



El bambú (*Guadua angustifolia* spp.) como alternativa de conducción para un sistema de riego por multicompuertas

Bamboo (*Guadua angustifolia* spp.) as a conduction alternative for a multi floodgates irrigation system

Marlon Monge Freile¹; Miguel Sánchez Delgado^{2*}; Leandro A. Huanca Velarde²;
Alfredo Moreno Llacza³

¹ Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador. Email: mmongef@uteq.edu.ec

² Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú. Email: msanchez@lamolina.edu.pe

³ Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú. Email: lhuanca@lamolina.edu.pe, amoreno@lamolina.edu.pe

Recepción: 27/09/2018; Aceptación: 05/01/2019

Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo el uso del bambú como tubería de conducción para un sistema de riego por multicompuertas en zonas donde abunda esta especie vegetal. Se analizaron las características hidráulicas como la rugosidad, velocidad y la máxima presión de trabajo en el laboratorio y campo; asimismo, se elaboró una guía para la selección de diámetros en condición de pendiente y carga de presión. El estudio de la rugosidad del material se obtuvo mediante la ecuación de Colebrook-White, una rugosidad absoluta de 0,0161 m, el coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams de 50 y el coeficiente de rugosidad de Manning de 0,0232. Se comparó los resultados de las pérdidas de carga estimadas por los tres métodos versus los valores obtenidos en el laboratorio y mediante indicadores estadísticos (error cuadrático medio y coeficiente de eficiencia), estos indicadores no presentaron diferencias significativas. También, a partir de velocidades superiores a 0,8 ms⁻¹, el comportamiento de la pérdida de carga aumenta potencialmente y se encontró que el bambú soporta presiones de hasta 30 PSI o 20 mca.

Palabras clave: bambú; coeficiente de rugosidad; presión de trabajo; pérdida de carga; velocidad, sistema de riego.

Forma de citar el artículo: Monge *et al.*, 2019. El bambú (*Guadua angustifolia* spp.) como alternativa de conducción para un sistema de riego por multicompuertas. Anales Científicos 80 (1): 240 - 252 (2019).

DOI: <http://dx.doi.org/10.21704/ac.v80i1.1391>

Autor de correspondencia (*): Miguel Sánchez Delgado. Email: msanchez@lamolina.edu.pe

© Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

Abstract

The present investigation aimed to use bamboo as a pipeline for a multi floodgates irrigation system in areas where this plant species abounds. Hydraulically characteristics, such as the roughness, speed, its maximum working pressure were determined in the laboratory and field; likewise, a guide was prepared for the selection of the bamboo's diameters under the conditions of slope and pressure load. The rugosity study of the material was carried out by the Colebrook - White equation, obtaining an absolute rugosity of 0,0161 meters, the Hazen - Williams roughness coefficient getting 50 and the Manning's roughness coefficient of 0,0232. The study also compared the results of load loss estimated by the three methods, versus the values obtained in the laboratory and statistical indicators (the mean square error and the coefficient of efficiency), these indicators did not present significant differences. Also, that from speeds higher than 0,8 ms⁻¹, the behavior of the load loss potentially increases and it was found that the bamboo supports pressures up to 30 PSI or 20 mwc.

Keywords: bamboo; coefficient of roughness; support pressure; load loss; irrigation system.

1. Introducción

El ritmo acelerado del cambio climático junto con el aumento de la población amenaza la seguridad alimentaria en el planeta. La agricultura es extremadamente vulnerable al cambio climático ya que el aumento de las temperaturas provoca la reducción de la producción de los cultivos deseados, los cambios en los regímenes de lluvias aumentan la probabilidad de fracaso de las cosechas a corto plazo y la reducción de la producción a largo plazo, amenazando la seguridad alimentaria mundial. Probablemente, las más afectadas sean las poblaciones de los países en vías de desarrollo, desde ya vulnerables y presas de la inseguridad alimentaria. En 2005, casi la mitad de la población económicamente activa de los países en vías de desarrollo (dos mil quinientos millones de personas) dependía de la agricultura para asegurar sus medios de vida. A la fecha, el 75% de los pobres del mundo viven en áreas rurales (Ifpri, 2009).

En muchas zonas agrícolas, durante los últimos años, las necesidades de riego tecnificado se han puesto de manifiesto, pero los altos costos que generan su instalación han generado que muchos agricultores se priven de sus beneficios, originando con esto la implementación de formas tradicionales de riegos, como el riego por superficie, que consiste en aplicar continuamente agua al surco hasta humedecerlo por completo alcanzando la profundidad de la zona radicular de las plantas, lo que genera un consumo excesivo de agua. Este sistema de riego tiene una eficiencia aproximada de tan solo el 30% (Murillo, 2008).

Es por ello la gran necesidad de implementar soluciones que amortigüen los efectos del cambio climático implementando sistemas de riego a bajo costo que estén dentro del alcance de los pequeños agricultores, y que a su vez sean eficientes en la conducción y distribución del agua de riego.

En todo proyecto de riego la parte más costosa, en términos económicos, son los materiales del mismo, siendo muchas veces inalcanzables para los pequeños agricultores, para ello se da como una alternativa de solución la utilización del bambú como material de conducción (Bambusa, 2015).

Se ha comprobado que el bambú ha sido utilizado en otros países, India y Tanzania, como material de conducción para el abastecimiento de agua potable y para el riego (Lipangile *et al.*, 1989).

Trabajos similares muestran la importancia de la determinación de los coeficientes de resistencia al flujo; como son los trabajos del factor de fricción en drenajes corrugados (Giustolisi *et al.*, 2008), determinación del coeficiente de rugosidad interna de la tubería de polietileno (Chipantasig, 2015) y determinación del coeficiente de Manning y de la rugosidad absoluta en tubería para alcantarillado ADS 600 mm (Ciacua, 2009).

El riego de multicompuertas es un sistema de conducción y distribución de agua de riego, por medio de tuberías livianas, fáciles de transportar e instalar, que trabajan a baja presión. Con este sistema se alcanzan altas eficiencias de aplicación, mediante él se eliminan completamente las pérdidas por infiltración en la cabecera del

surco donde se desea colocar la línea de conducción de bambú, que es la zona donde mayormente se da la mayor pérdida por percolación profunda. El sistema de riego por multicompuerta consiste en la instalación de tuberías de conducción y distribución instaladas en la superficie del terreno. El sistema de distribución consta de pequeños orificios que emiten caudal constante a cada surco de riego. La eficiencia de aplicación del sistema por multicompuertas ronda entre un 60%, variando en función de la textura y de la pendiente del terreno, lográndose una mayor uniformidad en el perfil de humedecimiento del suelo, menos malezas ya que solo se humedecen las áreas necesarias, se capta mayor cantidad de agua y se puede distribuir simultáneamente a distintos sectores (PSI, 2016).

La especie *Guadua angustifolia* es un cultivo que posee una altura del tallo que está entre 18 y 20 m, pudiendo llegar a 30 m, con diámetros que oscilan entre 15 a 20 cm. Para su óptimo crecimiento requiere de una temperatura entre los 20° y 26° C. Normalmente prospera a altitudes que no exceden los 2000 m s.n.m., siendo la óptima entre los 800 y 1600, sus requerimientos de lluvia son superiores a 1200 mm anuales (Carmioli, 2009).

Por lo tanto, el objetivo de esta investigación es utilizar el bambú como una alternativa de conducción y distribución para un sistema de riego por multicompuertas, identificando las presiones y caudales permisibles con que el bambú puede operar, así como su valor correspondiente de rugosidad. Mediante la obtención de estos parámetros se puede realizar diseños de sistemas de conducciones de bambú para dotar a los pequeños agricultores con manuales prácticos de fácil entendimiento para su construcción y con sus respectivos rangos de operación del bambú. Cabe mencionar que en la literatura especializada no existen valores para este tipo de material.

2. Materiales y métodos

Zona de estudio

La investigación se realizó en el laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica y en la parcela demostrativa del Departamento de Recursos Hídricos de la Facultad de Ingeniería Agrícola, de la Universidad Nacional Agraria la Molina (Unalm), localizada a una altura de 238 m s.n.m.

Determinación de la rugosidad

Las pruebas para la determinación de la rugosidad absoluta del bambú se hicieron en laboratorio utilizando diferentes diámetros internos de bambú (6 a 8 cm) y una longitud de cuatro metros aproximadamente. Esto se realizó para diez tramos de tubería de bambú.

Para la determinación del valor de rugosidad del bambú *Guadua angustifolia*, se analizaron diez tramos de tubería de bambú. Cada uno de estos tramos de tubería bambú fue sometido a distintos caudales que varió de 0,61 ls⁻¹ a 7,60 ls⁻¹, caudal máximo limitado por el tanque de cabeza constante.

Fabricación de las tuberías de bambú

Para la fabricación del orificio del bambú se realizó una perforación de los entrenudos, se elaboró una herramienta, con una varilla de acero de 12 mm de grosor de 2,5 m de largo, con la punta achatada y afilada.

Montaje de las tuberías de bambú

Los tramos de tubería de bambú se colocaron de manera horizontal sobre la base metálica del banco de pruebas para determinar las pérdidas de carga; los tramos se encontraban alimentados por un tanque de cabeza constante de dos metros de altura, el caudal fue regulado mediante una válvula de compuerta de PVC instalado a la salida de las tuberías de bambú.

Instalación de los piezómetros

Para medir la altura de presión en cada punto, se usaron piezómetros con su respectivo tablero de medición milimétrica, colocados en tres puntos, a lo largo de la tubería de bambú, separados entre ellos a un metro de distancia, siendo estos equidistantes, los piezómetros se instalaron al principio, al medio y al final de cada tramo de tubería de bambú.

El procedimiento rutinario se realizó para las diez tuberías de bambú, se realizaron 15 caudales distintos para cada una de las tuberías, estos caudales fueron regulados a través de la válvula de cierre instalada al final de cada tubería, obteniéndose diferentes caudales a medida que se cerraba la válvula, las medidas de la altura de presión de cada piezómetro fueron reflejadas sobre el tablero piezométrico.



Figura 1: Montaje de las tuberías de bambú

Método de cálculo para la determinación de la rugosidad

Cálculo de la pérdida de carga (hf)

Teniendo en cuenta que en las pruebas realizadas se instalaron tres piezómetros por tramo de bambú, se realizó un promedio de las diferencias de cargas entre los 3 piezómetros. Este procedimiento se realizó para los 15 caudales para cada tubería de bambú.

$$hf = \frac{\left(\frac{P1}{Y} - \frac{P2}{Y}\right) + \left(\frac{P2}{Y} - \frac{P3}{Y}\right)}{2} \quad (1)$$

Donde hf : pérdida de carga (m)

$\frac{P1}{y}$, $\frac{P2}{y}$, $\frac{P3}{y}$: carga de presión 1,2 y 3 (m)

Cálculo del caudal transcurrido por la tubería (Q)

Para la obtención del caudal que circulaba por la tubería, se realizó midiendo la carga "h" sobre la cresta del vertedero al banco de tuberías a través de la ecuación hallada anteriormente para el vertedero.

$$Q = 0.00004 * h^{2.4039} \quad (2)$$

Donde Q: caudal (ls⁻¹) h: carga sobre la cresta del vertedero (m)

Cálculo de la velocidad del flujo (V)

Conocido el caudal obtenido a través del vertedero, así como su respectivo diámetro, se procedió a calcular la velocidad del flujo dado en las tuberías de bambú, mediante la siguiente expresión

$$V = \frac{Q}{A} \quad (3)$$

Cálculo del número de Reynolds (Re)

Conociendo la velocidad que circulaba por la tubería de bambú, el diámetro y la temperatura del agua, se procedió a calcular el Número de Reynolds, a través de la siguiente expresión:

$$Re = \frac{V * D}{\nu} \quad (4)$$

La temperatura del agua medida en el laboratorio fue de 20° C, obteniéndose una viscosidad cinemática de 1,02 x 10⁻⁶ m²/s, la cual fue utilizada en los respectivos cálculos.

Cálculo del factor de fricción (f)

La ecuación de Darcy -Weisbach permitió calcular el factor de fricción a partir de datos geométricos de la tubería (longitud y diámetro). El factor de fricción se calculó con la siguiente expresión:

$$f = \frac{Hf}{\frac{L * V^2}{D * 2g}}$$

Cálculo de la rugosidad del bambú

Una vez conocidas las pérdidas de energía en cada tramo, se procedió a calcular la rugosidad absoluta de las tuberías mediante el uso de la ecuación de Darcy -Weisbach en conjunto con la ecuación de Colebrook -White, así como el coeficiente de rugosidad “C” de Hazen-Williams y el coeficiente de rugosidad de Manning “n”, que fueron calculados a través de las siguientes ecuaciones.

Ecuación de Colebrook -White

Mediante la ecuación de Colebrook-White se determinó el valor de la rugosidad absoluta para cada una de las pruebas realizadas.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{k_s}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (5)$$

Ecuación de Hazen-Williams (C)

$$C = \frac{V}{0.355} * D^{-0.63} * hf^{-0.54} \quad (6)$$

Ecuación de Manning (n)

$$n = \frac{1}{V} \left(\frac{D}{4} \right)^{2/3} hf^{1/2} \quad (7)$$

Indicadores de ajustes para la obtención de la rugosidad

Obtenido los valores de rugosidad a través de la ecuación de Colebrook-White y los coeficientes tanto para Hazen-Williams, como para Manning, realizados para cada tramo de tubería de bambú, se sometieron a un análisis estadístico, tales como la media, la desviación estándar, el coeficiente de variación, el error cuadrático medio y el coeficiente de eficiencia “CE”, indicadores estadísticos muy utilizados para validar trabajos experimentales (Pazmiño *et al.*, 2017).

Perminación de la máxima presión permisible y el rango de velocidades recomendables para el dimensionamiento de conducciones de bambú

Para la obtención de la máxima presión

de trabajo, se buscó determinar la máxima presión permisible del sistema, identificando los puntos vulnerables, y se realizó un análisis para determinar los caudales recomendados para el bambú en función de la velocidad del flujo y la pérdida de carga.

Método de cálculo para determinar la máxima presión permisible en el sistema de conducción de bambú

Se tuvo como objetivo conocer el punto máximo de presión donde se dan las fugas y, por tanto, la falla del sistema de conducción. Lippert, citado por De Almeida *et al.* (2000), estudiando el uso del bambú en la variedad *Guadua angustifolia* como conducto forzado, resultó ser viable su uso hasta 480,5 kPa de presión interna y en la variedad *Bambusa vulgaris* alcanzó una presión interna de hasta 1500 kPa sin rotura. Por experiencia práctica, se conoce que los bambús soportan altas presiones, entre 350 – 800 kPa de presión interna evitando el problema de fugas en las uniones. Se utilizaron cuatro muestras a través de dos tuberías que simulaban un sistema de conducción, cada una de estas tuberías tenía tres tramos de bambú unidos con una longitud aproximada de 1 m por cada tramo, teniendo en sí un total de 3 metros de longitud. El procedimiento se detalla a continuación.

Método de prueba de resistencia a la presión

Instaladas las tuberías, se procedió al llenado completo de agua, para ser sometidas a distintas presiones, a través de un compresor, estas presiones fueron variando hasta alcanzar una presión constante que se mantuvo durante 48 horas.

Rangos de caudales a través de la pendiente del terreno

Para estas condiciones se hizo un cuadro de caudales usando diferentes diámetros y pendientes y que servirá como guía para agricultores que desconozcan el dimensionamiento de tuberías. Las pendientes analizadas fueron de 0,5%, 1%, 1,5%, 2%, 2,5%, 3% y 4%.



Figura 2: Instalación del sistema de riego de bambú en el campo experimental %

Rangos de caudales para diferentes cargas de presión constante

Para facilitar la implementación del bambú y un fácil entendimiento, se realizó un cuadro para diferentes cargas de presión, donde se describe el posible caudal de entrega del bambú en función de su diámetro, presión y longitud de la línea de bambú. Esta se realizó para presiones de 5, 10 y 15 metros de columna de agua (mca) y para longitudes de 50, 100, 150 y 300 metros. Valores similares al trabajo realizado por [De Almeida et al. \(2000\)](#).

3. Resultados y discusión

Determinación de la rugosidad del bambú para su utilización como material de conducción de agua

Pérdida de carga

La pérdida de carga determinada en el banco de tuberías en el laboratorio, varió de 0,25 a 33,25 centímetros por metro lineal, dado para un rango de caudales de 0,61 ls^{-1} y 7,60 ls^{-1} .

La [Figura 3](#) muestra la pérdida de carga en función de la velocidad del flujo, donde se puede observar sus respectivos rangos de velocidades obtenidos en laboratorio.

Se puede observar en la [Figura 4](#) el rango del factor de fricción que se dio en las tuberías de bambú, estos oscilan entre 0,09 a 0,3, con una media de 0,1618 con desviación estándar de 0,04 y coeficiente de variación ($\text{CV} = 26\%$), como era de esperar, los valores de fricción más alto corresponden a los tramos de bambú que presentaron mayores pérdidas de carga.

Además, se observa que existen dos concentraciones en los puntos de fricción, como lo son las tuberías 2, 7, 10, 4 y 6 que presentaron valores más elevados, y las tuberías 5, 3, 1, 8 y 9 que presentaron valores más bajos de fricción, esto se debe al acabado de las perforaciones de los entrenudos, ya que fueron hechas manualmente, y por ende es casi imposible de cuantificar la perfección de sus acabados ya que pequeñas alteraciones obedecen a diferentes valores, fue por ello que se consideró como una sola muestra.

El valor del número de Reynolds varió de $1,15 \times 10^4$ a $1,23 \times 10^5$, encontrándose siempre en flujo turbulento. En la [Tabla 1](#), se detallan los valores de la rugosidad media determinada para los 10 tramos de tubería de bambú, utilizando las fórmulas de Colebrook-White, Hazen-Williams y Manning.

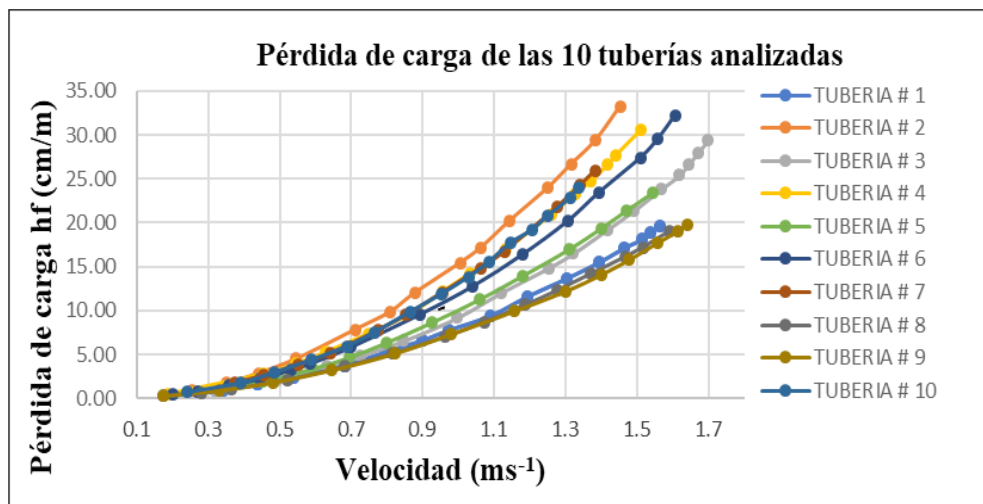


Figura 3: Pérdida de carga en función de la velocidad de los 10 tramos de bambú

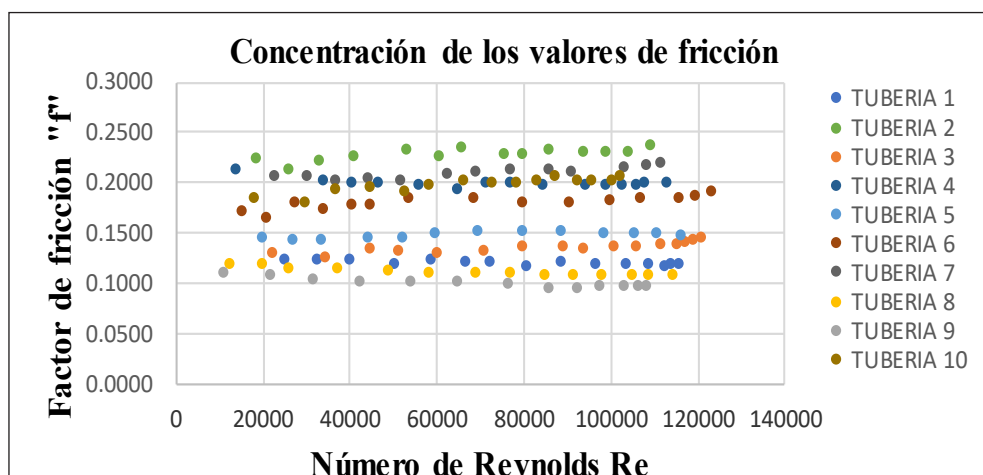


Figura 4: Rango de fricción de los 10 tramos de bambú

A partir de la velocidad aproximada a $0,8 \text{ ms}^{-1}$, velocidad analizada posteriormente en esta investigación, existe una mayor dispersión para cada tubería de bambú, como se puede observar claramente un comportamiento muy distinto de pendientes entre la tubería dos y la nueve, donde la tubería dos tiene una pendiente mucho más pronunciada que la tubería nueve.

Factor de fricción “f” (adimensional) determinada mediante datos de laboratorio

A través de los datos obtenidos en laboratorio se pudieron determinar los respectivos valores del factor de fricción “f” (0,0942 – 0,2349), obtenidos a través de la ecuación de Darcy-Weisbach, esto fue realizado para cada caudal de prueba para un total de 143 pruebas.

Se puede observar en la [Figura 4](#) el rango del factor de fricción que se dio en las tuberías de bambú, estos oscilan entre 0,09 a 0,3, con una media de 0,1618 con desviación estándar de 0,04 y coeficiente de variación (CV = 26%), como era de esperar, los valores de fricción más alto corresponden a los tramos de bambú que presentaron mayores pérdidas de carga.

Además, se observa que existen dos concentraciones en los puntos de fricción, como lo son las tuberías 2, 7, 10, 4 y 6 que presentaron valores más elevados, y las tuberías 5, 3, 1, 8 y 9 que presentaron valores más bajos de fricción, esto se debe al acabado de las perforaciones de los entrenudos, ya que fueron hechas manualmente, y por ende es casi imposible de cuantificar la perfección de sus acabados ya que pequeñas alteraciones obedecen a diferentes valores, fue por ello que se consideró como una sola muestra.

El valor del número de Reynolds varió de $1,15 \times 10^4$ a $1,23 \times 10^5$, encontrándose siempre en flujo turbulento. En la [Tabla 1](#), se detallan los valores de la rugosidad media determinada para los 10 tramos de tubería de bambú, utilizando las fórmulas de Colebrook-White, Hazen-Williams y Manning.

Tabla 1: Coeficientes de rugosidad de las tuberías de bambú

| Tubería N° | Diámetro (cm) | Rugosidad Ks (m) | Factor (C) Hazen Williams | Manning (n) |
|------------|---------------|------------------|---------------------------|-------------|
| 1 | 7,51 | 0,0099 | 56 | 0,0201 |
| 2 | 7,60 | 0,0251 | 40 | 0,0278 |
| 3 | 7,20 | 0,0115 | 52 | 0,0212 |
| 4 | 7,57 | 0,0211 | 43 | 0,0259 |
| 5 | 7,62 | 0,0139 | 51 | 0,0223 |
| 6 | 7,76 | 0,0189 | 46 | 0,0248 |
| 7 | 8,17 | 0,0243 | 42 | 0,0270 |
| 8 | 7,26 | 0,0083 | 60 | 0,0192 |
| 9 | 6,69 | 0,0064 | 63 | 0,0179 |
| 10 | 7,73 | 0,0212 | 43 | 0,0259 |
| Promedio | | 0,0161 | 50 | 0,0232 |
| Desviación | | 0,0069 | 8,05 | 0,0035 |
| CV (%) | | 37,61 | 16,19 | 15,09 |

Se encontraron los valores promedios de rugosidad absoluta con $K_s = 0,0161$ m así como la media del coeficiente de rugosidad, con $C = 50$ por el método de Hazen-Williams y la media de $n = 0,0232$ por el método de Manning. Los valores determinados son comparados con otros materiales de conducción, asemejándose al hierro fuertemente corroído que tiene un coeficiente de rugosidad de $C = 40 - 50$ ([Rocha, 2007](#)).

Comparando los valores de rugosidad del bambú (*Guadua angustifolia*) encontrados en esta investigación con los valores encontrados por [De Almeida et al. \(2000\)](#), encontraron para el bambú gigante (*Dendrocalamus giganteus*), un coeficiente de rugosidad por el método de Hazen-Williams $C = 43$ y por el método de Manning $n = 0,027$, siendo estos valores un tanto mayores para los encontrados en esta investigación, teniendo en cuenta que son dos especies distintas y los mínimos cambios en los acabados de los entrenudos varían sus valores de rugosidad.

Análisis comparativo de la pérdida de carga medidas en laboratorio con los estimados por los métodos de Darcy-Weisbach, Hazen-Williams y Manning

Se realizó una comparación de la pérdida de carga medida en laboratorio, con la pérdida de carga estimada a partir de las ecuaciones de Darcy-Weisbach, Hazen-Williams y Manning. Usando el coeficiente de eficiencia "CE" y el error cuadrático medio "ECM" cuyos resultados como indicadores de ajustes aplicados a los diez tramos de tuberías de bambú, se muestran en la [Tabla 2](#).

Tabla 2: Media de los errores cuadráticos medios y los coeficientes de eficiencia de las diez tuberías analizadas

| | Hazen-Williams | Manning | Darcy-Weisbach |
|--------------|----------------|---------|----------------|
| Media de ECM | 3,79 | 4,07 | 4,35 |
| Media de CE | 0,76 | 0,75 | 0,73 |

Observamos que, a través de las fórmula de Darcy-Weisbach, se aproximó más para las tuberías que presentaron valores de rugosidad más elevados, mientras que la

fórmula de Hazen-William se aproximó más para tuberías menos rugosas y el método de Manning mantuvo valores muy cercanos al método de Darcy-Weisbach, representando mejor a las tuberías rugosas.

Además, la media del coeficiente de eficiencia encontrado es de 0,76 para el método de Hazen-Williams, 0,75 para Manning y 0,73 para el método de Darcy-Weisbach. Se observa que no existe una diferencia significativa entre los resultados de los métodos analizados.

Determinación de la máxima presión permisible y velocidad recomendable para el dimensionamiento de conducciones de bambú

Determinación de la máxima presión de soporte del bambú como sistema

Se puede observar que, en la simulación a pequeña escala del bambú como sistema de conducción, soporta presiones considerables, incluso para la instalación de aspersores medianos, que se encuentran dentro de ese rango de presión de trabajo.

Tabla 3: Máxima presión de soporte del bambú como sistema.

| Prueba | Presión (PSI) | Tiempo (Horas) |
|-----------|---------------|----------------|
| Sistema 1 | 32 | 48 |
| Sistema 2 | 30 | 48 |

Se pudo observar que la falla del sistema de conducción no se dio propiamente en el bambú, sino en las uniones de los tramos, donde es la zona más vulnerable de la conducción.

Análisis de velocidades recomendables para el dimensionamiento de tuberías de bambú

Las pérdidas de carga de las diez tuberías analizadas son muy similares hasta velocidades cercanas a 0,8 ms⁻¹, después de esta velocidad se observa una mayor dispersión en sus valores y un aumento significativo en la pendiente de la curva, este comportamiento está en función de la calidad del acabado de los entrenudos, haciendo que a velocidades superiores a 0,8 ms⁻¹ aproximadamente, las pérdidas de carga se elevan potencialmente obteniéndose valores distintos para cada bambú (Figura 5).

Los Rangos de aplicabilidad de la tubería de bambú.

Se elaboraron cuadros de guía para la selección de diámetros, en función de los posibles caudales que podrían darse para líneas de abastecimiento, usando la pendiente como medio de presión y por medio de presión de cabeza constante a través de tanques elevados.

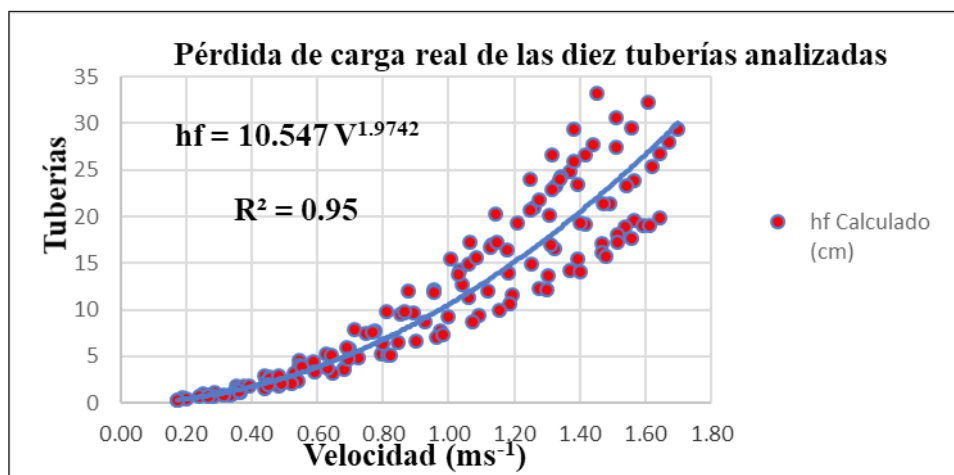


Figura 5: Análisis de velocidad recomendada para el diseño de bambú

Rango de caudales para conducciones de bambú en función de la pendiente

En la [Tabla 4](#) se detallan los posibles caudales, en función del diámetro y la pendiente, se seleccionó para una gama de diámetros de 6 a 10 centímetros de diámetro interno, para un rango de pendientes de 0,5, 1, 1,5, 2, 2,5, 3 y 4%.

Rangos de aplicabilidad de la tubería de bambú.

Se elaboraron cuadros de guía para la selección de diámetros, en función de los posibles caudales que podrían darse para líneas de abastecimiento, usando la pendiente como medio de presión y por medio de presión de cabeza constante a través de tanques elevados.

Rango de caudales para conducciones de bambú en función de la pendiente

En la [Tabla 4](#) se detallan los posibles caudales, en función del diámetro y la pendiente, se seleccionó para una gama de

diámetros de 6 a 10 centímetros de diámetro interno, para un rango de pendientes de 0,5, 1, 1,5, 2, 2,5, 3 y 4%.

En la [Tabla 4](#) se observa que a mayor pendiente y diámetro aumenta potencialmente el caudal; por tanto, será una guía para los agricultores, se podrá seleccionar el diámetro interno del bambú, en función del caudal necesario para sus cultivos, teniendo en cuenta que esto se da únicamente para líneas de abastecimiento colocadas a favor de la pendiente.

Rango de caudales para conducciones de bambú para presiones constantes

En las [Tablas 5 y 6](#) se observan los posibles caudales que podrían darse para presiones efectivas de 5 y 10 mca y para longitudes de 50, 100, 150, 200 y 300 metros.

A diferencia, en condiciones de pendiente, la carga de cabeza constante puede ser usada para terrenos ondulantes, hasta para sistemas de riego en contra de la pendiente.

Tabla 4: Selección de diámetro en función de la pendiente

| Diámetro (cm) | S % | Q (ls ⁻¹) | S % | Q (ls ⁻¹) | S % | Q (ls ⁻¹) | S % | Q (ls ⁻¹) | S % | Q (ls ⁻¹) | S % | Q (ls ⁻¹) | S % | Q (ls ⁻¹) |
|---------------|-----|-----------------------|-----|-----------------------|-----|-----------------------|-----|-----------------------|-----|-----------------------|-----|-----------------------|-----|-----------------------|
| 6,00 | | 0,49 | | 0,70 | | 0,85 | | 0,98 | | 1,10 | | 1,20 | | 1,39 |
| 6,25 | | 0,55 | | 0,78 | | 0,96 | | 1,11 | | 1,24 | | 1,35 | | 1,56 |
| 6,50 | | 0,62 | | 0,87 | | 1,07 | | 1,24 | | 1,38 | | 1,52 | | 1,75 |
| 6,75 | | 0,69 | | 0,97 | | 1,19 | | 1,38 | | 1,54 | | 1,69 | | 1,95 |
| 7,00 | | 0,76 | | 1,08 | | 1,32 | | 1,53 | | 1,71 | | 1,87 | | 2,16 |
| 7,25 | | 0,84 | | 1,19 | | 1,46 | | 1,69 | | 1,89 | | 2,07 | | 2,39 |
| 7,50 | | 0,93 | | 1,31 | | 1,61 | | 1,86 | | 2,08 | | 2,28 | | 2,63 |
| 7,75 | | 1,02 | | 1,44 | | 1,77 | | 2,04 | | 2,28 | | 2,50 | | 2,89 |
| 8,00 | 0,5 | 1,12 | 1,0 | 1,58 | 1,5 | 1,93 | 2,0 | 2,23 | 2,5 | 2,50 | 3,0 | 2,73 | 4,0 | 3,16 |
| 8,25 | | 1,22 | | 1,72 | | 2,11 | | 2,43 | | 2,72 | | 2,98 | | 3,44 |
| 8,50 | | 1,32 | | 1,87 | | 2,29 | | 2,65 | | 2,96 | | 3,24 | | 3,74 |
| 8,75 | | 1,44 | | 2,03 | | 2,49 | | 2,87 | | 3,21 | | 3,52 | | 4,06 |
| 9,00 | | 1,56 | | 2,20 | | 2,69 | | 3,11 | | 3,48 | | 3,81 | | 4,40 |
| 9,25 | | 1,68 | | 2,38 | | 2,91 | | 3,36 | | 3,76 | | 4,11 | | 4,75 |
| 9,50 | | 1,81 | | 2,56 | | 3,13 | | 3,62 | | 4,05 | | 4,43 | | 5,12 |
| 9,75 | | 1,95 | | 2,75 | | 3,37 | | 3,89 | | 4,35 | | 4,77 | | 5,50 |
| 10,00 | | 2,09 | | 2,95 | | 3,62 | | 4,18 | | 4,67 | | 5,12 | | 5,91 |

Tabla 5: Selección de diámetro para presión de 5 mca

| Diámetro (cm) | H Carga (m) | L (m) | Caudal (ls ⁻¹) | L (m) | Caudal (ls ⁻¹) | L (m) | Caudal (ls ⁻¹) | L (m) | Caudal (ls ⁻¹) | L (m) | Caudal (ls ⁻¹) |
|---------------|-------------|-------|----------------------------|-------|----------------------------|-------|----------------------------|-------|----------------------------|-------|----------------------------|
| 6,00 | | | 2,20 | | 1,56 | | 1,27 | | 1,10 | | 0,90 |
| 6,25 | | | 2,47 | | 1,75 | | 1,43 | | 1,24 | | 1,01 |
| 6,50 | | | 2,76 | | 1,96 | | 1,60 | | 1,39 | | 1,14 |
| 6,75 | | | 3,07 | | 2,18 | | 1,79 | | 1,55 | | 1,26 |
| 7,00 | | | 3,41 | | 2,42 | | 1,98 | | 1,72 | | 1,40 |
| 7,25 | | | 3,77 | | 2,68 | | 2,19 | | 1,90 | | 1,55 |
| 7,50 | | | 4,15 | | 2,95 | | 2,41 | | 2,09 | | 1,71 |
| 7,75 | | | 4,55 | | 3,24 | | 2,65 | | 2,29 | | 1,88 |
| 8,00 | 5 | 50 | 4,98 | 100 | 3,54 | 150 | 2,90 | 200 | 2,51 | 300 | 2,05 |
| 8,25 | | | 5,43 | | 3,86 | | 3,16 | | 2,74 | | 2,24 |
| 8,50 | | | 5,90 | | 4,20 | | 3,44 | | 2,98 | | 2,44 |
| 8,75 | | | 6,40 | | 4,56 | | 3,73 | | 3,24 | | 2,64 |
| 9,00 | | | 6,93 | | 4,94 | | 4,04 | | 3,50 | | 2,86 |
| 9,25 | | | 7,48 | | 5,33 | | 4,36 | | 3,78 | | 3,09 |
| 9,50 | | | 8,06 | | 5,75 | | 4,70 | | 4,08 | | 3,34 |
| 9,75 | | | 8,67 | | 6,18 | | 5,06 | | 4,39 | | 3,59 |
| 10,00 | | | 9,30 | | 6,64 | | 5,43 | | 4,71 | | 3,85 |

Tabla 6: Selección de diámetro para presión de 10 mca

| Diámetro (cm) | H Carga (m) | L (m) | Caudal (ls ⁻¹) | L (m) | Caudal (ls ⁻¹) | L (m) | Caudal (ls ⁻¹) | L (m) | Caudal (ls ⁻¹) | L (m) | Caudal (ls ⁻¹) |
|---------------|-------------|-------|----------------------------|-------|----------------------------|-------|----------------------------|-------|----------------------------|-------|----------------------------|
| 6,00 | | | 3,11 | | 2,20 | | 1,80 | | 1,56 | | 1,28 |
| 6,25 | | | 3,49 | | 2,48 | | 2,03 | | 1,76 | | 1,43 |
| 6,50 | | | 3,90 | | 2,77 | | 2,27 | | 1,96 | | 1,61 |
| 6,75 | | | 4,35 | | 3,09 | | 2,53 | | 2,19 | | 1,79 |
| 7,00 | | | 4,82 | | 3,43 | | 2,80 | | 2,43 | | 1,98 |
| 7,25 | | | 5,33 | | 3,79 | | 3,10 | | 2,68 | | 2,19 |
| 7,50 | | | 5,86 | | 4,17 | | 3,41 | | 2,96 | | 2,42 |
| 7,75 | | | 6,43 | | 4,58 | | 3,74 | | 3,24 | | 2,65 |
| 8,00 | 10 | 50 | 7,04 | 100 | 5,01 | 150 | 4,10 | 200 | 3,55 | 300 | 2,90 |
| 8,25 | | | 7,67 | | 5,46 | | 4,47 | | 3,87 | | 3,17 |
| 8,50 | | | 8,35 | | 5,94 | | 4,86 | | 4,22 | | 3,45 |
| 8,75 | | | 9,06 | | 6,45 | | 5,28 | | 4,58 | | 3,74 |
| 9,00 | | | 9,80 | | 6,98 | | 5,71 | | 4,95 | | 4,05 |
| 9,25 | | | 10,58 | | 7,54 | | 6,17 | | 5,35 | | 4,38 |
| 9,50 | | | 11,40 | | 8,13 | | 6,65 | | 5,77 | | 4,72 |
| 9,75 | | | 12,26 | | 8,74 | | 7,16 | | 6,21 | | 5,08 |
| 10,00 | | | 13,16 | | 9,38 | | 7,69 | | 6,67 | | 5,45 |

4. Conclusiones

El bambú como material de conducción, es una alternativa más económica y eficiente para agricultores de bajos recursos económicos.

Se encontró el respectivo valor de rugosidad absoluta del bambú K_s , valor necesario para el método de Darcy-Weisbach, así como el coeficiente de rugosidad "C" por el método de Hazen-Williams y el coeficiente de rugosidad "n" por el método de Manning, encontrándose un $K_s = 0,0161$ m, $C = 50$ y $n = 0,0232$. Estos coeficientes podrán ser usados para el diseño de tuberías de bambú, utilizando los métodos ya mencionados.

Se evaluó el desempeño de los tres métodos por Hazen-Williams, Manning y Darcy-Weisbach, realizando una comparación entre los valores medidos en laboratorio, con los valores estimados por los tres métodos. Se encontró a través de indicadores estadísticos, como el error cuadrático medio "ECM" y el coeficiente de eficiencia "CE", que los tres métodos dan valores similares, aunque el método de Hazen-Williams obtuvo una mayor representación a los valores reales obteniendo un ECM = 3,79 y un CE = 0,76, seguido por el método de Manning, obteniendo un ECM = 4,07 y un CE = 0,75 y, por último, el método de Darcy-Weisbach obteniéndose un ECM = 4,35 y un CE = 0,73.

A partir de velocidades superiores a $0,8 \text{ ms}^{-1}$ aproximadamente, se produce un cambio en el comportamiento de la pérdida de carga, aumentando potencialmente, dando resultados muy diferentes para cada bambú, por ello se realizó un análisis para evaluar la eficiencia de los tres métodos, para velocidades menores a $0,80 \text{ ms}^{-1}$, encontrándose valores mucho más aceptables y representativos. El método Hazen-Williams obtuvo un error cuadrático medio ECM = 0,99 y un coeficiente de eficiencia CE = 0,983, el método de Manning obtuvo un ECM = 1,03 y un CE = 0,981 y el método de Darcy-Weisbach, un ECM = 1,10 y un CE = 0,978. Siendo estos valores muy representativos y de un alto valor de confianza en su aplicación.

Mediante pruebas en el laboratorio, se encontró que el bambú soporta presiones hasta de 30 PSI o 20 mca aproximadamente. A partir de presiones superiores se da la falla

en el sistema por fugas en las uniones.

Se instaló una parcela demostrativa en los campos de la Unalm, para la evaluación del sistema, donde fue sometida a una presión constante de 25 PSI, máxima presión que otorgaba una bomba de 5HP, se evaluó el proceso de curación para su preservación en el medio, tras un análisis de 5 meses se encontró que el sistema se desempeñó muy bien, sin haberse encontrado fugas en el sistema, manteniendo el bambú en buenas condiciones.

Se midió la eficiencia de aplicación en el tiempo del cultivo, encontrándose una $E_a = 50\%$ aproximadamente.

Se elaboró una guía práctica de fácil entendimiento para la construcción de conducciones de bambú, así como cuadros de guía para la selección de diámetros, para condiciones de pendiente del 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5, 3,0 y 4%, y a través de cargas constantes de presión de 5 y 10 mca.

5. Literatura citada

- Bambusa. 2015. Diseño y construcción con Bambú. Disponible en <http://bambusa.es/bambú-caracteristicas/>
- Carmioli, U.V. 2009. *Bambú Guadua*: un recurso ecológico. Disponible en <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4835838.pdf>
- Chipantasi, R.R. 2015. Determinación del coeficiente de rugosidad interna de la tubería de polietileno de alta densidad-reciclada para alcantarillado de diámetros de 100mm, 200mm, 250mm. Tesis Ingeniero Civil, Universidad Central del Ecuador, Quito. Ecuador. 6-15 p.
- Ciacua [Centro de Investigación en Acueductos y Alcantarillados]. 2009. Determinación del coeficiente n de Manning y de la rugosidad absoluta K_s de la tubería de alcantarillado ADS 600 mm (interior liso). Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.
- De Almeida, J.A. de; Testezlaf, R.; Matsura, E. 2000. Características Hidráulicas De Tubos De Bambu Gigante. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 4(1): 1-7.
- Ifpri [International Food Policy Research Institute]. 2009. El impacto en la

- agricultura y los costos de adaptación.
Disponible en <https://www.ifpri.org/node/2343>
- Lipangile, T.N; Ingwe, A.; Budimu, R. 1989. Water, Engineering and Development in Africa. In: 15th WEDC, Conference. Kano, Nigeria. 27-30 p.
- Montiel, M. 1998. Cultivo y uso del bambú en el neotrópico. Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. 13 p.
- Murillo, N. 2008. Diseño y construcción de un sistema de riego discontinuo, utilizando caña guadua (*Guadua* spp.) como material de conducción, aplicado en cultivo de maíz (*Zea mays* L.) Tesis Ingeniero Agrícola, Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo. Ecuador. 5-15 p.
- Pazmiño, F.; Hechavarría, R.; Morales, F.; León, J. 2017. Cálculo experimental de la eficiencia hidráulica en sumideros de aguas pluviales. Revista de Ingeniería Hidráulica y Ambiental 38 (3). ISSN 1680-0338. La Habana, Cuba.
- PSI [Proyecto subsectorial de irrigación]. 2016. Sistema de riego por multicompuertas. Lima, Perú. Disponible en http://www.psi.gob.pe/wp-content/uploads/2016/03/biblioteca_hojas_riego_multicompuertas.pdf
- Rocha F. 2007. Hidráulica de tuberías y canales. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima. Perú.