos de la elaboración de tesis de grado siempre que sean un aporte para el campo de la ciencia y tecnología.
3. La revista Ingenio publica trabajos originales e inéditos en español e inglés; es decir, no pueden haber sido publicados a través de ningún medio impreso ni electrónico.
4. Todo artículo será sometido a un riguroso proceso de arbitraje; la evaluación del artículo se hará conforme a criterios de originalidad, pertinencia, actualidad, aportes, rigurosidad científica y cumplimiento de las normas editoriales establecidas.
5. Por tratarse de una publicación arbitrada, el Consejo Editorial aprueba su publicación en base al concepto de pares especializados. La recepción de un documento no implica compromiso de publicación.
6. Es indispensable presentar una carta dirigida al Consejo Editorial autorizando a la revista Ingenio la publicación de la investigación, dando fe de la originalidad y de ser autor de la misma. Además, debe consignar constancia o credencial que conforme la adscripción a la Universidad o Centro de Investigación, tal como firma el artículo.
7. Como reconocimiento a su aporte, a cada autor se le remitirán dos ejemplares de la edición en la cual se publica el artículo.
8. El artículo propuesto se debe remitir a: vicedecanat.fing@uce.edu.ec

Requerimientos técnicos

9. Los artículos pueden estar escritos sobre Microsoft Word (.doc o .docx) o LATEX (.tex). Las plantillas a ser utilizadas pueden ser descargadas del sitio web de la revista (próximo a ser abierto).
10. Las ilustraciones y tablas deberán estar numeradas secuencialmente incluyendo una descripción explicativa para cada una. Las ecuaciones incluidas en el artículo deberán también estar numeradas.
11. Cuando presente el artículo, no intente diseñar el manuscrito. Use un tamaño de letra de 12 puntos en todo el manuscrito. No justifique el margen derecho.
12. Use espacio después de punto, comas y signos de interrogación.
13. Use doble "enter" al final de cada párrafo, título encabezamiento. No use "enter" en ningún otro lugar, deje al programa procesador de palabras romper automáticamente las líneas.
14. No centre encabezamientos o subencabezamientos y déjelos estar alineados a la izquierda.

15. Las tablas deben estar creadas en el mismo programa usado para el cuerpo del documento, pero deben estar guardadas en un archivo separado. Use tabuladores, no espacios, para crear columnas. Recuerde que el tamaño final de las páginas impresas será aproximadamente de 21 x 28 cm, entonces sus tablas deben estar diseñadas para ajustarse al espacio de la impresión final.

Instrucciones para preparación de manuscritos

16. El manuscrito no debe tener más de 5.000 palabras de extensión e incluir algunos o todos los siguientes elementos:

Encabezamiento

- Título
- Autores y su adscripción institucional con referencia al final de la primera hoja
- Resumen en español e inglés
- Palabras clave en español e inglés

Cuerpo del trabajo

- Introducción
- Fundamentación
- Definiciones
- Revisión de literatura
- Formulación de objetivos y establecimiento de hipótesis
- Materiales, fuentes y métodos
- Recopilación de datos
- Tratamiento de las variables
- Análisis estadístico
- Resultados
- Discusión
- Conclusiones
- Referencias bibliográficas
- Referencias
- Material adicional
- Elementos gráficos
- Tablas
- Agradecimientos

17. El artículo debe incluir en el encabezado: el “Título”, y a continuación se debe informar los datos de cada uno de los autores con nombre completo, y con referencia al final de la página el título universitario de pregrado y el de postgrado más alto obtenido, cargo e institución donde labora, números telefónicos (convencional y celular), la dirección y correo electrónico.

Si hay más de un autor, indicar el autor a quién se debe enviar la correspondencia.

18. El ‘Resumen’ y el ‘Abstract’ deben ser en español e inglés, respectivamente en todos los manuscritos; deben ser de un solo párrafo, corto y conciso (máximo de 250 palabras) y resumir los resultados del artículo. Deben ser informativos no indicativos.
19. Las palabras clave serán de tres a seis y representarán los principales temas del artículo y deberán ser colocadas al final del resumen.

20. Las secciones de “Introducción”, “Materiales y Métodos”, “Resultados”, “Discusión” y “Conclusiones” del artículo pueden estructurarse divididas en diferente forma. Si el artículo describe un estudio efectuado en un área particular, ésta debe ser escrita en subencabezamientos bajo “Materiales y Métodos”.
21. Los “Resultados”, “Discusión” y “Conclusiones”, pueden ser en algunos casos combinados.
22. Los “Agradecimientos” deben ser cortos, no deben exceder de un párrafo y se colocan al final del artículo.
23. Para la integración de citas dentro del artículo, debe usarse un corchete con un número en el interior, el mismo que hará referencia al documento de citación que debe constar en la bibliografía, y se irá colocando de forma ascendente. Cuando se trata de citas textuales se escribirá entre comillas con el texto en cursiva y a continuación se debe colocar el corchete con el número que corresponda siguiendo el formato de la IEEE. Información disponible en url <http://normas-ieee.com/>
24. Las “Referencias Bibliográficas” se colocan al final del texto, luego de la sección de conclusiones.
25. Las “Referencias Bibliográficas” se colocan ordenadas en orden de citación
26. Se debe verificar con cuidado que todas las citas colocadas en el texto, aparezcan en la lista de “Referencias Bibliográficas”. En la lista sólo deben aparecer las referencias que fueron utilizadas en el texto principal del trabajo, en las tablas o en las figuras, esto implica que no deben aparecer otras referencias aunque el autor las haya consultado durante la preparación del artículo.
27. La sección de “Referencias Bibliográficas” deberá incluirse en un archivo aparte sobre LATEX, proporcionando un archivo de información bibliográfica (.bib); o si el artículo está escrito sobre Microsoft Word u otro procesador de texto, añadir una tabla en Microsoft Excel (.xls o .xlsx). De esta manera el formato de la revista para las referencias se coloca automáticamente.

Arbitraje

27. El Comité Editorial remitirá al autor acuse de recibo de su trabajo en un plazo no mayor de cinco días luego de cerrada la convocatoria, y en un mes (que podría ampliarse en circunstancias extraordinarias hasta mes y medio) le remitirá la resolución final sobre el mismo.
28. Para ser publicado en la revista Ingenio, todo artículo será sometido a una fase de selección y a un proceso de dictamen. En la primera fase, el Comité Editorial seleccionará los artículos que correspondan a las áreas temáticas tratadas en la revista y que cumplan con los requisitos académicos indispensables de un artículo científico.
29. Las contribuciones serán sometidas al dictamen de dos especialistas en la materia correspondiente. Si existe contradicción entre ambos dictámenes, se procederá a una tercera evaluación que se considerará definitiva. El proceso de dictaminación será secreto y no se dará información nominal respecto a éste. Una vez emitidas las evaluaciones de los árbitros consultados, se enviará a los autores el acta de dictamen, y éstos tendrán un plazo no mayor de cinco días para entregar la versión final del artículo con las correcciones pertinentes si las hubiere.
30. El Comité Editorial de la revista verificará la versión final con base en los dictámenes e informará a los autores en qué número de la revista será publicado su trabajo. Las colaboraciones aceptadas se someterán a corrección de estilo y su publicación estará sujeta a la disponibilidad de espacio en cada número.



Esta edición que consta de 300 ejemplares en papel couché de 115 grs., se terminó de imprimir en enero de 2019, siendo Rector de la Universidad Central del Ecuador el señor Dr. Fernando Sempértegui Ontaneda, PhD. y Director(e) de la Editorial Universitaria, Lic. Julio Enríquez Cevallos.