

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN RECURSOS HÍDRICOS**



**“EL BAMBÚ (*Guadua angustifolia* spp.) COMO ALTERNATIVA DE
CONDUCCIÓN PARA UN SISTEMA DE RIEGO POR
MULTICOMPUERTAS”**

Presentada por:

MARLON FERNANDO MONGE FREILE

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO
MAGISTER SCIENTIAE EN RECURSOS HÍDRICOS**

Lima - Perú

2018

DEDICATORIA

A DIOS por siempre ser la fortaleza que me motiva a seguir cada día, a mis padres por enseñarme cada principio que han hecho la persona que a hora soy, y a mi querida esposa que siempre ha estado a mi lado apoyándome en cada decisión de mi vida.

AGRADECIMIENTO

A la UNALM, por ser un valioso templo del saber, donde me llevo valiosos y gratos recuerdos inolvidables del cual me siento muy orgullosos de ser parte.

A mi patrocinador el Mg Sc. Miguel Sánchez por apoyarme y guiarme en cada etapa para la ejecución de este proyecto.

Al Dr. Abel Mejía por sus valiosas enseñanzas, por su apoyo en cada necesidad que se me presentó en mi estadía por la UNALM.

Al Mg Sc. David Asencios por su apoyo y valiosas recomendaciones que hicieron realidad la ejecución de este proyecto.

Al Ph.D. Absalón Vásquez por ser parte en la realidad de esta investigación con sus valiosas recomendaciones.

Al Mg Sc Ricardo Apacla, por su valiosas recomendaciones y guía que fueron de mucha ayuda.

A mis Amigos que me brindaron su amistad y que fueron de mucha ayuda para el cumplimiento de esta meta, como lo son Robinson Peña, Jacinto Calderón, Blanca Moyano y Zuen Boza.

Al Personal administrativo de la maestría y Doctorado de recursos hídricos como lo son, Vilma, Ivette, Nilda, Luis y Miguel, que fueron de mucha ayuda en cada etapa de mi estadía por la UNALM.

ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	Objetivos de la investigación	3
1.1.1.	General.....	3
1.1.2.	Específicos.....	3
1.2.	Justificación de la investigación	4
II.	REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1.	El bambú	5
2.1.1.	Bambú guadua angustifolia	8
2.1.2.	Requerimientos de clima y suelo.....	9
2.1.3.	Post-cosecha y preservación.....	10
2.1.4.	Usos y aplicaciones del bambú.....	10
2.2.	Especificaciones hidráulicas de las conducciones	13
2.2.1.	Conservación de la masa	13
2.2.2.	Conservación de la energía.....	14
2.2.3.	Concepto de rugosidad	15
2.2.4.	Concepto de pérdida de carga.....	16
2.2.5.	Características del flujo turbulento.....	17
2.2.6.	Ecuaciones de cálculos para flujos a presión.....	18
III.	MATERIALES Y MÉTODOS	26
3.1.	Materiales.....	26
3.1.1.	Zona de estudio.....	26
3.1.2.	Características de la zona en estudio:	26
3.1.3.	Materiales de campo y gabinete	26
3.2.	Metodología.....	27
3.2.1.	Determinación de la rugosidad	27

3.2.2.	Descripción de los equipos para la obtención de la rugosidad	30
3.2.3.	Descripción de los medidores de presión.	31
3.2.4.	Descripción de las pruebas de laboratorio.	31
3.2.5.	Esquema para la metodología experimental para la obtención de la rugosidad.....	32
3.2.6.	Método de cálculo para la determinación de la rugosidad.	32
3.2.7.	Esquema para el cálculo de la rugosidad.....	37
3.2.8.	Indicadores de ajustes para la obtención de la rugosidad.....	37
3.2.9.	Determinación de la máxima presión permisible y el rango de velocidades recomendables para el dimensionamiento de conducciones de bambú.	40
3.2.10.	Método de cálculo para determinar la máxima presión permisible en el sistema de conducción de bambú.	40
3.2.11.	Instalación de la parcela demostrativa con tuberías de bambú.....	42
3.2.12.	Descripción de la parcela demostrativa.	49
3.2.13.	Obtención de la eficiencia de aplicación de la parcela demostrativa	51
3.2.14.	Elaboración del manual práctico de fácil entendimiento para la construcción de conducciones de bambú con sus respectivos rangos de aplicabilidad.....	52
3.2.15.	Rangos de caudales para líneas de conducción de bambú.....	52
3.2.16.	Método de cálculo para la determinación de caudales.	53
3.2.17.	Costo de construcción del sistema de riego con tuberías de bambú.....	56
IV.	RESULTADOS Y DISCUSION	57
4.1.	Determinación de la rugosidad del bambú para su utilización como material de conducción de agua.....	57
4.1.1.	Pérdida de carga.....	57
4.1.2.	Fricción determinada mediante datos de laboratorio.....	59
4.1.3.	Valores de rugosidad absoluta.....	60
4.1.4.	Análisis comparativo de la pérdida de carga medidas en laboratorio con los estimados por los métodos de Darcy– Weisbach, Hazen – Williams y Manning.....	64

4.1.5.	Análisis de eficiencia de los métodos de Hazen, Manning y Darcy.....	82
4.2.	Determinación de la máxima presión permisible y velocidad recomendable para el dimensionamiento de conducciones de bambú.....	85
4.2.1.	Determinación de la máxima presión de soporte del bambú como sistema..	85
4.2.2.	Análisis de velocidades recomendables para el dimensionamiento de tuberías de bambú.	86
4.3.	Implementación de la parcela demostrativa.....	87
4.3.1.	Eficiencia de aplicación encontrada en la parcela demostrativa	87
4.3.2.	Costo de construcción del sistema de riego con tubería de bambú.	88
4.4.	Manual práctico de fácil entendimiento para la construcción de la conducción de bambú con sus rangos de aplicabilidad.....	89
4.4.1.	Rango de caudales para conducciones de bambú en función de la pendiente..	89
4.4.2.	Rango de caudales para conducciones de bambú para presiones constantes.	90
V.	CONCLUSIONES	92
VI.	RECOMENDACIONES	94
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
VIII.	ANEXOS	98

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2.1: Características de las especies de bambú más comunes en Latinoamérica.....	7
Cuadro 3.1: Viscosidad del agua	34
Cuadro 3.2: Factores de pérdidas de carga localizadas.	53
Cuadro 3.3: Coeficientes de contracción.....	54
Cuadro 4.1: Especificaciones físicas de los tramos de bambú analizados.	57
Cuadro 4.2: Coeficientes de rugosidad de las tuberías de bambú.	63
Cuadro 4.3: Valores de rugosidad para los métodos de Colebrook, Hazen y Manning.....	64
Cuadro 4.4: Indicadores de ajuste mediante el ECM y el CE para la tubería 1.	66
Cuadro 4.5: Indicadores de ajuste mediante el ECM y el CE para la tubería 2.	67
Cuadro 4.6: Indicadores de ajuste mediante el ECM y el CE para la tubería 3.	69
Cuadro 4.7: Indicadores de ajuste mediante el ECM y el CE para la tubería 4.	70
Cuadro 4.8: Indicadores de ajuste mediante el ECM y el CE para la tubería 5.	72
Cuadro 4.9: Indicadores de ajuste mediante el ECM y el CE para la tubería 6.	74
Cuadro 4.10: Indicadores de ajuste mediante el ECM y el CE para la tubería 7.	75
Cuadro 4.11: Indicadores de ajuste mediante el ECM y el CE para la tubería 8.	77
Cuadro 4.12: Indicadores de ajuste mediante el ECM y el CE para la tubería 9.	79
Cuadro 4.13: Indicadores de ajuste mediante el ECM y el CE para la tubería 10.	81
Cuadro 4.14: Media de los errores cuadráticos medios de las diez tuberías analizadas.	82
Cuadro 4.15: Media de los errores cuadráticos para velocidades menores a 0.8 m/s.	83
Cuadro 4.16: Media de los coeficientes de eficiencia de las diez tuberías analizadas.....	84
Cuadro 4.17: Media de los coeficientes de eficiencia para velocidades menor a 0.8 m/s... ..	84
Cuadro 4.18: Máxima presión de soporte del bambú como sistema.	85
Cuadro 4.19: Eficiencia de aplicación.....	87

Cuadro 4.20: Costo de implementación del sistema de riego por bambú.	88
Cuadro 4.21: Selección de diámetro en función de la pendiente.....	89
Cuadro 4.22: Selección de diámetro para presión de 5 mca.....	90
Cuadro 4.23: Selección de diámetro para presión de 10 mca.....	91
Cuadro 4.24: Selección de diámetro para presión de 15 mca.....	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Mapa mundial de las zonas donde crecen las distintas especies de bambú	5
Figura 3.1: Selección de los 10 tramos de bambú.	27
Figura 3.2: Perforación de los entrenudos.	28
Figura 3.3: Montaje de las tuberías de bambú	29
Figura 3.4: Instalación de los piezómetros.	30
Figura 3.6: Instalación del sistema de prueba.....	41
Figura 3.7: Prueba de resistencia a la presión.	42
Figura 3.8: Perforación del bambú.	42
Figura 3.9: Tratamiento para la preservación del bambú.	43
Figura 3.10: Selección y lijado de los tramos de bambú	44
Figura 3.11: Taladrado y atornillado de los tramos de bambú	45
Figura 3.12: Unión de los tramos de bambú.....	45
Figura 3.13: Pegado de los tramos de bambú.....	46
Figura 3.14: Recubrimiento en las uniones de bambú.....	46
Figura 3.15: Tensado de los tramos bambú.....	47
Figura 3.16: Instalación de las multicompuertas.	48
Figura 3.17: Instalación del sistema de riego de bambú al campo experimental.	49
Figura 3.19: Cultivo de papa.	50
Figura 4.1: Pérdida de carga en función del caudal de los 10 tramos de bambú.....	58
Figura 4.2: Pérdida de carga en función de la velocidad de los 10 tramos de bambú.....	59
Figura 4.3: Rango de Fricción de los 10 tramos de bambú.	60
Figura 4.4: Rango de la rugosidad absoluta K_s de los 10 tramos de bambú.	61
Figura 4.5: Rango del coeficiente de rugosidad “C” de Hazem – Williams.	61

Figura 4.6: Rango del coeficiente de rugosidad “n” de Manning.	62
Figura 4.7: Comparación de los valores medidos con los estimado para la tubería 1.....	65
Figura 4.8: Comparación de los valores medidos con los estimados para la tubería 2.	67
Figura 4.9: Comparación de los valores medidos con los estimado para la tubería 3.....	68
Figura 4.10: Comparación de los valores medidos con los estimado para la tubería 4.....	70
Figura 4.11: Comparación de los valores medidos con los estimado para la tubería 5.....	71
Figura 4.12: Comparación de los valores medidos con los estimado para la tubería 6.....	73
Figura 4.13: Comparación de los valores medidos con los estimados para la tubería 7.	75
Figura 4.14: Comparación de los valores medidos con los estimado para la tubería 8.....	77
Figura 4.15: Comparación de los valores medidos con los estimados para la tubería 9.	79
Figura 4.16: Comparación de los valores medidos con los estimados para la tubería 10. ..	80
Figura 4.17: Análisis de velocidad recomendada para el diseño de bambú.....	86

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: Altura de los piezómetros y del vertedero encontrados para la tubería 1.....	98
ANEXO 2: Altura de los piezómetros y del vertedero encontrados para la tubería 2.....	99
ANEXO 3: Altura de los piezómetros y del vertedero encontrados para la tubería 3	99
ANEXO 4: Altura de los piezómetros y del vertedero encontrados para la tubería 4.....	100
ANEXO 5: Altura de los piezómetros y del vertedero encontrados para la tubería 5.....	100
ANEXO 6: Altura de los piezómetros y del vertedero encontrados para la tubería 6.....	101
ANEXO 7: Altura de los piezómetros y del vertedero encontrados para la tubería 7.....	101
ANEXO 8: Altura de los piezómetros y del vertedero encontrados para la tubería 8.....	102
ANEXO 9: Altura de los piezómetros y del vertedero encontrados para la tubería 9.....	102
ANEXO 10: Altura de los piezómetros y del vertedero encontrados para la tubería 10...	103
ANEXO 11: Resultados de los cálculos hidráulicos para la tubería 1	103
ANEXO 12: Resultados de los cálculos hidráulicos para la tubería 2	104
ANEXO 13: Resultados de los cálculos hidráulicos para la tubería 3	104
ANEXO 14: Resultados de los cálculos hidráulicos para la tubería 4	105
ANEXO 15: Resultados de los cálculos hidráulicos para la tubería 5	105
ANEXO 16: Resultados de los cálculos hidráulicos para la tubería 6	106
ANEXO 17: Resultados de los cálculos hidráulicos para la tubería 7	106
ANEXO 18: Resultados de los cálculos hidráulicos para la tubería 8	107
ANEXO 19: Resultados de los cálculos hidráulicos para la tubería 9	107
ANEXO 20: Resultados de los cálculos hidráulicos para la tubería 10	108
ANEXO 21: Pérdida de carga “hf”medidos vs estimados para la tubería 1.....	108
ANEXO 22: Pérdida de carga “hf”medidos vs estimados para la tubería 2.....	109
ANEXO 23: Pérdida de carga “hf”medidos vs estimados para la tubería 3.....	109

ANEXO 24: Pérdida de carga “hf”medidos vs estimados para la tubería 4.....	110
ANEXO 25: Pérdida de carga “hf”medidos vs estimados para la tubería 5.....	110
ANEXO 26: Pérdida de carga “hf”medidos vs estimados para la tubería 6.....	111
ANEXO 27: Pérdida de carga “hf”medidos vs estimados para la tubería 7.....	111
ANEXO 28: Pérdida de carga “hf”medidos vs estimados para la tubería 8.....	112
ANEXO 29: Pérdida de carga “hf”medidos vs estimados para la tubería 9.....	112
ANEXO 30: Pérdida de carga “hf”medidos vs estimados para la tubería 10.....	113
ANEXO 31: Cálculos para la guía de selección de diámetros para pendiente del 0.5%...	113
ANEXO 32: Cálculos para la guía de selección de diámetros para pendiente del 1%.....	114
ANEXO 33: Cálculos para la guía de selección de diámetros para pendiente del 1.5%...	114
ANEXO 34: Cálculos para la guía de selección de diámetros para pendiente del 2%.....	115
ANEXO 35: Cálculos para la guía de selección de diámetros para pendiente del 2.5%...	115
ANEXO 36: Cálculos para la guía de selección de diámetros para pendiente del 3%.....	116
ANEXO 37: Cálculos para la guía de selección de diámetros para pendiente del 4%.....	116
ANEXO 38: Cálculos para selección de diámetros a presión de 5 m y 50 m de longitud.	117
ANEXO 39: Cálculos para selección de diámetros a presión de 5 m y 100 m de longitud..	117
ANEXO 40: Cálculos para selección de diámetros a presión de 5 m y 150 m de longitud...	118
ANEXO 41: Cálculos para selección de diámetros a presión de 5 m y 200 m de longitud...	118
ANEXO 42: Cálculos para selección de diámetros a presión de 5 m y 300 m de longitud...	119
ANEXO 43: Cálculos para selección de diámetros a presión de 10 m y 50 m de longitud...	119
ANEXO 44: Cálculos para selección de diámetros a presión de 10 m y 100 m de longitud.	120
ANEXO 45: Cálculos para selección de diámetros a presión de 10 m y 150 m de longitud.	120
ANEXO 46: Cálculos para selección de diámetros a presión de 10 m y 200 m de longitud.	121
ANEXO 47: Cálculos para selección de diámetros a presión de 10 m y 300 m de longitud.	121

ANEXO 48: Cálculos para selección de diámetros a presión de 15 m y 50 m de longitud.	122
ANEXO 49: Cálculos para selección de diámetros a presión de 15 m y 100 m de longitud.	122
ANEXO 50: Cálculos para selección de diámetros a presión de 15 m y 150 m de longitud.	123
ANEXO 51: Cálculos para selección de diámetros a presión de 15 m y 200 m de longitud.	123
ANEXO 52: Cálculos para selección de diámetros a presión de 15 m y 300 m de longitud.	124
ANEXO 53: Manual práctico para la construcción de un sistema de riego por multicompuertas a través de tuberías de bambú.	125

RESUMEN

En el presente trabajo se propone utilizar el bambú como alternativa de conducción para un sistema de riego por multicompuertas, los altos costos que generan las tuberías de conducción para el riego han permitido que muchos agricultores no cuenten con estos implementos, es por ello que en esta investigación se tuvo como objetivo utilizar al bambú como tubería de conducción en zonas donde abunda esta especie vegetal, caracterizando hidráulicamente al bambú, para ello se determinó la rugosidad, su máxima presión de trabajo, se elaboró una guía para la selección de diámetros de bambú en condiciones de pendiente y en condiciones de carga de presión. El valor de rugosidad absoluta del bambú obtenido mediante la ecuación de Colebrook – White, es de $K_s = 0.0161$ metros, el coeficiente de rugosidad por Hazen – Williams, es de $C = 50$ y el coeficiente de rugosidad de Manning, es de $n = 0.0232$, estos coeficientes podrán ser utilizados para el diseño de tuberías de bambú, utilizando cualquiera de las ecuaciones ya mencionadas. También se comparó los resultados de pérdida de carga estimados por los tres métodos, versus los valores medidos obtenidos en laboratorio, se determinó mediante indicadores estadísticos, como el error cuadrático medio “ECM” y el coeficiente de eficiencia “CE”, estos indicadores no presentaron diferencias significativas, aunque se observó que el método de Hazen- Williams obtuvo un mayor acercamiento que los demás métodos, del análisis de velocidades se puede afirmar que a partir de velocidades superiores a 0.8 m/s, se produce un cambio en el comportamiento de la pérdida de carga, aumentando potencialmente. Respecto a la máxima presión de trabajo del bambú, se determinó que soporta presiones hasta de 30 PSI o 20 mca aproximadamente, a partir de presiones superiores a las mencionadas, se producen fugas en las uniones.

Palabras claves: Bambú, Coeficiente de rugosidad, Presión de trabajo, Pérdida de carga, Velocidad.

ABSTRACT

In the present work it is proposed to use bamboo as an alternative for conduction material for a floogates irrigation system, the high costs generated by the irrigation pipes have allowed many farmers not to have these implements, which is why that in this investigation the objective was to use bamboo as a pipeline in areas where this plant species abounds, hydraulically characterizing the bamboo, for this the roughness was determined, its maximum working pressure, a guide was prepared for the selection of diameters of bamboo in conditions of slope and under conditions of pressure loading. The absolute rugosity value of the bamboo obtained by the Colebrook - White equation is $K_s = 0.0161$ meters, the roughness coefficient by Hazen - Williams is $C = 50$ and the roughness coefficient of Manning is $n = 0.0232$, these coefficients can be used for the design of bamboo pipes, using any of the aforementioned equations. We also compared the results of load loss estimated by the three methods, versus the measured values obtained in the laboratory, was determined by statistical indicators, such as the mean square error "MSE" and the coefficient of efficiency "CE", these indicators did not present significant differences, although it was observed that the Hazen-Williams method obtained a greater approach than the other methods, from the velocity analysis it can be affirmed that from speeds higher than 0.8 m / s , a change in the behavior of the loss of charge, potentially increasing. Regarding the maximum working pressure of the bamboo, it was determined that the bamboo supports pressures up to 30 PSI or 20 mwc approximately, from pressures higher than those mentioned, leaks occur in the joints.

Keywords: Bamboo, Coefficient of roughness, Support pressure, Loss of charge.

I. INTRODUCCIÓN

Unas de las principales necesidades para la subsistencia de la sociedad es el suministro de agua, debido a que sin este elemento la vida no sería posible, líquido vital que en todas las épocas de la historia ha sido base del desarrollo de las comunidades, pueblos y ciudades, y que actualmente se ve amenazado por la alta contaminación y al cambio climático haciendo que cada día sea más escasa. El aumento de las emisiones de gases está elevando la temperatura del planeta, las consecuencias incluyen el derretimiento de los glaciares y de la frecuencia de eventos meteorológicos extremos y modificaciones en las estaciones del clima (IFPRI, 2009).

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 por ciento de los pobres del mundo viven en áreas rurales (IFPRI, 2009).

En muchas zonas agrícolas durante los últimos años las necesidades de riego se han puesto de manifiesto, pero los altos costos que generan los materiales de riego, entre ellos los de conducción han permitido que muchos agricultores se priven de dichos implementos, originando con esto la implementación de formas tradicionales de riegos que comúnmente son por superficie, que consiste en aplicar continuamente agua al surco hasta que alcance la profundidad de las raíces en la cola del surco donde su consumo de agua son excesivas e ineficientes, con tan sólo una eficiencia de alrededor del 30 por ciento (Murillo, 2008).

Además, en muchas zonas donde la dotación de agua es muy baja, imposibilitados por riegos más eficientes, provocando una disminución considerable en la productividad de sus cosechas. Es por ello la gran necesidad de implementar soluciones que ayuden amortiguar los efectos del cambio climático realizando sistemas de riego a bajo costo que estén dentro del alcance de los pequeños agricultores, y que a su vez sean eficiente en la conducción y distribución del agua de riego.

Por lo tanto el objetivo principal de este proyecto 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 pueda realizar diseños de sistemas de conducciones de bambú para dotar a los pequeños agricultores manuales prácticos de fácil entendimiento para su construcción con sus respectivos rangos de operación del bambú. Cabe mencionar que en los libros de hidráulica no existen valores para este tipo de material.

Mediante el riego por multicompuertas 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. 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 sólo se humedecen las áreas necesarias, se capta mayor cantidad de agua y se puede distribuir simultáneamente a distintos sectores (PSI, 2016).

En todo proyecto de riego la parte más costosa en términos económicos, son los materiales del mismo, siendo muchas veces inalcanzable para los pequeños agricultores, para ello se da como solución la utilización del bambú como material de conducción. Se ha comprobado que el bambú ha sido utilizada en otros países como la India y Tanzania como material de conducción para el abastecimiento de agua potable, así como para el riego (Lipangile *et al.*,1989).

Esta planta ha brindado un aporte fundamental en las tareas típicas de los agricultores, además de su belleza permite su utilización para múltiples propósitos, incluida la carpintería

hasta la elaboración de distintos objetos artesanales, ornamentales, protege fuentes de agua, suelos y fauna, además de su uso en barrenas, rompe vientos, se utiliza como material de construcción de viviendas, alojamientos, diques y posee gran resistencia a la flexión y a la tracción, se encuentran muy frecuente y abundante de forma natural o salvaje comúnmente en zonas trópicas y sub trópicas. Además, es un recurso renovable de rápido crecimiento y fácil reproducción.

Para la especie *Guadua angustifolia*, es una de las más comunes en los Países Andinos, y con la que se trabajó en este proyecto, obtiene su altura definitiva en los primeros seis meses de su vida y su madurez entre los 3 y 5 años. La altura del tallo esta entre 18 a 20 m, pudiendo llegar a 30m, 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 msnm, siendo la óptima entre los 800 y 1600, sus requerimientos de lluvia son superiores a 1200 mm anuales.

1.1. Objetivos de la investigación

1.1.1. General

Utilizar el bambú como material de conducción para un sistema de riego por multicompuertas como alternativa de riego a un bajo costo y fácil implementación, para mitigar los efectos de los déficits de agua, contribuyendo así a la seguridad alimentaria.

1.1.2. Específicos

- Determinar el valor de rugosidad del bambú para su utilización como material de conducción.
- Determinar la máxima presión permisible y las velocidades recomendables para el dimensionamiento de conducciones de bambú.
- Implementar una parcela demostrativa para un sistema de riego por multicompuertas de bambú, en las áreas de la UNALM.
- Elaborar un manual práctico de fácil entendimiento para la construcción de conducciones de bambú con sus rangos de aplicabilidad.

1.2. Justificación de la investigación

Los métodos por escurrimiento superficial se usan en más del 85 por ciento de las tierras regadías del mundo (300 millones ha), en todo tipo de cultivos y en la mayoría de los suelos y de las condiciones topográficas, el 15 por ciento restante se divide en 10 por ciento para aspersión y el resto para riego por goteo (CYTED, 2008).

Los métodos de conducción de agua por escurrimiento superficial desperdician grandes volúmenes de agua por infiltración sólo siendo aprovechados por las plantas aproximadamente un 30 por ciento. Además, la variabilidad climática en muchas regiones está ocasionando cambios sustanciales que ocasionan daños principalmente en el ámbito agrícola, uno de los recursos que cada vez es más escaso es la disponibilidad hídrica, ya que zonas que poseían un rango de precipitación aceptable están amenazadas con largos periodos de sequía, para lo cual se ha generado la necesidad de aplicar riego a sus plantaciones.

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 por ciento de los pobres del mundo viven en áreas rurales. Los altos costos que generan los materiales de riego, entre ellos los de conducción han permitido que muchos productores se priven de dichos implementos, originando con esto la implementación de formas de riegos tradicionales, y en muchos casos ningún tipo de riego. Teniendo en cuenta que en los sitios rurales dentro de las zonas trópicas y sub trópicos el bambú se encuentra de una manera abundante, sin ser aprovechadas como material de conducción para la irrigación (IFPRI 2009).

Es por tal motivo que este proyecto de investigación permite generar alternativas mediante el empleo del bambú como material de conducción para un sistema de riego por multicompuertas, mediante el desarrollo de especificaciones técnicas y la elaboración de un manual práctico de fácil entendimiento, donde se especifica con detalles los pasos para su construcción y los rangos de diámetros óptimos para diferentes plantaciones con sus respectivas superficies, con el objetivo de que cualquier agricultor lo pueda poner en práctica y así lograr reducir los costos de producción que tienen los pequeños y medianos agricultores dotándoles de alternativas eficientes para un buen manejo en el uso del agua.

La subfamilia Bambúsoideae cuenta con más de mil doscientas especies y 70 géneros, además de algunas variedades que existen en todo el mundo (Hidalgo, 1974).

En América Tropical y Asia, los bambúes son uno de las especies más visibles e importantes de la flora. Aunque en la cultura oriental el uso de distintas especies de bambú se remonta casi a 5000 años y a más de 500 años para América del Sur. En todas estas culturas el bambu ha desempeñado una función realmente fundamental en su desarrollo económico industrial (Clark, 1986).

El bambú es un excelente recurso renovable, de rápido crecimiento y fácil implementación, que brinda beneficios económicos, sociales y ambientales a las comunidades rurales de los países en América Latina (MAG, 2004).

El bambú con sus rizomas y hojas en descomposición, permiten una filtración adecuada en el terreno y es capaz de almacenar hasta 30.000 litros de agua aproximadamente en invierno, para liberarlos posteriormente en la época de verano (Carmioli, 2009).

La especie *Guadua angustifolia* sobresale dentro del género de los bambúes, por sus propiedades físico – mecánicas y por el tamaño de sus culmos que alcanzan hasta 25 metros de altura y 20 centímetros de diámetro nominal. Ha sido seleccionada como una de las veinte especies de bambúes mejores del mundo ya que su capacidad para absorber energía y admitir una mayor flexión, la convierten en un material ideal para construcciones sismo resistentes (MAG, 2004).

Cuadro 2.1: Características de las especies de bambú más comunes en Latinoamérica

Especie	Altura (m)	Diámetro (cm)	Grosor Pared (cm)	Entrenudos (cm)	Altitud Ideal (msnm)	Precipitación Anual (mm)
Bambúsa dolichoclada	18	8	0.3–0.6	25 – 50	400 -800	1500-2200
Bambúsa edulis	20	12	0.2–0.6	15 – 50	400 -800	1500-2200
Bambúsa oldhamii	12	3 a 12	0.3–0.6	20 – 35	400 -800	1500-2200
Bambúsa textilis	6	2	0.1–0.2	25	400 -800	1500-2200
Bambúsa ventricosa	18	7	0.6	40	400– 800	1500-2200
Bambúsa vulgaris var.	10	10	0.3–0.6	3 a 15	400– 800	1500-2200
Bambúsa vulgaris var. striata	20	5 a 15	0.4–1.2	35	400– 800	1500-2200
Dendrocalamus asper	20 a 30	10 a 25	0.6 – 2	30 a 80	400– 800	1500-2200
Dendrocalamus latiflorus	20	15	0.4–1.2	60	400– 800	1500-2200
Dendrocalamus strictus	15	3 a 6	sólida	30	400– 800	1500-2200
Gigantochloa apus	10 a 20	10	0.3–0.7	60	400– 800	1500-2200
Gigantochloa verticillata	20	12	0.4 – 1	60	400– 800	1500-2200
Guadua angustifolia	10 a 25	15-20	0.5–2.5	10 a 35	400– 800	1500-2200
Phyllostachys makinoii	6 a 16	2 a 10	0.2–0.7	12 a 40	1000– 1800	1500-2200
Phyllostachys aurea	6 a 14	2 a 5	0.2–0.5	4 a 30	1000– 1800	1500-2200
Phyllostachys	4 a 20	5 a 18	0.4–1.5	5 a 40	1000– 1800	1500-2200

FUENTE: Mercedes (2006).

Guadua angustifolia, comúnmente conocida como *guadua o tacuara*, es una especie botánica de la subfamilia de las gramíneas Bambúsoideae, que tiene su hábitat en la selva tropical húmeda, que comúnmente se encuentran en la orilla de los ríos. Propia de las selvas sudestes venezolanas, y se extiende por las selvas de las Guayanas, así como en Brasil,

Ecuador, Colombia, Perú, Surinam. Desde San Ángel en México, pasando por Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, Nicaragua, y Panamá (Noboa, 2014).

2.1.1. Bambú *guadua angustifolia*

La *Guadua angustifolia* es un bambú espinoso perteneciente a la Familia Poaceae, a la subfamilia Bambúsoideae y a la tribu Bambúseae. El botánico Kunth en 1820, constituye este género utilizando el vocablo “*guadua*” con el que los indígenas de Colombia y Ecuador se referían a esta especie bambú. Este género, que reúne aproximadamente 30 especies, se puede distinguir de los demás participantes por los tallos robustos y espinosos, por las bandas de pelos blancos en la región del nudo y por las hojas caulinares en forma triangular. La especie *Guadua angustifolia* sobresale dentro del género por sus propiedades físico – mecánicas y por el tamaño de sus culmos que alcanzan hasta 30 metros de altura y 20 centímetros de diámetro para condiciones óptimas. Ha sido seleccionada como una de las veinte especies de bambúes mejores del mundo ya que su capacidad para absorber energía y admitir una mayor flexión, la convierten en un material ideal para construcciones sismo resistentes (MAG, 2004).

En algunos países de Centroamérica, al igual que en Perú, Ecuador y Colombia, se está buscando soluciones ecológicas que utilizan la *Guadua* como barrera natural, no sólo para retener la materia orgánica que se lava de las laderas, sino también para proteger las orillas de los ríos de la erosión y el arrastre de otros materiales (Carmioli, 2009).

La *Guadua angustifolia* crece naturalmente en todos los países de América Latina con excepción de Chile y las Islas del Caribe, así como lugares desiertitos. Tiene un rango altitudinal que va desde el nivel del mar hasta los 2800 msnm, pero es mucho más abundante y diverso en elevaciones por debajo de los 1500 metros sobre el nivel del mar; crece en diversos tipos de hábitat incluyendo la selva húmeda tropical, el bosque montano bajo, las sábanas, los “cerrados”, los bosques de galería y los valles interandinos. Es un género amazónico con el 45% de sus especies habitando la cuenca Amazónica y la Orinoquía (MAG, 2004).

La *Guadua* es un recurso renovable, de rápido crecimiento y fácil reproducción. Obtiene su altura definitiva en los primeros seis meses de su vida y su madurez entre los 3 y 5 años.

2.1.2. Requerimientos de clima y suelo

Temperatura: Uno de los principales factores climáticos limitantes es la temperatura; ya que el rango óptimo oscila entre los 20° y 26° C aproximadamente, y cuando se cultiva en lugares donde los rangos se alejan del óptimo, los diámetros y las alturas de los tallos se reducen drásticamente. A menor temperatura se afecta negativamente el desarrollo vegetativo de las plantas, su altitud normalmente prospera a altitudes que no exceden los 2000 msnm, siendo la óptima entre los 50 – 800 msnm (MAG, 2004).

Precipitación: Los requerimientos de lluvia son superiores a 1200 mm anuales y los óptimos fluctúan entre los 2000 y los 2500 mm/año. La humedad relativa es un factor muy importante en el desarrollo de la especie. Los bosques de guaduales son favorecidos por una humedad que esté comprendida entre el 75 y el 85% (Dávila, 2012).

Brillo solar: La luminosidad para un óptimo desarrollo de la caña *guadua* debe estar en el rango de 1800 a 2000 horas/luz/año, lo que equivale aproximadamente a 5 a 6 horas de luz por día. Con respecto a los suelos, las características físicas que más favorecen el desarrollo de esta gramínea son las de suelos francos, franco-limosos y francos arenosos con texturas gruesas y medias, con buen drenaje y capacidad para conservar la humedad sin llegar a anegarse. Los suelos arcillosos o pesados no son los mejores para el desarrollo de la planta (Dávila, 2012).

Según Vizcarra (1991), la caña *guadua* es el banbusoide leñoso arborescente de tipo perenne, que crece agrupado con numerosos tallos o culmos, las ramas y las hojas. La parte subterránea la conforma el rizoma y pequeños y abundantes raicillas. Señala también que los culmos, son los tallos de la planta, que crecen erectos y no necesita de apoyo, son leñosos y huecos, con nudos y entre nudos. Interiormente se observa tabiques a nivel de los nudos, lo que le da la resistencia. En las guaduas tiernas se encuentra agua en su interior. La altura del tallo esta entre 18 a 20m, pudiendo llegar a 30m, con diámetro de 15 a 20 cm, dependiendo de la fertilidad del suelo. Los entrenudos tienen entre 20 a 30 cm de largo, siendo más cortos en la base y más largo a medida que se alejan del suelo.

Las guaduas se les conoce con distinto nombre en los diferentes países en que se les conoce, aunque estos se encuentran muy cercanos como el caso de Colombia donde se llama

“Guaduas” en Ecuador “Cañas guaduas” en Perú “pacos” en Venezuela “guafos”, en Brasil “tabocas” y en Argentina “tacuaros” (Hidalgo 1974).

2.1.3. Post-cosecha y preservación

La preservación de los culmos de bambú comienza desde el momento mismo en que se inicia el aprovechamiento, cortando únicamente los bambúes en estado de desarrollo “maduro”. Para preservar el bambú es necesario secarla a contenidos de humedad por debajo del 20% y realizar un tratamiento preventivo contra el ataque de insectos y hongos. El uso de insecticidas e inmunizantes tóxicos son nocivos para la salud humana. Esto hace necesario la adopción de sistemas no tóxicos, con sello verde, para lograr tener una materia prima con posibilidades de ser una alternativa que pueda competir al lado de la madera (Murillo, 2008).

Dentro de los productos químicos de baja toxicidad se puede utilizar el penta borato que consiste en una mezcla de ácido bórico y bórax en proporción de 1:1 disuelto en 100 litros de agua. Una alternativa de inmunización no tóxica es el ahumado. Consiste en poner la guadua dentro de una cámara por la cual circula humo obtenido por combustión incompleta de materia orgánica. Además de inmunizar, este sistema también seca la guadua, y mejora sus propiedades a la pudrición (Murillo, 2008).

2.1.4. Usos y aplicaciones del bambú

a. En la construcción

Los sistemas constructivos de vivienda lideran los usos y aplicaciones del bambú *Guadua angustifolia*, se usan muy frecuentemente para construcciones como kioscos, iglesias, puentes, centros culturales, demuestran el interés y avance de aplicación, ahora promovido por diversas instituciones, especialmente por la Sociedad Colombiana del Bambú. El bambú *Guadua angustifolia* es un material supremamente versátil, de importantes características en su comportamiento físico mecánico en estructuras sismo resistentes. La relación resistencia/peso la hace tan importante como las mejores maderas, con una gran ventaja a su favor y es la de ser un recurso natural renovable de rápido crecimiento y fácil manejo, que además aporta importantes beneficios ecológicos durante su crecimiento. Todas estas características y el haber incursionado ya en procesos de industrialización hacen el bambu *Guadua angustifolia* un material con buenas expectativas hacia el futuro (MAG, 2004).

b. En la industrialización

La *Guadua angustifolia* tiene fibras naturales muy fuertes que permiten desarrollar productos industrializados tales como paneles, aglomerados, pisos, laminados, esteras, pulpa y papel, es decir productos de calidad que podrían competir con otros materiales en el mercado nacional e internacional. Es importante señalar que, con el uso de la guadua en los procesos industriales anteriormente mencionados, se reduciría el impacto sobre los bosques nativos, porque la guadua pasa a ser un sustituto de la madera (MAG, 2004).

La Caña *Guadua*, una alternativa de enormes proyecciones de rápido crecimiento, resistente, liviana y apta para múltiples usos, se le está otorgando en los últimos tiempos la atención e importancia que merece por su versatilidad, así como por su capacidad de almacenar agua en el tallo y los canutos lo que favorece la humedad del suelo y regula las aguas. En los últimos años, una creciente tendencia aboga por introducir cambios en el uso de productos forestales, proponiendo la utilización de la caña *guadua* como alternativa al uso de las especies maderables convencionales. Debido a sus características de extremada versatilidad y en general a su enorme importancia económica para los países de las regiones tropicales y subtropicales, el cultivo comercial y tecnificado de la caña *guadua* está llamado a ocupar un lugar preponderante dentro de los planes de desarrollo agro ecológico de nuestro país. Desde épocas precolombinas la caña *guadua* del nuevo continente ha estado ligada a la cultura de los pueblos de la América tropical, habiendo contribuido de manera decisiva a la expansión de la presencia del ser humano en la región (Murillo, 2008).

c. En la conservación del ecosistema

Los guaduales son comunidades dinámicas altamente especializadas de las cuencas hidrográficas, donde cumplen un papel importante en la dinámica del ecosistema que les permite perpetuarse. Son agentes protectores de los suelos y del agua en cualquier cuenca hidrográfica. Por su sistema radicular entretejido y la presencia de abundantes rizomas, la caña *guadua* contribuye de manera efectiva a la conservación del suelo y a su recuperación, pues debajo de la tierra la planta forma un intrincado sistema de redes que amarran fuertemente las partículas de suelo, evitando la erosión, particularmente en los suelos de ladera. Como reguladora de la calidad y cantidad de agua, la *guadua* ejerce control en sedimentos y forma muros que evitan la pérdida de los caudales de los ríos (Murillo, 2008).

Los guaduales ubicados en las riberas toman grandes cantidades de agua en las épocas lluviosas y la almacenan, tanto en su sistema radicular como en la parte aérea y en el suelo, y luego, por efectos de concentración, el agua retenida es nuevamente regresada al caudal del río durante las épocas de sequía. Mantener guaduales a orillas de los ríos equivale a poseer tanques de almacenamiento de agua, por ello con razón se afirma que donde hay *guadua* hay regulación del agua. La caña *guadua* contribuye también a la conservación y mejoramiento de la calidad del aire, puesto que la cantidad de oxígeno que produce un guadual es muy superior a cualquier sistema forestal sobre la misma superficie de terreno. Por ello, la utilización (captación) de CO₂ del aire en el proceso de fotosíntesis es igualmente mayor que en otras especies silvícola (MAG, 2004).

d. En el abastecimiento y el riego

La investigación muestra que un sistema de tuberías de bambú es una idea que ya se ha aplicado en otras partes del mundo, incluyendo un sistema de bambú de distribución de agua en Orissa, India (Asenso et al, 2011).

La distribución del agua a través del uso del bambú se utiliza actualmente en varios lugares en todo el mundo. Por ejemplo, en Orissa, la India más de un centenar de mujeres se reunieron para construir un sistema de tuberías de bambú para transportar el agua de un arroyo cercano a varios pueblos. Las mujeres de Orissa buscaron una manera de transportar el agua para que no tendrían que llevar pesadas jarras cuesta arriba con el fin de llevar agua a sus familias (Asenso et al, 2011).

Los sistemas de riego construidos a partir de bambú también se han aplicado en otras partes del mundo. Por ejemplo, en Meghalaya, un estado del noreste de la India, un sistema de riego por goteo se construyó a partir de bambú para regar el estado de pimienta negro y cultivos de hoja betal (Asenso et al, 2011).

2.2. Especificaciones hidráulicas de las conducciones

2.2.1. Conservación de la masa

La conservación de la masa de un fluido a través de dos secciones (sean éstas A1 y A2) de un conducto (tubería) o tubo de corriente establece que: la masa que entra es igual a la masa que sale por estas secciones.

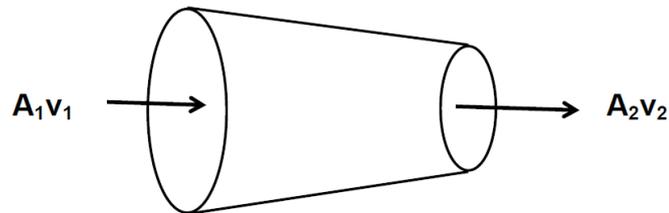


Figura 2.2: Representación de la conservación de la masa

FUENTE: Chipantasig (2015).

$$A_1 * V_1 = A_2 * V_2$$

(1)

Donde:

A = Área transversal (m).

V = Velocidad (m/s).

a. Ecuación de continuidad

Es la cantidad de flujo que fluye en un sistema por unidad de tiempo.

$$Q = A * V$$

(2)

Por lo tanto

$$Q_1 = Q_2$$

(3)

Dónde:

Q = caudal (m³/s).

V = velocidad (m/s).

A = área transversal del tubo de corriente o conducto (m²).

Que se cumple siempre y cuando entre dos secciones de la conducción no se acumula masa, es decir, siempre que el fluido sea incompresible y por lo tanto su densidad es constante.

2.2.2. Conservación de la energía

La conservación de la energía indica que, en un fluido en movimiento sometido a la acción de la gravedad, la suma de las alturas geométrica, manométrica y cinética es constante para los diversos puntos de una línea de corriente (Chipantasig, 2015).

Energía potencial. - debido a la elevación, la energía potencial del elemento con respecto de algún nivel de referencia es:

$$PE = \rho z \quad (4)$$

Energía cinética. - Debido a la velocidad, en realidad, el término cinético $V^2/2g$ Varía al variar el módulo de V según el punto de la sección transversal considerada. Para que realmente represente a la energía cinética media que pasa por la sección, se corrige con el coeficiente de Coriolis (α), quedando el término cinético como $\alpha \frac{V^2}{2g}$

En régimen laminar, $\alpha = 2$, y en régimen turbulento, $\alpha = 1$. Como en Hidráulica se trabaja generalmente en régimen turbulento, este término no se verá afectado.

Energía de flujo. - En ocasiones conocida como energía de trabajo está representada la cantidad de trabajo necesario para mover el fluido a través de una cierta sección en contra de la presión (P). la energía flujo se abrevia FE y se calcula a partir de la ecuación

$$FE = \frac{P}{\rho g} \quad (5)$$

A estos efectos es de aplicación el Principio de Bernoulli, que no es sino la formulación, a lo largo de una línea de flujo, de la Ley de conservación de la energía. Para un fluido ideal, sin rozamiento, se expresa:

$$Z + \frac{V^2}{2g} + \frac{P}{\rho g} = H \quad (6)$$

Donde:

g = aceleración de la gravedad.

ρ = densidad del fluido.

P = presión.

V = Velocidad.

Z = Altura de posición.

H = Altura total de presión.

Se aprecia que los tres sumandos son, dimensionalmente, una longitud (o altura), por lo que el Principio normalmente se expresa enunciando que, a lo largo de una línea de corriente la suma de la altura geométrica, la altura de velocidad y la altura de presión se mantiene constante.

Cuando el fluido es real, para circular entre dos secciones de la conducción deberá vencer las resistencias debidas al rozamiento con las paredes interiores de la tubería, así como las que puedan producirse al atravesar zonas especiales como válvulas, ensanchamientos, codos, etc. Para vencer estas resistencias deberá emplear o perder una cierta cantidad de energía.

(7)

$$h_1 + \frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} = h_2 + \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} + \text{Pérdidas (1-2)}$$

2.2.3. Concepto de rugosidad

En el interior de las tuberías existen protuberancias de diferentes formas y tamaños cuyo valor medio se conoce como rugosidad absoluta (k_s), y que puede definirse como el cambio medio del radio interno de la tubería. Los experimentos de Nikuradse facilitaron determinar el valor de la rugosidad absoluta. Consistió en producir una rugosidad artificial pegando en el interior de un tubo de vidrio (liso) áridos de diferentes granulometrías tamizados, es decir, de rugosidad conocida, hasta conseguir una pérdida de carga igual que la producida en un tubo comercial de un material determinado con igual longitud y diámetro que el de vidrio (Brown, 2005).

Un mismo valor de rugosidad absoluta puede ser muy importante para conducciones de pequeño diámetro y ser insignificante para uno de gran diámetro, es decir, la influencia de la rugosidad absoluta depende del tamaño de la conducción. Por ello, para caracterizar un

conducto por su rugosidad resulta más adecuado utilizar la rugosidad relativa (e/D), que se define como el cociente entre la rugosidad absoluta y el diámetro de la tubería (Brown, 2005).

$$E = K_s / D \quad (8)$$

El efecto de la rugosidad absoluta sobre un flujo depende de su magnitud y distribución. La medición directa de estas variables para superficies muy pulidas requiere equipos de precisión. Pero por medidas indirectas es posible calcular un valor para la rugosidad absoluta " k_s " de dimensiones lineales que tenga en consideración el efecto combinado de la magnitud y distribución de las irregularidades de la superficie.

Las irregularidades que se presentan en las superficies de las tuberías generan pequeños remolinos o vórtices. Cuando la rugosidad absoluta " k_s " es apreciablemente menor que el espesor de la subcapa laminar, los vórtices son eliminados por la viscosidad dentro de la subcapa laminar y su efecto desaparece, en caso contrario estos vórtices alcanzan a sobrepasar la subcapa laminar y contribuir a la formación de turbulencia. En el primer caso la rugosidad absoluta no ejerce ningún efecto en la formación de turbulencia y se dice que la superficie del material actúa como "hidráulicamente lisa", en el segundo caso los vórtices generados por las irregularidades del material destruyen la subcapa laminar, generan turbulencia apreciable y se dice que la superficie del material actúa como "hidráulicamente rugosa". En general, la rugosidad de las tuberías es única para cada material utilizado.

2.2.4. Concepto de pérdida de carga

La Ecuación de Bernoulli se puede considerarse válida tan sólo para líquidos no viscosos o para dos puntos muy próximos, las transformaciones se realizan de la forma indicada, las expresiones no son del todo exactas. En efecto, un principio fundamental de la física establece que en toda transformación energética se da una degradación, es decir, los rozamientos convierten en calor parte de la energía transformada (Munson, 2003).

a. Pérdida de energía por fricción

En este apartado se describe de manera breve cada una de las ecuaciones de uso común (más conocidas), para estimar la resistencia del flujo en canales y conductos a presión.

(9)

$$Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\delta} = Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\delta} + hf \quad (1-2)$$

2.2.5. Características del flujo turbulento

El flujo turbulento es un tema muy complejo y difícil; tanto, que hasta la fecha ha desafiado el tratamiento teórico riguroso. Así, casi todos los análisis de flujo turbulento en tuberías se basan en datos experimentales y fórmulas semiempíricas, incluso si el flujo es turbulento totalmente desarrollado. Una diferencia importante y fundamental entre flujo laminar y flujo turbulento es que el esfuerzo cortante para este último está en función de la densidad del fluido, ρ . Para flujo laminar, el esfuerzo cortante es independiente de la densidad, dejando a la viscosidad dinámica μ , como la única propiedad importante del fluido (Munson, 2003).

a. Número de Reynolds

Entre los datos más importantes desde el punto de vista hidráulico para el cálculo de los coeficientes de fricción está el tipo de régimen del flujo, para ello se utiliza el parámetro adimensional llamado número de Reynolds que relaciona las fuerzas de inercia con las debidas a la viscosidad (Romero, 2007).

Según Franzini y Finnemore (1999) reporto que el flujo se clasifica como: laminar, transición o crítico y turbulento, en función del valor del siguiente parámetro.

$$Re = \frac{V * D}{\nu}$$

(10)

Donde:

Re = Número de Reynolds, adimensional.

V = velocidad media del flujo.

D = diámetro del tubo, en el caso de otra geometría se debe utilizar el diámetro equivalente.

ν = viscosidad cinemática del agua.

Es ampliamente conocido que el flujo laminar ocurre cuando $Re < 2000$, el flujo turbulento para $Re > 4000$, y en la zona comprendida entre estos límites ocurre un flujo crítico (Franzini y Finnemore 1999).

2.2.6. Ecuaciones de cálculos para flujos a presión

a. Experiencias y ecuación de Nikuradse

Brown (2005) indicó que Nikuradse, en 1933 fue el primero en tratar de encontrar ecuaciones para predecir el comportamiento del flujo en conducciones y desde entonces sus aportaciones han sido expandidas por muchos otros investigadores. La principal dificultad a la que se enfrentó Nikuradse fue la determinación de la rugosidad de la tubería. Por esto usó tubos con rugosidades artificiales que se producían al pegar granos de arena de tamaño conocido en las paredes de la tubería para así obtener tubos con superficies semejantes al papel para lijar. Posteriormente midió la caída de presión necesaria para obtener un gasto deseado y los datos se convirtieron en el factor de fricción para el número de Reynolds y rugosidad relativa correspondientes. Repitió varias veces las pruebas para un amplio rango de Re y ks/D a fin de determinar la dependencia $f = F(Re, ks/D)$, posteriormente dicha representación daría origen al Diagrama Universal de Moody.

Aún en las tuberías comerciales, la rugosidad no es uniforme ni está bien definida como en los tubos artificialmente rugosos usados por Nikuradse. Sin embargo, es posible obtener una medida de la rugosidad relativa efectiva de tubos comunes y así poder calcular el factor de fricción. Se debe tener en cuenta que los valores de ks/D no necesariamente corresponden a los valores reales obtenidos por medio de una determinación microscópica de la altura media de la rugosidad de la superficie ks . En 1933, Nikuradse publicó las ecuaciones para calcular el factor de fricción en tubos rectos y de sección circular (Romero, 2007).

$$f = \left(1,74 + 2 \log \frac{r}{k}\right)^{-2} \quad (11)$$

Donde:

f = Coeficiente de pérdida debida a la fricción

r = Radio del conducto

k = Diámetro equivalente de los granos de arena pegados a la superficie interna del conducto.

Y para el esfuerzo cortante producido por el movimiento del flujo, la siguiente Expresión:

$$\frac{\tau}{\rho} = \frac{V^2 * f}{8} \quad (12)$$

Donde:

τ = Fuerza de corte generada por el movimiento de flujo en las paredes del conducto

La velocidad máxima la estimó como:

$$V_{\max} = V + 3.75 \left(\frac{\tau}{\rho} \right)^{1/2} \quad (13)$$

Donde:

V_{\max} = velocidad máxima del flujo.

También definió un factor de velocidad (N) como:

$$N = \frac{3.75}{\sqrt{8}} \quad (14)$$

Al combinar las ecuaciones 13 y 14, se obtiene que:

$$V_{\max} = V + 3.75 \left(\frac{V^2 * f}{8} \right)^{1/2} \quad (15)$$

Y sustituyendo el valor de N en la ecuación anterior

$$V_{\max} = V (1 - N * f^{1/2}) \quad (16)$$

La ecuación (11) puede modificarse para ser aplicada a conductos no circulares

De la siguiente manera

$$Rh = \frac{A}{P}; r = \frac{2\pi * r^2}{2\pi * r} \text{ o } r = \frac{2A}{P} \quad (17)$$

Que sustituida en la expresión de “f” da:

$$f = (V + 3.75 \frac{\tau}{\rho})^{-2} \quad (18)$$

Donde:

Rh = Radio hidráulico

A = Área hidráulica de la sección transversal

P = Perímetro mojado.

b. Ecuación de Chézy

En 1770, Chézy publicó una proporcionalidad basada en los conceptos fundamentales para el movimiento uniforme del flujo en canales, dicha propuesta fue que la velocidad en un canal variaba como (Brown, 2005).

$$V = \sqrt{Rh * S} \quad (19)$$

Para igualar la ecuación anterior, Chézy utilizó la constante de proporcionalidad C.

$$V = C\sqrt{Rh * S} \quad (20)$$

Actualmente se conoce como la ecuación de Chézy; si se aplica la ecuación anterior a tuberías circulares y considerando que la pendiente de fricción para flujo uniforme es $S = hf / l$ la ecuación (20) se transforma en:

$$hf = \frac{4 * l}{C^2 * D} V^2 \quad (21)$$

Donde:

hf = Pérdida de energía o carga por fricción.

C = Coeficiente de fricción de Chézy.

L = Longitud de la tubería en análisis.

V = Velocidad media del flujo.

D = Diámetro de la tubería.

Rh = Radio hidráulico del tubo.

S = Pendiente de la línea del gradiente hidráulico.

La ecuación resultante puede ser considerada una forma no homogénea de la ecuación de Weisbach.

c. Ecuación de Darcy-Weisbach

Esta ecuación para el cálculo de la resistencia del flujo en tuberías, ha tenido un desarrollo histórico muy importante, entre las aportaciones más importantes sobresalen las de: Chézy, Weisbach, Darcy, Poiseuille, Hagen, Prandtl, Blasius, Von Kármán, Nikuradse, Colebrook, Write, y Moody. En sí, la ecuación de Darcy-Weisbach combinada con el Diagrama Universal de Moody. actualmente es el método aceptado que más se aplica para calcular la pérdida de energía debida al movimiento de fluido en tuberías y otros conductos cerrados (Bombardelli, 2003).

Además, cuando se aplican conjuntamente las ecuaciones de; continuidad, energía y pérdidas localizadas, pueden analizarse y diseñarse sistemas muy complejos de tubos para cualquier tipo de flujo y para la mayoría de las condiciones de interés en la ingeniería. Para las condiciones de operación más comunes, la expresión de Darcy-Weisbach permite determinar; la capacidad de conducción de la tubería, el diámetro necesario y la caída de la presión que ocurre en un conducto. En otra palabra, es una fórmula indispensable para diseñar sistemas que transportan fluidos de un punto a otro; dicha ecuación tiene una larga historia de desarrollo (Romero, 2007).

En un diseño se busca establecer la relación que guarda la pérdida de carga h_f , con las propiedades del fluido, la velocidad, el diámetro, la longitud y el tipo de material de la tubería; Julius Weisbach (Brown, 2005) nativo de Sajonia, propuso en 1845 la siguiente ecuación para calcular dicha pérdida, como

$$h_f = f \frac{L \cdot V^2}{D \cdot 2g} \quad (22)$$

Donde:

h_f = pérdida por fricción del tramo en estudio.

f = factor de fricción, adimensional.

d. Ecuación de Hazen-Williams

Chie (1992) manifestó que la fórmula de Hazen-Williams, que se desarrolló a inicios del año 1900, tradicionalmente se considera como herramienta simple para calcular las pérdidas de

energía en tuberías que transportan agua, la ecuación considera un coeficiente de rugosidad asumido como constante para ciertos materiales de tubería, a pesar del tamaño del tubo o el rango de flujo. Esta consideración hoy en día la hace poco aplicable para tuberías de abastecimiento, ya que existe evidencia que la aplicación de la fórmula es certera sólo para la operación de tuberías en regímenes laminar o transición, y en la mayoría de los casos las tuberías de suministro de agua usualmente caen fuera de dichas condiciones. Por ello, muchos autores indican que esta práctica puede ser dañina y tener efectos negativos en el diseño de las tuberías, ya que una errada aplicación puede llevar a diseños de redes insuficientes o con mayor pérdida desde el punto de vista hidráulico. La relación propuesta por Hazen-Williams es:

$$V = K_{hw} * C_{hw} * R_h^{0.63} * S^{0.54} \quad (23)$$

Donde:

K_{hw} = factor de conversión de unidades.

C_{hw} = coeficiente de resistencia.

Donde los valores de K_{hw} son 0,849 y 1,318 para los Sistemas Internacional e inglés de unidades respectivamente (Bombardelli, 2003).

Un considerable número de investigaciones han sido dedicadas a la determinación del coeficiente C_{hw} perteneciente a tubos hechos de diferentes materiales incluyendo los tubos de polietileno. Otras más han sido dirigidas a la optimización del diseño de redes de tubos.

Chie (1992) señaló que Vennard en 1958, expresó que una de las desventajas de esta ecuación es; “la imposibilidad de aplicarla a todo fluido en cualquier condición”. Sin embargo, en 1960 Diskin fue el primero que reacomodó y llevó la ecuación Hazen- Williams a la forma de Darcy-Weisbach, y así, logro obtener una relación entre f , C_{WH} , D y R ; la expresión obtenida por Diskin fue (Bombardelli, 2003):

$$F = \frac{0.2004 \left(\frac{100}{C_{hw}} \right)^{1.852}}{D^{0.019}} * \frac{1}{R^{0.148}} \quad (24)$$

Esta ecuación demuestra que el coeficiente C_{hw} no es constante para una rugosidad dada en la pared del tubo, como es interpretada en numerosos manuales; es decir, depende en que régimen se encuentre el flujo, el diámetro del tubo, la rugosidad relativa de la pared y de la

viscosidad cinemática “ ν ”, que está en función de la temperatura del agua. Con base en estos resultados, Diskin halló en el Diagrama de Moody diferentes valores de C_{hw} y D calculados con la ecuación, con esto él concluyó que la fórmula es aplicable en parte de la zona de transición, Diskin también encontró que la aplicación de la fórmula es apropiada para un rango de valores de C_{hw} entre 100 y 160 (Bombardelli, 2003).

Barlow y Markland y Jain 1978 presentaron un análisis similar considerando la exactitud de la ecuación de Hazen-Williams, en los dos casos la ecuación fue llevada al tipo de la fórmula de Darcy-Weisbach. Jain introdujo valores de C_{hw} en su fórmula resultante y los correspondientes valores de “ f ” fueron comparados con la contraparte obtenida con una exactitud explícita para una presentación de la ecuación de Colebrook-White, previamente desarrollada por Jain, hechos para diferentes valores de pendiente y radio hidráulico. Jain concluyó que dos fuentes independientes de error afectan la ecuación de Hazen-Williams, a saber, el cambio en el factor 1,318 en términos de R y S , y el cambio de C_{hw} con el régimen del flujo y el diámetro del tubo; estos autores finalmente presentaron la fórmula de Hazen-Williams modificada.

Actualmente, Liou en 1998, derivó, a través de procedimientos similares a los empleados por Vennard; Diskin; Berlow y Marklan; Jeppson y Jain. Dieron la siguiente expresión para calcular el coeficiente C_{hw} (Bombardelli, 2003):

$$C_{hw} = 14,07 * f^{-0,54} * R^{-0,08} * D^{-0,01} * V^{-0,08} \quad (25)$$

Liou trazó C_{hw} en términos de R y ks/D para diferentes diámetros de tubo. Él tomó valores razonables para “ ν ”, tomó “ ks ” como constante y cálculo “ f ” con la fórmula de Colebrook-White; e incluyó algunos puntos pertenecientes a tubos de hierro colado. Finalmente concluyó que esas mediciones “cubren sólo una porción de la zona de transición” conforme a la declaración hecha antes por Diskin. También calculó los errores en la línea del gradiente de energía cuando la ecuación de Hazen-Williams es usada en lugar de la de Darcy-Weisbach y encontró errores relativamente pequeños dentro del rango correspondiente, pero cuando se aplica por encima de dicho rango, se obtienen errores por arriba del 40% finalmente recomendó evitar su uso (Bombardelli, 2003).

En el año 2000 Christensen usó una regresión para la fórmula de Nikuradse para calcular “f” en régimen suave (Reynolds entre 10^5 y 10^8) como: $f = 0,1079 / R^{0,16}$ y sugirió un diagrama con zonas de aplicación de las fórmula de Manning y Hazen- Williams de acuerdo con su trazo se podía obtener un valor mínimo para K_s/D debajo del cual la fórmula no es aplicable, es claro que si se acepta la aplicación de la fórmula de Hazen-Williams en la zona de transición; el valor límite de D/k_s es 1,441 para un número de Reynolds de 10^5 . Finalmente, Swamee (2000) puntualizó algunas inconsistencias teóricas relacionadas con la fórmula de Hazen-Williams y dijo que C_{hw} tiene dimensiones de longitud a la 0,37 potencia.

El mayor diámetro usado para la aplicación de la fórmula de Hazen-Williams fue al estudio de una alcantarilla de 3,66m (144in), en Milwaukee, USA; donde los valores del coeficiente C_{hw} encontrados estaban entre 80 y 90. La mayoría de los tubos estudiados tenían diámetros menores a 1,78m (70 in), de hecho casi el 74% de los datos recopilados correspondían a diámetros menores a 0,5m, 82 % menores a 1m, y 92 % menores a 1,5m; en cambio 71 % de los casos analizados en el manual de los mismos autores reporta números de Reynolds por debajo de 5×10^5 , mientras que el 80% reportó números de Reynolds debajo de 10^6 (Romero, 2007).

La influencia del diámetro en la ecuación (25) es ignorada en virtud de que la dependencia entre C_{HW} y D es a través de la potencia -0,01 (tiene una exactitud del 3 % para un rango de diámetros entre 0,1 y 10 m) Los tubos con diámetros mayores a 2 m presentan un interesante comportamiento, ya que por su tamaño arrojan números de Reynolds muy altos, de ahí que presentan condiciones de operación semejantes a un régimen turbulento en superficie rugosa, sin embargo por el tamaño del diámetro la rugosidad relativa, para un determinado valor de k_s resulta muy pequeña, sin embargo algunos cambios en las condiciones de operación incrementan el régimen de transición turbulenta (Romero, 2007).

Desde el problema bajo análisis podría a “priori” atribuirse a grandes rugosidades equivalentes, para lo cual se han propuesto varias formas de solución, que relacionan f con k_s , entre las que destacan (Bombardelli, 2003):

Ecuación de Churchill en 1973 y Barr 1972 - 1977.

(26)

$$f = \frac{0.25}{\left[-\log\left(\frac{k_s}{3.7D} + \frac{5.74}{(4Rr)^{0.9}} \right) \right]^2}$$

Donde:

Rr = número de Reynolds calculado con el radio hidráulico

En 1939 Colebrook obtuvo la siguiente expresión para flujo turbulento en todo tipo de tuberías (Franzini y Finnemore 1999).

(27)

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log\left(\frac{\frac{k_s}{D}}{3.7} + \frac{2.51}{Re_* \sqrt{f}} \right)$$

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Materiales

3.1.1. 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 msnm.

3.1.2. Características de la zona en estudio:

El área de estudio presenta un clima templado. Se adquirió información meteorológica de la estación Alexander Von Humboldt, utilizando un período de registro de los años 1994 al 2005.

a. Condiciones climáticas

Temperatura promedio máxima: 28.86 °C

Temperatura promedio mínima: 13.95 °C

Precipitación total anual: 6.15 mm

Humedad relativa: 83.9 %

3.1.3. Materiales de campo y gabinete

a. Campo

Bambú, taladro, martillo, destornillador, pie de rey, flexómetro, tornillos, serrucho, lija, alambre, regla, playo, compuertas plásticas, broca de madera, nivel topográfico, infiltrometro de doble anillo, cronometro, válvula de compuerta, pegamento, manómetro de 100 psi, manómetro de baja presión, medidor de caudal superficial, liga y recipiente de 20 litros.

b. Gabinete

Laboratorio de Hidráulica (tanque de cabeza constante, piezómetros, vertedero triangular, limnómetro), medidor de temperatura, compresor, laptop, cuaderno de campo, impresora, software, Microsoft Word 2013, Microsoft Excel 2013, Google Earth.

3.2. Metodología

3.2.1. Determinación de la rugosidad

Las pruebas para la determinación de la rugosidad absoluta del bambú se realizaron en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos e hidráulica, de la Universidad Nacional Agraria la Molina (UNALM).

El montaje se realizó para diferentes diámetros de bambú, que estuvieron entre 6 – 8 centímetros de diámetros interno y un rango de longitud de 4 metros aproximadamente, esto se realizó para diez tramos de tubería de bambú.



Figura 3.1: Selección de los 10 tramos de bambú.

a. 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, y en el otro extremo de la varilla un asa en forma de “T”, con el fin de poder sostenerla, hay que mencionar que unos 30 centímetros al final de la punta existía un pequeño ángulo con el objetivo que corte los entrenudos lo más cerca de las paredes del bambú. Como se muestra a continuación.



Figura 3.2: Perforación de los entrenudos.

b. Montaje de las tuberías de bambú.

Los tramos de tubería de bambú se colocaron de manera horizontal sobre la base metálica del equipo, para determinar las pérdidas de carga, estos 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 instaladas a la salida de las tuberías de bambú.

El agua se suministraba a un tanque elevado de cabeza constante desde un reservorio mediante una bomba donde circulaba a través de las tuberías de bambú, se realizó la medición del caudal para cada prueba a través de un vertedero triangular que fue previamente calibrado por medio de aforos volumétricos, luego el agua retornaba al reservorio para después ser bombeada nuevamente.



Figura 3.3: Montaje de las tuberías de bambú

c. 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, dejándose libre los primeros 30 cm al inicio del bambú, esto se realizó con el fin de incrementar la precisión de los resultados.

El procedimiento rutinario se lo realizo para las diez tuberías de bambú, se realizaron 15 caudales distintos para cada uno 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 3.4: Instalación de los piezómetros.

3.2.2. Descripción de los equipos para la obtención de la rugosidad

La instalación del sistema en el que se efectuaron las pruebas para determinar la rugosidad de la tubería de bambú, consta de tres partes básica.

a. Tanque alimentador del sistema.

Consta de un tanque elevado de forma circular, al que llega la tubería que proporciona el caudal otorgado por la bomba del equipo.

b. Vertedero triangular de pared delgada.

Para poder determinar el caudal, se necesitó conocer las características del vertedero, para mayor confiabilidad de la descarga que circulaba por las tuberías de bambú, se calibro el vertedero a través de un aforo volumétrico.

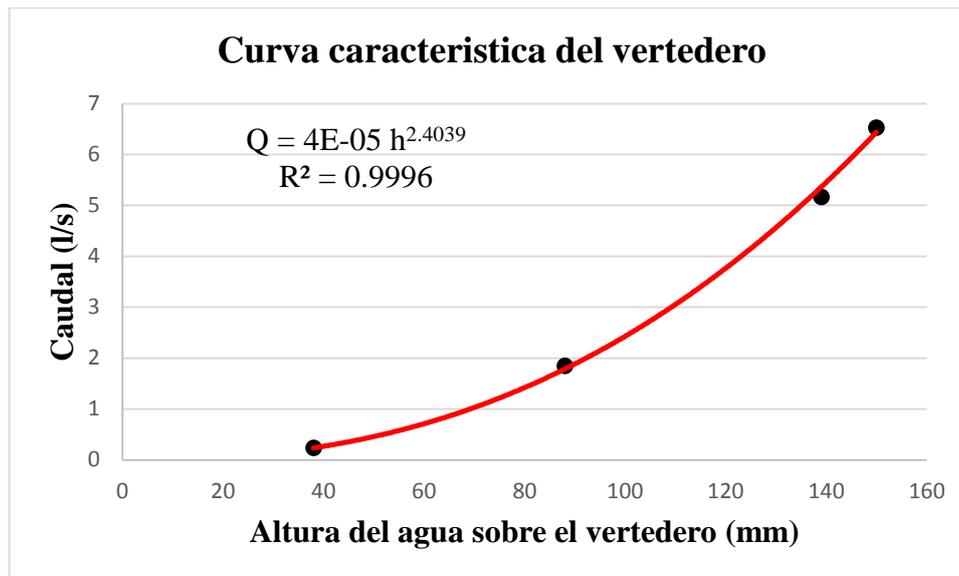


Figura 3.5: Curva característica del vertedero

FUENTE: Elaboración propia.

c. La tubería de bambú.

La tubería de bambú considerada para la prueba fue de 4.0 metros de longitud, la cual se instaló con facilidad para los distintos diámetros considerados en la prueba.

3.2.3. Descripción de los medidores de presión.

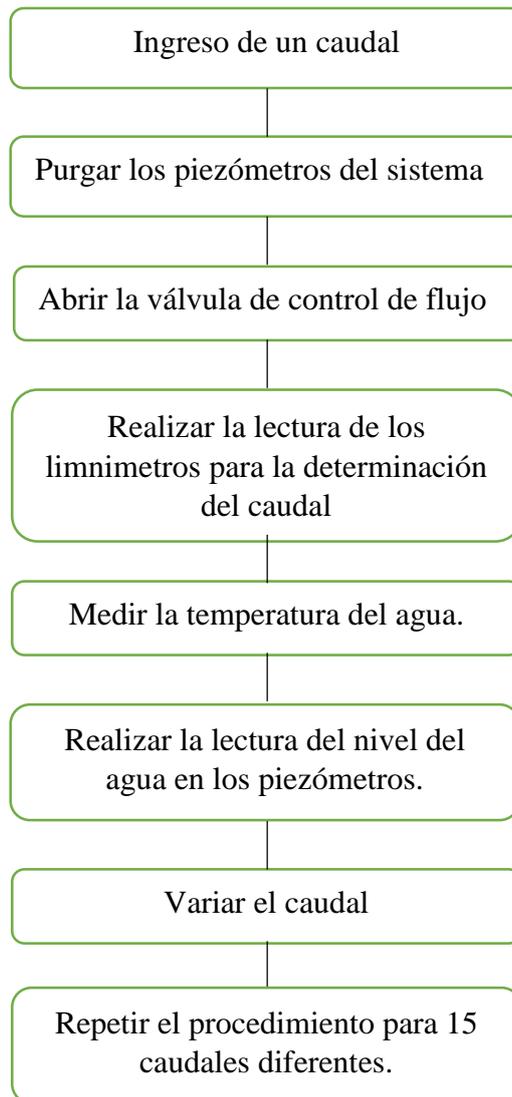
Piezómetro. - Los piezómetros fueron construidos con mangueras transparentes de 4-6 milímetros de diámetro interior, e instaladas en diferentes partes del tramo en la tubería de bambú con acoples roscados, la perforación se realizó en la parte media de las tuberías, fue ubicado a un metro de distancia entre ellos, los cuales fueron conectados al tablero piezométrico.

Limnómetro. - Es una escala vertical como una mira de topografía, graduada en milímetros. Entonces, basta con leer en la escala el nivel que alcanza el agua sobre la cresta del vertedero para determinar el caudal.

3.2.4. Descripción de las pruebas de laboratorio.

Para evaluar la rugosidad absoluta de las tuberías de bambú se realizaron pruebas continuamente. Se analizaron 10 tuberías, en las que se realizaron aproximadamente 15 caudales diferentes por tramo.

3.2.5. Esquema para la metodología experimental para la obtención de la rugosidad.



3.2.6. Método de cálculo para la determinación de la rugosidad.

a. Cálculo de la pérdida de carga.

Las pérdidas de energía por fricción se calcularon a partir de la ecuación de energía:

(28)

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\delta} = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\delta} + hf \quad (1-2)$$

En el caso particular de un tramo de tubería, los términos de la velocidad de la ecuación 42 son iguales y por lo tanto pueden ser cancelados, dando lugar a la ecuación 43, en donde las pérdidas de energía fueron calculadas simplemente a partir de la lectura de los piezómetros al inicio y al final de cada tramo de tubería.

$$hf = \frac{P1}{\delta} - \frac{P2}{\delta} \quad (29)$$

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

$$hf = \frac{\left(\frac{P1}{\delta} - \frac{P2}{\delta}\right) + \left(\frac{P2}{\delta} - \frac{P3}{\delta}\right)}{2} \quad (30)$$

b. Calculo del caudal transcurrido por la tubería.

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.

$$Q = 0.00004 * h^{2.4039} \quad (31)$$

Donde:

Q = Caudal (l/s)

h = Altura sobre la cresta del vertedero (mm).

c. Calculo de la velocidad del flujo

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.

$$V = \frac{Q}{A} \quad (32)$$

Donde:

V = Velocidad del flujo a través de las tuberías (m/s).

Q = Caudal (m³/s).

A = Área transversal de la tubería (m²).

d. Cálculo del número de Reynolds.

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.

(33)

$$Re = \frac{V * D}{\nu}$$

Donde:

Re = Números de Reynolds.

V = Velocidad del agua a través de la tubería (m/s).

D = Diámetro del bambú (m).

ν = Viscosidad cinemática (m²/s).

Para determinar el valor de la viscosidad cinemática, se lo obtuvo a través del cuadro 3.1 que se encuentra en función de la temperatura del agua. 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 utilizado en los respectivos cálculos.

Cuadro 3.1: Viscosidad del agua

Temperatura T (°C)	Densidad ρ (Kg - s ² /m)	Peso específico γ (Kg/m ³)	Viscosidad dinámica μ (Kg - s/m ²)	Viscosidad cinemática ν (m ² /s)
0,0	101.94	1 000	1.81 x 10 ⁻⁴	1.78 x 10 ⁻⁶
5	101.94	1 000	1.55 x 10 ⁻⁴	1.52 x 10 ⁻⁶
10	101.94	1 000	1.33 x 10 ⁻⁴	1.30 x 10 ⁻⁶
15	101.94	1 000	1.17 x 10 ⁻⁴	1.15 x 10 ⁻⁶
20	101.74	998	1.04 x 10⁻⁴	1.02 x 10⁻⁶
25	101.63	997	0.909 x 10 ⁻⁴	0.894 x 10 ⁻⁶
30	101.53	996	0.815 x 10 ⁻⁴	0.803 x 10 ⁻⁶
35	101.33	994	0.732 x 10 ⁻⁴	0.722 x 10 ⁻⁶
40	101.12	992	0.663 x 10 ⁻⁴	0.656 x 10 ⁻⁶
45	100.92	990	0.606 x 10 ⁻⁴	0.600 x 10 ⁻⁶
50	100.71	988	0.552 x 10 ⁻⁴	0.548 x 10 ⁻⁶
55	100.51	986	0.508 x 10 ⁻⁴	0.505 x 10 ⁻⁶
60	100.31	984	0.468 x 10 ⁻⁴	0.467 x 10 ⁻⁶
65	100	981	0.439 x 10 ⁻⁴	0.439 x 10 ⁻⁶
70	99.69	978	0.410 x 10 ⁻⁴	0.411 x 10 ⁻⁶

FUENTE: Hidráulica de tuberías y canales, Arturo Rocha Felices (2007).

e. Cálculo del factor de fricción

La ecuación de Darcy -Weisbach permitió calcular el factor de fricción a partir de datos geométricos de la tubería (longitud y diámetro), y de las condiciones del flujo representadas por la velocidad del agua y las pérdidas de energía en el tramo analizado. El factor de fricción se calculó con la siguiente expresión.

$$hf = f \frac{L \cdot V^2}{D \cdot 2g} \quad (34)$$

$$\Delta H = \frac{P_1}{\rho} - \frac{P_2}{\rho} = f \frac{L \cdot V^2}{D \cdot 2g} \quad (35)$$

$$f = \frac{Hf}{\frac{L \cdot V^2}{D \cdot 2g}} \quad (36)$$

Donde:

f = Factor de fricción.

Hf = Pérdida de carga (m).

L = Longitud del tramo analizado (m).

D = Diámetro de la tubería (m).

V = Velocidad del flujo (m/s).

g = Aceleración de la gravedad (m/s²).

f. 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.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log\left(\frac{k_s}{3.7D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}}\right) \quad (37)$$

Donde:

k_s = Rugosidad absoluta (m).

f = Factor de fricción.

D = Diámetro interno de la tubería (m).

Re = Numero de Reynolds.

Ecuación de Hazem – Williams (C)

$$C = \frac{V}{0.355} * D^{-0.63} * hf^{-0.54} \quad (38)$$

Donde:

C = Coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams.

V = Velocidad del flujo (m/s).

D = Diámetro interno de la tubería (m).

hf = Pérdida de carga (m).

Ecuación de Manning (n)

$$n = \frac{1}{V} \left(\frac{D}{4}\right)^{2/3} hf^{1/2} \quad (39)$$

Donde:

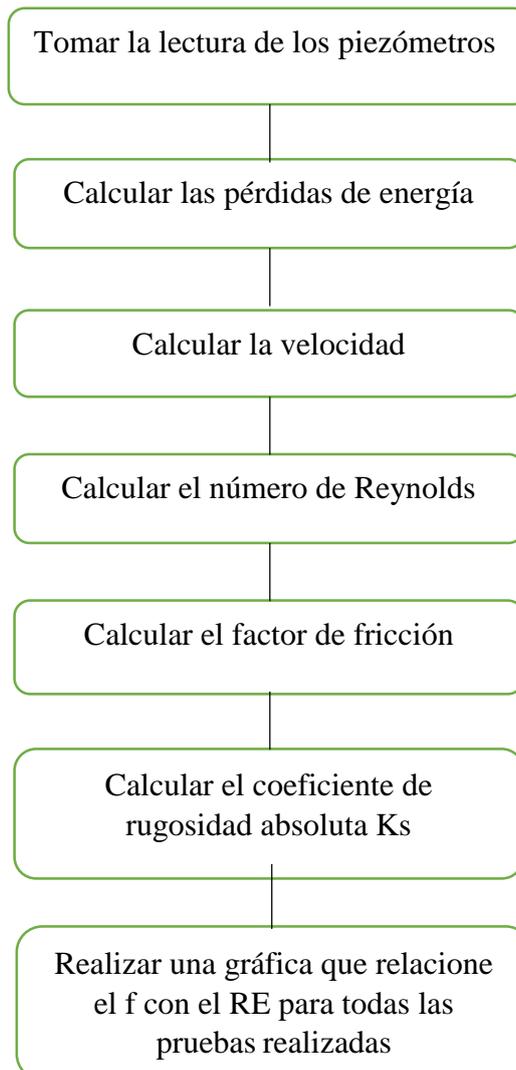
n = Coeficiente de rugosidad de Manning

V = Velocidad del flujo (m/s)

D = Diámetro interno de la tubería (m)

h_f = Pérdida de carga (m).

3.2.7. Esquema para el cálculo de la rugosidad



3.2.8. Indicadores de ajustes para la obtención de la rugosidad

Previo a realizar los cálculos para la obtención de la rugosidad y los coeficientes de Hazen – Williams y Manning, se realizó un análisis de los datos obtenidos en laboratorio, estos datos experimentales se sometieron a un proceso de depuración en el cual se eliminaron datos extremos que se encontraban fuera de la tendencia y que obedecen a errores de tipo

experimental. Con el objetivo de obtener resultados más finos en la determinación del coeficiente de rugosidad absoluta de los bambúes.

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”; que se realizaron a través de las siguientes ecuaciones:

a. Media aritmética:

Mediante la media aritmética de la rugosidad absoluta calculada a través de la ecuación de Colebrook -White, para todos los datos obtenidos en laboratorio para cada tubería de bambú, se obtuvo el valor medio de la rugosidad absoluta, así como los coeficientes de rugosidad por Hazen – Williams y Manning.

$$\dot{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (40)$$

\dot{x} = Media aritmética.

n= Total de datos.

x_i = Valor de los datos.

b. Desviación estándar:

Se realizó el cálculo de la desviación estándar, con el objetivo de medir hasta cuanto los valores se alejaban de la media.

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} * \sum_{i=1}^n (x - \dot{x})^2} \quad (41)$$

S = Desviación estándar.

n = Total de datos.

x = Valor de los datos.

\dot{x} = Media del valor de los datos.

c. Coeficiente de variación:

Este indicador ilustra el porcentaje en que los valores de las muestras difieren de la media.

(42)

$$Cv = \frac{S}{\bar{x}} * 100$$

Cv = Coeficiente de variación.

S = Desviación estándar.

\bar{x} = Media aritmética.

d. Error cuadrático medio:

Mediante el cálculo del error cuadrático medio se pudo conocer cuan efectiva fue el valor rugosidad, así como los factores “C” de Hazen – Williams y el “n” de Manning, al comparar los valores reales medidos en laboratorio, con los estimados.

Se realizó una gráfica para cada tramo de tubería de bambú, donde se comparan las curvas de pérdida de carga medidos en laboratorio, con las curvas estimada por los métodos de Darcy – Weisbach, Hazen – Williams y Manning, donde utilizan los valores de rugosidad estimados anteriormente.

(43)

$$ECM = \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n (vr - ve)^2}$$

Donde:

ECM = Error cuadrático medio.

n = Total de datos.

vr = Valor real calculado.

ve = Valor estimado.

e. Coeficiente de eficiencia CE

Mediante el coeficiente de eficiencia, se pudo cuantificar en cuanto se aproximan los valores de pérdida de carga estimados por los métodos de Darcy, Hazen y Manning, con los valores medidos en laboratorio a través de lo piezómetros, en función de sus respectivos coeficientes

de rugosidad promediados de todos los valores encontrados para cada método como son el Ks, C de Hazen y el n de Manning.

(44)

$$CE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^P (Xr - Xe)^2}{\sum_{i=1}^P (Xr - \bar{x}r)^2}$$

Donde:

Xr = Pérdida de carga medida en laboratorio.

Xe = Pérdida de carga estimada a partir de los métodos de Darcy, Hazen y Manning.

$\bar{x}r$ = Promedio de la pérdida de carga medida en laboratorio.

3.2.9. Determinación 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.

Se realizó un análisis para determinar los caudales recomendados para el bambú en función de la velocidad del flujo y la pérdida de carga.

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

Para la determinación de la máxima presión de soporte 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, por investigaciones anteriores se conoce que por sí sólo los bambúes soportan altas presiones entre 350 – 800 kpa, originándose el problema en la susceptibilidad de las uniones.

Se utilizaron cuatro muestras a través de dos tuberías que simulaban un sistema de conducción, cada una de estas tuberías tenían tres tramos de bambú unidos con una longitud aproximada de 1 m por cada tramo, teniendo en si un total de 3 metros de longitud. El procedimiento se lo detalla a continuación:

a. Instalación del sistema de prueba.

La instalación del sistema se detalla en la sección 3.2.10, con la diferencia que el sistema se encontraba sellado en ambos lados con tapas de 4 pulgadas de diámetro de PVC y la instalación de una válvula que permitía el ingreso de aire del compresor, estas adaptaciones al sistema fueron pegadas con silicona y dejadas al secado por el transcurso de dos días, tal como se muestra en la figura 3.6.



Figura 3.6: Instalación del sistema de prueba.

b. Metodo de prueba de resistencia a la presión

Instaladas las tuberías se procedió al llenado completamente 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.



Figura 3.7: Prueba de resistencia a la presión.

3.2.11. Instalación de la parcela demostrativa con tuberías de bambú

La instalación del sistema de riego se realizó en la parcela demostrativa del Departamento de Recursos Hídricos, en un área de 1260 m² de (21 m x 60 m,) para lo cual se utilizó 10 tramos de tubería de bambú.

a. Perforación de los entrenudos.

Para la 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 afilada y con una agarradera en forma de “T” en el otro extremo de la varilla, con el fin de poder sostenerla.



Figura 3.8: Perforación del bambú.

b. Tratamiento para la preservación del bambú.

El tratamiento del bambú es clave para la preservación del mismo, ya que existen insectos y hongos que atacan, tal como la polilla que es el caso más común y uno de los principales enemigos para la preservación del bambú, en este proyecto para aumentar su vida útil, se sumergió al bambú totalmente en agua por el transcurso de 4 horas, en una solución de cloro líquido a una concentración al 3 por ciento del volumen total, para este proceso se tuvo en cuenta que el bambú se encontrara seco, con el propósito que absorba esta solución de cloro incorporándose residuos dentro del mismo. Además, se aplicó una capa de barniz con protección ultra violeta a la superficie externa del bambú para que al secarse forme una capa lustrosa capaz de resistir la acción del aire y de la humedad. En la figura 3.9 se puede visualizar lo realizado.



Figura 3.9: Tratamiento para la preservación del bambú.

c. Selección y lijado de los tramos de bambú

Se realizó mediante un minucioso análisis de las características de cada tramo de tubería de bambú, básicamente por su diámetro, con el objetivo de colocarlos frente a frente para su respectiva unión, se trató de buscar que los dos diámetros de los dos tramos queden lo más simétrico e iguales posible con el fin de evitar posibles fugas en el sistema, además, se tuvo en cuenta que los tramos de mayor diámetro sean colocados primeros y así lograr que el sistema quede lo más telescópico posible.

Así mismo se lijó en cada extremo de los tramos de bambú, los cuales fueron seleccionados con anterioridad en el orden en las que los tramos quedarían unidos para el sistema final de riego, observándose físicamente la asimetría de la unión de los tramos, posterior al lijado se construyó unos empaques hechos a partir de cámaras de bicicletas construidas a la medida del diámetro para cada tubería de bambú, estos empaque fueron muy fáciles de construir, necesitándose únicamente como herramienta una tijera de mano, los empaques fueron pegados con silicona, esto fue echo con el objetivo de sellar las pequeñas fisuras que puedan quedar al momento de ser unidas, y así evitar posibles fugas de agua en el sistema de riego.



Figura 3.10: Selección y lijado de los tramos de bambú.

d. Taladrado y atornillado de los tramos de bambú.

Con el objetivo de asegurar que no existan fugas en el sistema y evitar la separación de los tramos por mínimos esfuerzos que puedan darse, pudiendo ser la misma presión del sistema o eventos antrópicos, se implementó una forma de tensado a través de alambres que impiden la separación de los mismos, estos tensores se sostienen mediante pernos de forma enroscada de media pulgada que fueron colocados a 10 cm de distancia del borde, colocándose cuatro pernos incrustados en el perímetro de la tubería de bambú en forma simétrica. Para evitar que se fisure el bambú por el incrustamiento de los pernos, se realizó una pequeña perforación mediante un taladro con broca de punta fina diseñados precisamente para madera, como se muestra en la figura 3.11.



Figura 3.11: Taladrado y atornillado de los tramos de bambú.

e. Unión de los tramos de bambú

Para la unión de los bambú, se inició con el lado del tramo más grueso de la tubería de mayor diámetro, quedando en la parte inferior el tramo más delgado del bambú, luego se colocó el segundo tramo de mayor diámetro, iniciando con el lado más delgado. Esto se realizó con el objetivo de poder lograr una mayor uniformidad en reducción a los diámetros.

Estas uniones se realizaron teniendo en cuenta que al momento de unir las tuberías de bambú los pernos queden lo más uniforme posible, para que se obtenga un buen tensado, como se muestra en la figura 3.12:



Figura 3.12: Unión de los tramos de bambú.

Una vez identificado las posiciones correctas en la unión de los bambú se procedió a colocarle el pegamento de silicona sobre los empaques construidos así como por sus lados, con el fin que no existan posibles fugas y por ende la falla en el sistema.



Figura 3.13: Pegado de los tramos de bambú.

Colocado el pegamento y unidos los tramos en la posición correcta, se procedió a recubrirlos con cámara de bicicleta , estas se colocaron quedando bien ajustadas sobre la unión de los dos tramos, esto fue realizado con el propósito de evitar las fugas y para que se mantengan unidos los tramos.



Figura 3.14: Recubrimiento en las uniones de bambú.

Recubierto los dos tramos con la cámara de bicicleta, se procedió a realizar el tensado mediante alambres que se anclan a los pernos incrustados sobre los tramos de bambú y que se ajustan con la ayuda de una pinza. Este procedimiento se lo realizo en los cuatros puntos de ajustes.



Figura 3.15: Tensado de los tramos bambú.

f. Instalación de las multicompuertas

Uno de los objetivos de este proyecto fue realizar el riego a través de tuberías con multicompuertas con el fin de aumentar la eficiencia del riego, para ello se analizaron múltiples formas, entre ellas la perforación del bambú con múltiples orificios a lo largo de la línea de riego para cada surco, esta idea fue analizada, obteniéndose como conclusión que existe la necesidad de aumentar el diámetro de los orificios a medida que se aleja la tubería, dado que existen pérdidas de carga que ocasionan la caída de la presión y que a su vez provocan la disminución del caudal deseado, además al existir modificaciones en la presión de entrada al sistema cambiaría todo el diseño de los orificios.

Se opto por analizar pequeñas compuertas ya fabricadas para este tipo de riego que se utilizan para líneas de tuberías de bolsas plásticas flexibles, mas conocido como riego californiano, pero que a su vez tienen como ventaja la regulación de su caudal a través de pequeñas compuertas regulables para un caudal deseado, superando así el problema de las pérdidas que ocasionan la caída de la presión a lo largo del tramo de la tubería de riego. Antes de su utilización se realizo un análisis en el Laboratorio de Hidráulica de la UNALM, donde se

concluyo la validez en su utilización al funcionar muy bien en tuberías de bambú, como se muestra en la figura 3.16.



Figura 3.16: Instalación de las multicompuertas.

g. Instalación del sistema de riego de bambú al campo experimental.

Realizado cada proceso descritos anteriormente, se procedió a trasladar las tuberías de bambú al campo, previamente se unieron cuatro tramos de tubería con aproximadamente 16 metros de longitud, esto se realizó con el fin de evitar la unión en el campo, donde existe mayor dificultad. El suministro de agua fue a través de una línea de tubería de bambú ciega. Para la instalación del sistema de riego con las tuberías de bambú se usaron accesorios de PVC como en los cambios de dirección del flujo, así como válvulas reguladoras de caudal y válvulas medidoras de presión.

El sistema de riego fue colocado sobre piedras en toda la línea donde va colocado el bambú, previniendo el contacto con el suelo con el fin de evitar el exceso de humedad y así posibles ataques de hongos e insectos que puedan comprometer la vida útil del bambú.



Figura 3.17: Instalación del sistema de riego de bambú al campo experimental.

3.2.12. Descripción de la parcela demostrativa.

a. Descripción del sistema y método de riego

La parcela demostrativa se ubicaba en los predios de la UNALM, el abastecimiento del agua se daba por medio de un reservorio, y a través de una bomba de 5 hp que impulsaba el agua mediante una línea de tubería de 365 metros, después de esta línea el sistema se conectó a la tubería de bambú. En un tramo de 20 metros que funcionaba únicamente como línea de conducción, posterior a la línea de conducción de bambú a través de un codo de 90° se originaba la línea de riego con multicompuertas plásticas instaladas a 1 metro de distancia entre ellas, con una longitud de 21 metros, la presión de ingreso al sistema fue de 25 psi, con un caudal de 3.5 l/s.

Los surcos fueron construidos a 1 metro de distancia entre ellos quedando a la misma distancia que las multicompuertas, con una longitud de 60 metros de fondo, con una pendiente de 0.8%.

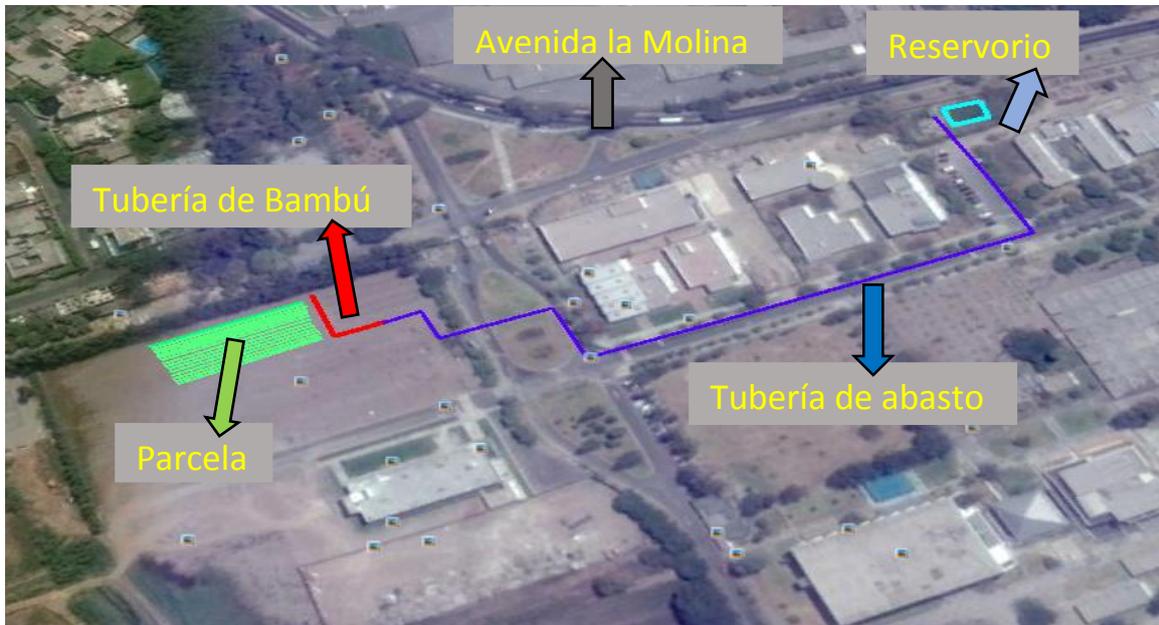


Figura 3.18: Descripción del sistema de riego.

b. Descripción del cultivo de prueba

El cultivo instalado fue papa de *Variedad única*, en un área de 1260 m² las dimensiones del terreno fue de 21 metros de ancho por 60 metros de fondo.



Figura 3.19: Cultivo de papa.

3.2.13. Obtención de la eficiencia de aplicación de la parcela demostrativa

Parámetro importante y uno de los objetivos prácticos de esta investigación es el uso del agua a través de tuberías de bambú de forma eficiente, reduciendo la pérdida de agua mediante la percolación profunda y evaporación.

Para la obtención de la eficiencia de aplicación se realizó mediante la expresión.

$$E_a = \frac{L_n}{L_b} \quad (45)$$

Donde:

E_a = Eficiencia de aplicación.

L_n = Lamina neta (mm).

L_b = Lamina bruta (mm).

La lámina neta (L_n) y la lámina bruta (L_b) están relacionadas de la manera siguiente:

Lamina Neta

$$L_n = \Delta L + ET \quad (46)$$

$$\Delta L = L_1 - L_2$$

Donde:

L_1 = La lámina de agua en el suelo antes del riego (mm).

L_2 = La lámina de agua en el suelo después del riego (mm).

ET = Evapotranspiraciones de toda la semana (mm).

Lamina Bruta

$$L_b = \frac{Q_{af} * t}{A} \quad (47)$$

Donde:

Q_{af} = Caudal afluente al surco (l/s).

t = Tiempo (s).

A = Área del campo regado (m²).

3.2.14. Elaboración del manual práctico de fácil entendimiento para la construcción de conducciones de bambú con sus respectivos rangos de aplicabilidad.

Para la construcción de las tuberías de conducción de bambú se describe en la sección 3.2.10, donde se detalla paso a paso su construcción.

En cuanto a el análisis de sus rangos de aplicabilidad, se lo realizó con el enfoque para la construcción de la línea de conducción.

3.2.15. Rangos de caudales para líneas de conducción de bambú

Dado que en la línea de conducción discurre un caudal constante, esta a su vez está en función de la rugosidad del material, diámetro, longitud de la tubería y la altura de carga.

Esta altura de carga se puede obtener a través de presiones constantes o considerando las pendientes del sitio como carga de presión a través de diferencias de cotas.

a. Rangos de caudales a través de la pendiente del terreno

El objetivo principal de esta investigación fue dotar agua de riego mediante el uso del bambú como material de conducción a agricultores con bajos recursos económicos que comúnmente no poseen una bomba para impulsar el agua. Para estas condiciones se realizó un cuadro de caudales, que describe para distintos diámetros y diferentes pendientes, que sirva 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%.

b. 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 del 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), para longitudes de 50, 100, 150 y 300 metros.

3.2.16. Método de cálculo para la determinación de caudales.

El cálculo usado para la determinación del caudal fue a través de la ecuación de energía y Darcy – Weisbach. Se consideraron la pérdida de carga por fricción, así como pérdidas localizadas como en la entrada, por cambio de dirección y por contracción. Para la obtención del coeficiente de pérdida localizada “k” se realizó a través del cuadro 3.2.

Cuadro 3.2: Factores de pérdidas de carga localizadas.

Entrada	$k \frac{v_2^2}{2g}$	$(v = \text{velocidad media de la tubería})$
	Bordes agudos	k = 0.5
	Bordes ligeramente redondeados	k = 0.20
	Bordes acampanados	k = 0.04
	Bordes entrantes	k = 1
Ensanchamiento	$k = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g} = k \left(\frac{A_2}{A_1} - 1 \right)^2 \frac{v^2}{2g}$	
	$(v_1 = \text{velocidad agua arriba}; v_2 = \text{velocidad agua abajo})$	
	Brusco	K = 1
	Gradual	Gráfico de Gibson
Contracción	$\left(\frac{1}{Cc} - 1 \right)^2 \frac{v^2}{2g} = k \frac{v^2}{2g}$	$v_2 = (\text{velocidad agua abajo})$
	Brusca	Cuadro de weisbach
	Gradual	K = 0
Cambio de dirección	$k = \frac{v^2}{2g}$	$(v = \text{velocidad media})$
	Codo de 90°	k = 0.90
	Codo de 45°	k = 0.42
	Codo de curv. Fuerte	k = 0.75
	Codo de curv. Suave	k = 0.60
Válvulas	$(v = \text{velocidad media})$	
	Válvulas de globo (totalmente abierta)	k = 10.0
	Válvulas de compuerta (totalmente abierta)	k = 0.19
	Válvulas check (totalmente abierta)	k = 2.5

FUENTE: Hidráulica de tuberías y canales Arturo Rocha Felices (2007).

Los valores usados para las pérdidas localizadas, se consideró una entrada con bordes agudos con $k = 0.5$, un cambio de dirección de 90° con $k = 0.9$ y los respectivos valores por contracción en función de la longitud de la línea, considerando tramos de tubería de cuatro metros de longitud.

Para el cálculo de pérdida por contracción, se necesitó conocer el coeficiente de contracción (C_c), el cual se halló a través del cuadro 3.3.

Cuadro 3.3: Coeficientes de contracción.

Coeficiente de Weisbach para contracciones bruscas											
$(D_2 / D_1)^2$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
C_c	0.586	0.624	0.632	0.643	0.65	0.681	0.712	0.755	0.813	0.892	1

FUENTE: Hidráulica de tuberías y canales Arturo Rocha Felices (2007).

Obtenido el coeficiente de contracción (C_c), se procedió a calcular el coeficiente de pérdida (k), a través de la siguiente ecuación.

$$K = \left(\frac{1}{C_c} - 1 \right)^2 \quad (48)$$

Conocido los respectivos coeficientes por pérdidas, para las pérdidas localizadas, así como los respectivos parámetros requerido por la ecuación de energía, se procedió al cálculo de velocidad.

Ecuación de Energía:

$$Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\delta} = Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\delta} + hf + h_l \quad (49)$$

Reemplazando la ecuación de pérdida de carga de Darcy – Weisbach en “hf”

Se obtiene:

$$Z1 + \frac{V1^2}{2g} + \frac{P1}{\delta} = Z2 + \frac{V2^2}{2g} + \frac{P2}{\delta} + f \frac{L \cdot V^2}{D \cdot 2g} + k_{(Ent)} \frac{V2^2}{2g} + k_{(90^\circ)} \frac{V2^2}{2g} + k_{(Contra)} \frac{V2^2}{2g} \quad (50)$$

Despejando la velocidad y analizando la ecuación se obtiene:

$$V = \sqrt{\frac{2g \cdot H}{1 + f \cdot \frac{L}{D} + k(Ent) + k(90) + k(Contra)}} \quad (51)$$

Donde:

V = Velocidad del flujo (m/s).

H = Altura de carga (m).

f = Factor de fricción.

L = Longitud del tramo analizado (m).

D = Diámetro interno de la tubería (m).

g = Aceleración de la gravedad (m/s²).

K = Coeficientes de pérdidas localizadas.

Obtenida la velocidad del flujo, se procedió al cálculo del número de Reynolds, calculo necesario para obtención real del factor de fricción “f”.

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (52)$$

Donde:

Re = Números de Reynolds.

V = Velocidad del agua a través de la tubería (m/s).

D = Diámetro interno del bambú (m).

ν = Viscosidad cinemática (m²/s).

Para la obtención del valor de viscosidad se lo obtuvo a través del cuadro 3.1 que se encuentran en función de la temperatura del agua, la misma que se encontró valores de 20° C obteniéndose una viscosidad cinemática de 1.02 x 10⁻⁶ m²/s, la cual fue utilizado en los respectivos cálculos.

Para obtener el factor de fricción “f” se utilizó la ecuación de Colebrook -White. Conocido el valor de rugosidad y con la ayuda de la herramienta Solver del Excel, se pudo obtener los respectivos valores del factor de fricción “f”.

(53)

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

Donde:

k_s = Rugosidad absoluta (m).

f = Factor de fricción.

D = Diámetro interno de la tubería (m).

Re = Numero de Reynolds.

Obtenida la velocidad del flujo a partir de la ecuación de energía descrita anteriormente, se determinó el caudal para los distintos diámetros de tubería de bambú, el cual se introdujo un rango de diámetro interno de 6 a 10 centímetros. Este caudal fue calculado a través de la siguiente ecuación:

(54)

$$Q = A * V$$

Donde:

Q = Caudal que transcurre por la tubería (m³/s).

A = Área transversal de la tubería (m²)

V = Velocidad del flujo (m/s).

3.2.17. Costo de construcción del sistema de riego con tuberías de bambú

Se elaboró un cuadro donde se detalla a precisión los gastos generados para la construcción de tuberías de bambú, para una longitud de 20 metros de línea de conducción ciega y 21 metros como línea de riego a través de las multicompuertas.

IV. RESULTADOS Y DISCUSION

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

Para la determinación del valor de rugosidad del bambú *guadua angustifolia*, se analizaron 10 tramos de tubería de bambú, tal como se muestra en el cuadro 4.1.

Cuadro 4.1: Especificaciones físicas de los tramos de bambú analizados.

N° Tubería	Longitud (m)	N° Entrenudos	Diámetro Interno (cm)
1	4.0	13	7.51
2	4.1	17	7.6
3	3.95	17	7.2
4	3.94	16	7.57
5	4.09	16	7.62
6	4.07	11	7.76
7	3.91	16	8.17
8	3.77	12	7.26
9	3.96	12	6.69
10	4.08	18	7.73

FUENTE: Elaboración propia.

Cada uno de estos tramos de tubería bambú fueron sometidos a distintos caudales que varió de 0.61 l/s a 7.60 l/s, caudal máximo limitado por el tanque de cabeza constante.

4.1.1. 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 l/s y 7.60 l/s.

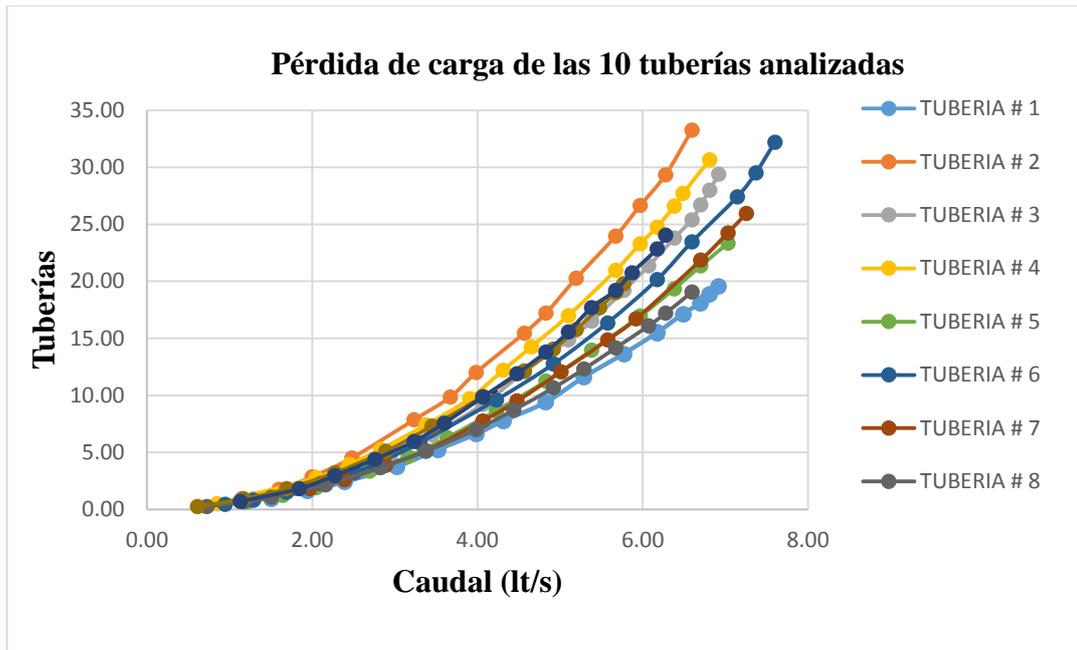


Figura 4.1: Pérdida de carga en función del caudal de los 10 tramos de bambú.

FUENTE: Elaboración propia.

Se puede observar en las 10 tuberías analizadas, que las pérdidas de carga se ajustan a una línea potencial, en un inicio todas las líneas se encuentran en un mismo punto, a medida que el caudal aumenta, la tangente a la curva crece más a partir del caudal de 3 l/s aproximadamente, obteniéndose una pérdida de carga muy particular para cada tubería. Esto se debe a que los acabados en la perforación de los entrenudos no son iguales y no cumplen a un mecanismo de perforación, ya que su perforación es manual, haciendo que incremente la diferencia de la pérdida de carga para cada bambú.

Con el objetivo de visualizar el comportamiento más detallado de cada tubería de bambú, se realizó una gráfica mostrando la pérdida de carga en función de la velocidad del flujo, donde se puede observar sus respectivos rangos de velocidades obtenidos en laboratorio, como se ilustra en la figura 4.2

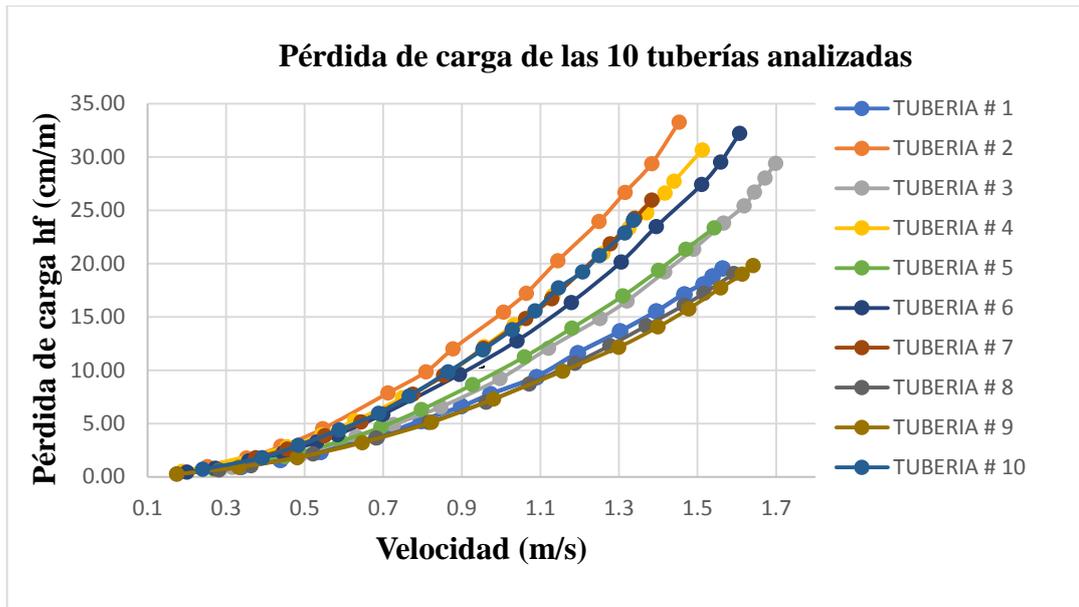


Figura 4.2: Pérdida de carga en función de la velocidad de los 10 tramos de bambú.

FUENTE: Elaboración propia.

Al igual que la figura 4.1 se observa el mismo comportamiento, donde a partir de la velocidad aproximada de 0.8 m/s, velocidad analizada posteriormente en esta investigación, existe una mayor dispersión muy particular para cada tubería de bambú, como se puede observar claramente un comportamiento muy distinto entre la tubería dos y la nueve, donde la tubería dos tiene una pendiente mucho más pronunciada que la tubería nueve.

4.1.2. Fricción determinada mediante datos de laboratorio

A través de los datos obtenidos en laboratorio se pudo determinar los respectivos valores de fricción, que estuvieron entre 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.

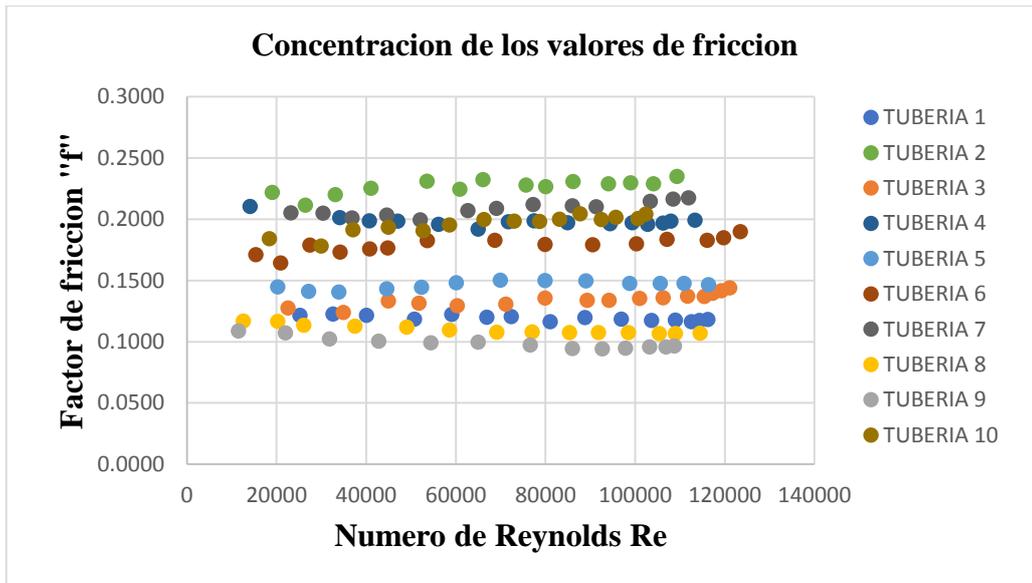


Figura 4.3: Rango de Fricción de los 10 tramos de bambú.

FUENTE: Elaboración propia.

Se puede observar en la figura 4.3 el rango de fricciones que se dieron en los bambú, oscilando entre 0.09 a 0.23, 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 1.15×10^4 a 1.23×10^5 , encontrándose siempre en flujo turbulento.

4.1.3. Valores de rugosidad absoluta.

Los valores de rugosidad se determinaron a partir de las 143 pruebas realizados a los 10 tramos de tuberías de bambú, mediante la ecuación de Colebrook -White, Hazen – Williams y Manning.

La figura 4.4 ilustra los valores de rugosidad “Ks” encontrado mediante los datos obtenidos en laboratorio a través de la ecuación de Colebrook -White.

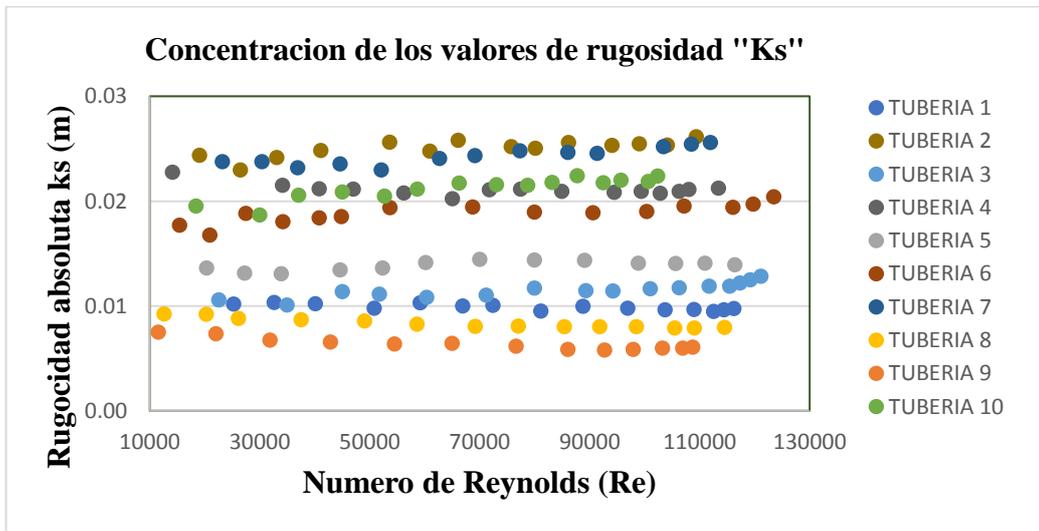


Figura 4.4: Rango de la rugosidad absoluta Ks de los 10 tramos de bambú.

FUENTE: Elaboración propia.

Los valores de rugosidad “Ks” varió dentro de un rango de 0.0058 a 0.0262 metros, en las 143 pruebas realizadas, cada bambú presentó un valor muy particular con excepción de unos pocos que mantuvieron valores muy similares. En cada tramo de bambú analizada se encontró una ligera diferencia del Ks en función de que el caudal aumentara o disminuyera. La figura 4.5, detalla los valores del coeficiente “C” de Hazem – Williams, encontrado mediante los datos de laboratorio.

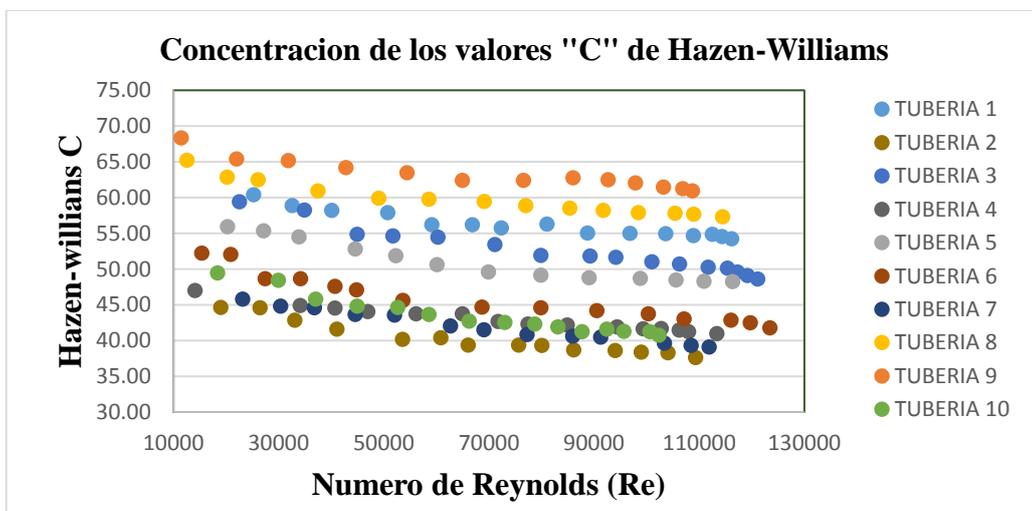


Figura 4.5: Rango del coeficiente de rugosidad “C” de Hazem – Williams.

FUENTE: Elaboración propia.

Se puede observar que el factor “C” de Hazem – Williams varió entre 38 a 68, siendo los valores de “C” más bajos para las tuberías que se encontraron con mayor fricción y los valores de “C” más altos para las tuberías que presentaron fricciones más bajas, a su vez la fricción está en función de la calidad del acabado de los entrenudos. Además, se verifica que a medida que aumenta el número de Reynolds el factor de rugosidad tiende a disminuir.

La figura 4.6 se muestra los coeficientes de rugosidad de Manning “n” de las 143 pruebas realizadas a los 10 tramos de tuberías de bambú.

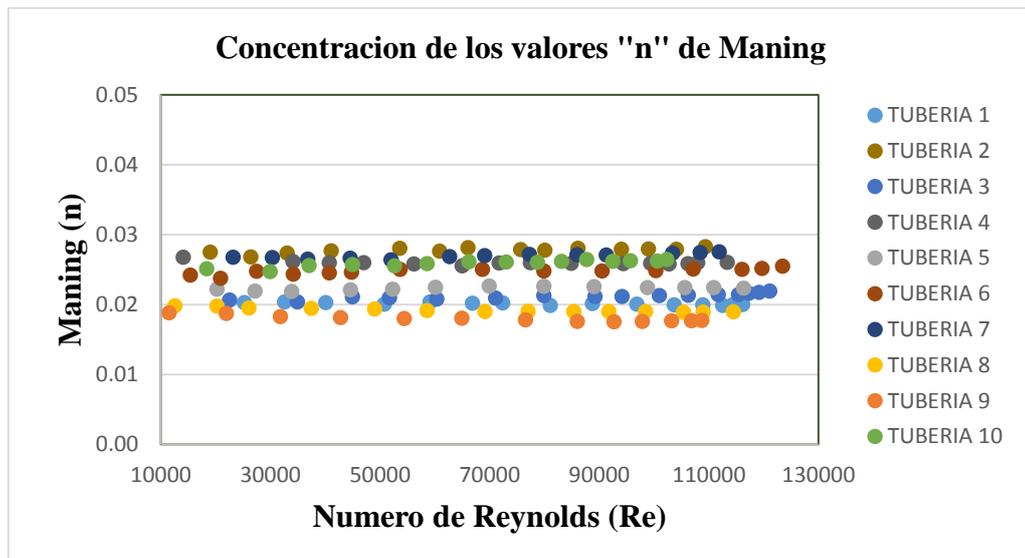


Figura 4.6: Rango del coeficiente de rugosidad “n” de Manning.

FUENTE: Elaboración propia.

El rango de valores encontrados para el coeficiente de rugosidad de Manning “n” varió de 0.0175 a 0.0283, se observa que los valores encontrados para cada bambú varían muy poco con respecto al Número de Reynolds, manteniéndose casi constante.

En el cuadro 4.2, se detalla 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.

Cuadro 4.2: 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

FUENTE: Elaboración propia.

Se encontraron los valores promedios de rugosidad absoluta con $K_s = 0.0161$ metros, 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 fierro fuertemente corroído que tiene un coeficiente de rugosidad de $C = 40 - 50$.

A través del cálculo de la desviación estándar, así como el coeficiente de variación, indicadores que miden la variabilidad de los datos. Se obtuvo una desviación de 0.0069 y un coeficiente de variación $CV = 37.61\%$ para la ecuación de Colebrook – White, hay que tener en cuenta que este valor se encuentra por encima del recomendado que es un 25 % de variación en los datos.

Para el factor “C” de Hazem y Williams se obtuvo una desviación de 8.04 y un coeficiente de variación ($CV = 16.18\%$) el cual indica que los rangos de los valores se encuentran más cerca a la media, por lo tanto, mediante este indicador se puede determinar que los valores se encuentran dentro de los rangos recomendados.

Los valores de Desviación y el coeficiente de variación, encontrados para el coeficiente de rugosidad “n” de Manning, fue de 0.0035 de desviación y un coeficiente de variación (CV = 15.08%), el cual nos indica que se encuentra dentro de los rangos normales, además es el método que su coeficiente de variación fue menor comparado con los otros dos métodos.

Mediante la media o el promedio obtenidos por los métodos de Colebrook, Hazen y Manning calculados a partir de los datos obtenidos en laboratorio se determinaron los valores predeterminados como los respectivos coeficientes de rugosidad.

Cuadro 4.3: Valores de rugosidad para los métodos de Colebrook, Hazen y Manning.

Método	Rugosidad Ks (m)	Factor (C) Hazen Williams	Manning (n)
Media	0.0161	50	0.0232
Desviación	0.0069	8.05	0.0035

FUENTE: Elaboración propia.

Comparando los valores de rugosidad del bambú (*guadua angustifolia*) encontrados en esta investigación, para los valores encontrados por (Almeida *et al.*, 1999), 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.

4.1.4. 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. Para ello se usaron indicadores de ajustes como el coeficiente de eficiencia “CE” y el error cuadrático medio “ECM”. Estos indicadores se los realizo para los diez tramos de tuberías de bambú.

Tras un análisis comparativo se encontró que a través de las formula 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.

A continuación, se muestran los resultados de los valores de pérdida de carga medidos en laboratorio, así como los estimados por los tres métodos, este análisis se realizó para cada una de las tuberías.

a. Análisis comparativo para la tubería 1

En la figura 4.7, se observa gráficamente los valores medidos de pérdidas de carga para la tubería 1 versus los valores estimados para los métodos de Hazen, Manning y Darcy.

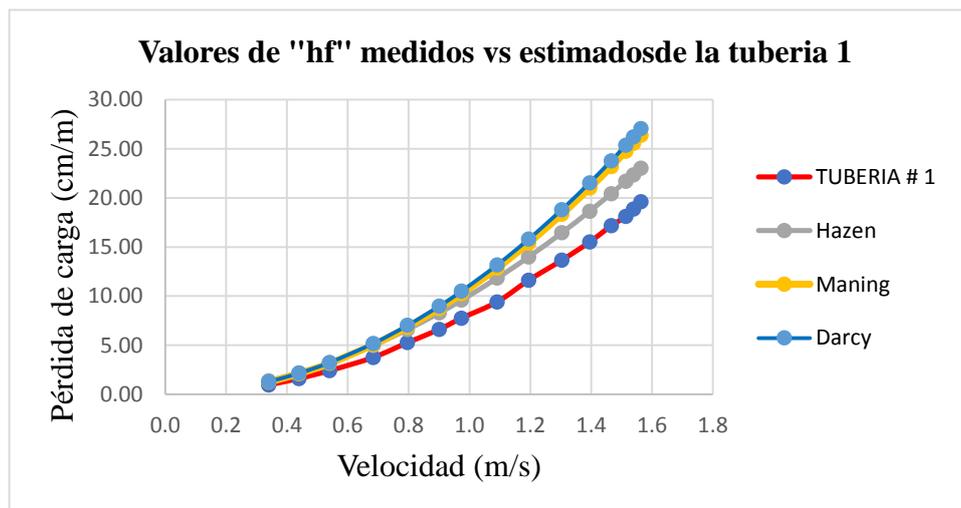


Figura 4.7: Comparación de los valores medidos con los estimado para la tubería 1.

FUENTE: Elaboración propia.

Se observa que los valores estimados se encuentran por encima del valor medido, esto debe a que la tubería 1 está entre las tuberías que presentaron valores de menor fricción debido a una mejor calidad en los acabados de sus entrenudos.

Con el objetivo de conocer cuánto los valores estimados representan a los valores medidos, se usaron indicadores de ajustes como el coeficiente de eficiencia “CE” y el error cuadrático medio “ECM”.

Cuadro 4.4: Indicadores de ajuste mediante el ECM y el CE para la tubería 1.

	Hazen - Williams	Manning	Darcy - Weisbach
ECM	2.41	4.20	4.63
ECM ($V \leq 0.8$)	0.94	1.00	1.11
CE	0.859	0.654	0.618
CE ($V \leq 0.8$)	0.984	0.982	0.978

FUENTE: Elaboración propia.

Como se observa en el cuadro 4.4, el Error cuadrático medio es menor por el método de Hazen – Williams, como se observa gráficamente en la figura 4.7; mediante el cálculo del coeficiente de eficiencia el cual da una mejor interpretación de cuanto se acercan los valores estimados a los medidos, se obtuvo un valor de $CE = 0.86$, para el método de Hazen-Williams, lo cual nos indica que un 86% los valores estimados representan a los medidos, se encontró un menor CE por el método de Darcy - Weisbach, seguido por el método de Manning, encontrándose valores muy poco representativo.

Se observa además que los tres métodos usados para velocidades inferiores de 0.8 m/s obtienen $ECM < 1.11$ y un coeficiente de eficiencia $EC > 0.98$, siendo valores muy confiables para su aplicación.

b. Análisis comparativo para la tubería 2

el valor de rugosidad de la tubería 2 se encuentra entre los más altos de las 10 tuberías analizadas, obteniendo un $C = 40$, que por ende se atribuye a una pésima perforación de sus entrenudos.

La figura 4.8 muestra gráficamente los valores medidos con los estimados para la tubería 2.

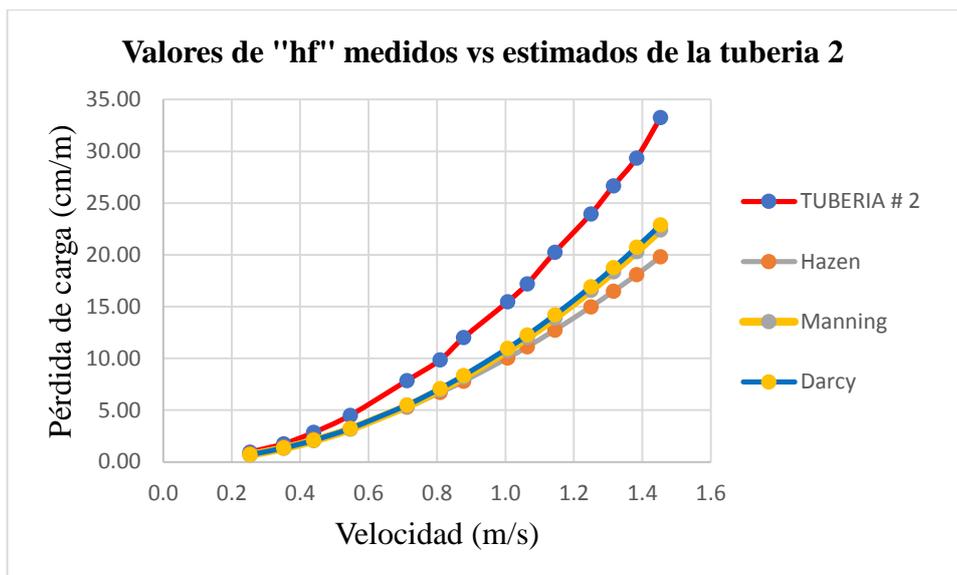


Figura 4.8: Comparación de los valores medidos con los estimados para la tubería 2.

FUENTE: Elaboración propia.

La tubería 2 presentó la mayor pendiente de la curva de todas las tuberías analizadas, se observa que el método de cálculo de Darcy a partir de una velocidad de 0.8 m/s realiza una mayor pendiente en su curva acercándose más a los valores medidos, seguida por el método de Manning y por último el método de cálculo de Hazen - Williams.

En el cuadro 4.7 se detalla mediante indicadores de ajuste la representación de los valores estimados a los medidos.

Cuadro 4.5: Indicadores de ajuste mediante el ECM y el CE para la tubería 2.

	Hazen - Williams	Manning	Darcy - Weisbach
ECM	6.82	5.63	5.37
ECM (V ≤ 0.8)	1.77	1.70	1.61
CE	0.567	0.705	0.732
CE (V ≤ 0.8)	0.972	0.974	0.977

FUENTE: Elaboración propia.

Se Observa que el error cuadrático medio fue mayor que en la tubería uno, obteniéndose un $ECM > 5.37$ que fue el valor más bajo encontrado por el método de Darcy – Weisbach, el cual confirma lo visto gráficamente, además se obtuvo un coeficiente de eficiencia $CE =$

0.73 que fue el valor más alto obtenido, el cual se considera que no hubo una excelente representación a los valores medidos; esto se debe a que la tubería dos se encuentra entre las más rugosas, alejándose de los valores medios de los coeficientes de rugosidad obtenidos. Lo contrario ocurre para cuando se cuantifica para velocidades menores a 0.8 m/s, donde la pendiente de la curva de los valores medidos es menos brusca, con lo cual los 3 métodos muestran un coeficiente de eficiencia $CE > 0.97$, el cual nos indica que existe una buena representación a los valores medidos.

c. Análisis comparativo para la tubería 3

Se observa que los valores medidos con los valores estimados presentan mayor homogeneidad entre ellos, esto se debe a que la tubería 3 es la segunda tubería que más se acerca a los valores promedios para los coeficientes de rugosidad determinados para cada método aplicado.

La figura 4.9 muestra la confianza de los coeficientes determinados mediante la aplicación de los métodos más usados para la determinación de la pérdida de carga, como lo son el método de Hazen – Williams, uno de los más usados para el diseño de tuberías de riego, así como los métodos de Manning y Darcy – Weisbach que es un método muy usado para el dimensionamiento de tuberías de redes.

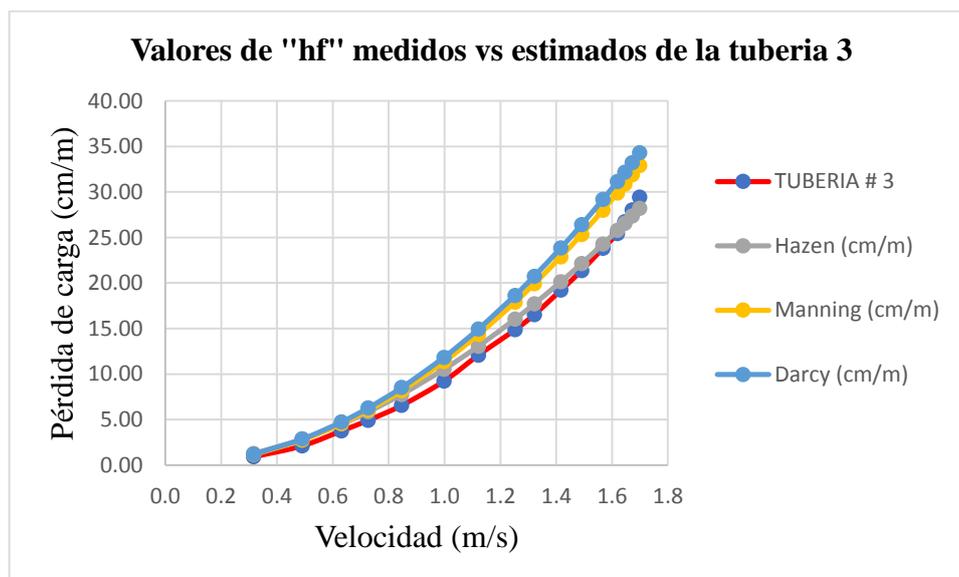


Figura 4.9: Comparación de los valores medidos con los estimado para la tubería 3.

FUENTE: Elaboración propia.

Se puede observar que la pendiente de la curva es menor que en la tubería 2 anteriormente analizadas, y esto se debe a una mejor perforación de sus entrenudos, para este caso la ecuación de Hazen – Williams comúnmente presenta valores más cercanos a los valores medidos, como se puede ver la ecuación de Darcy – Weisbach y Manning a partir de una velocidad aproximada a los 0.8 m/s aumentan su pendiente siendo beneficioso para tuberías que presenten mayores rugosidades.

Cuadro 4.6: Indicadores de ajuste mediante el ECM y el CE para la tubería 3.

	Hazen - Williams	Manning	Darcy - Weisbach
ECM	0.89	3.03	3.90
ECM ($V \leq 0.8$)	0.84	0.99	1.21
CE	0.991	0.900	0.834
CE ($V \leq 0.8$)	0.995	0.993	0.990

FUENTE: Elaboración propia.

El cuadro 4.6 confirma lo antes analizados visualmente, el cual nos indica mediante los indicadores de ajuste, que determinan con valores cuantificables la exactitud en la representación por los métodos usados hacia los valores medidos, se observa que cada método estuvo por encima de un 83% en representación de los valores medidos.

El método de Hazen – Williams fue el que mejor se ajustó obteniendo un $ECM < 1$ y un coeficiente de eficiencia $CE = 99\%$, representando muy bien a los valores medidos. Para velocidades menores a 0.8 m/s, se obtuvieron valores muy confiables, como el coeficiente de eficiencia $CE > 0.990$, que fue el valor más bajo encontrado por el método de Darcy – Weisbach.

d. Análisis comparativo para la tubería 4

La tubería 4 se encuentra entre las tuberías que presentaron valores de rugosidad más elevados, encontrándose sus por encima de la rugosidad media obtenida de todas las tuberías analizadas.

En la figura 4.10 se visualiza de mejor manera los valores estimados por los métodos aplicados, así como los valores medidos en laboratorio.

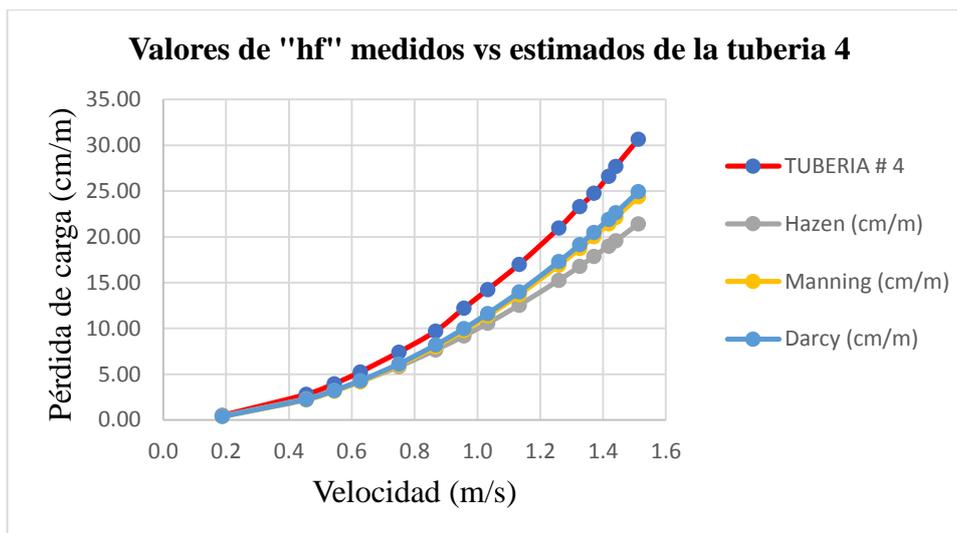


Figura 4.10: Comparación de los valores medidos con los estimado para la tubería 4.

FUENTE: Elaboración propia.

Se puede observar que los valores más cercanos a los valores medidos se dan por el método de Darcy – Weisbach, seguido por el método de Manning y por último el método de Hazen – Williams. Este comportamiento se observa en todas las tuberías analizadas anteriormente donde el método de Darcy – Weisbach representa mejor a los valores medidos para las tuberías que presentaron rugosidades más elevadas, seguido por el método de Manning. Además, se observa que hasta velocidades cercanas a 0.8 m/s, los tres métodos aplicados representan muy bien a los valores medidos. Se observa que a medida que aumenta la velocidad, las diferencias entre los valores medidos y los estimados son mayores.

El cuadro 4.7 a través de indicadores de ajustes como el error cuadrático medio ECM y el coeficiente de eficiencia CE, cuantifican la representación de los valores estimados a los valores medidos.

Cuadro 4.7: Indicadores de ajuste mediante el ECM y el CE para la tubería 4.

	Hazen - Williams	Manning	Darcy - Weisbach
ECM	5.05	3.55	3.22
ECM (V ≤ 0.8)	0.93	0.91	0.82
CE	0.730	0.866	0.890
CE (V ≤ 0.8)	0.993	0.994	0.995

FUENTE: Elaboración propia.

Se observa en el cuadro 4.7, que el método de Darcy – Weisbach obtuvo un $ECM = 3.22$ siendo el valor más bajo alcanzado por los tres métodos, y un $CE = 0.89$ siendo el mayor coeficiente de eficiencia obtenidos por los tres métodos. Por el otro extremo el método de Hazen – Williams obtuvo los valores más bajos, con un coeficiente de eficiencia $CE = 0.73$, siendo este valor poco representativo para los valores medidos que pudieran darse. Este comportamiento es común por el método de Hazem Williams para tuberías que presentan valores de rugosidad más elevados.

Además, se observa que a velocidades menores de 0.8 m/s, donde comúnmente la pendiente de los valores medidos es menor que para velocidades mayores a 0.8 m/s, se obtienen valores de $ECM < 1$ y un $CE > 0.992$, siendo estos valores muy confiables.

e. Análisis comparativo para la tubería 5

Esta tubería presentó los valores más cercanos a los valores medios para los coeficientes de rugosidad para los tres métodos.

Se observa en la figura 4.11 los valores medidos de pérdida de carga encontrados en el laboratorio y los estimados por los métodos de Hazem – Williams, Manning y el método de Darcy – Weisbach. Se observa que los valores estimados por los tres métodos se aproximaron muy bien a los medidos.

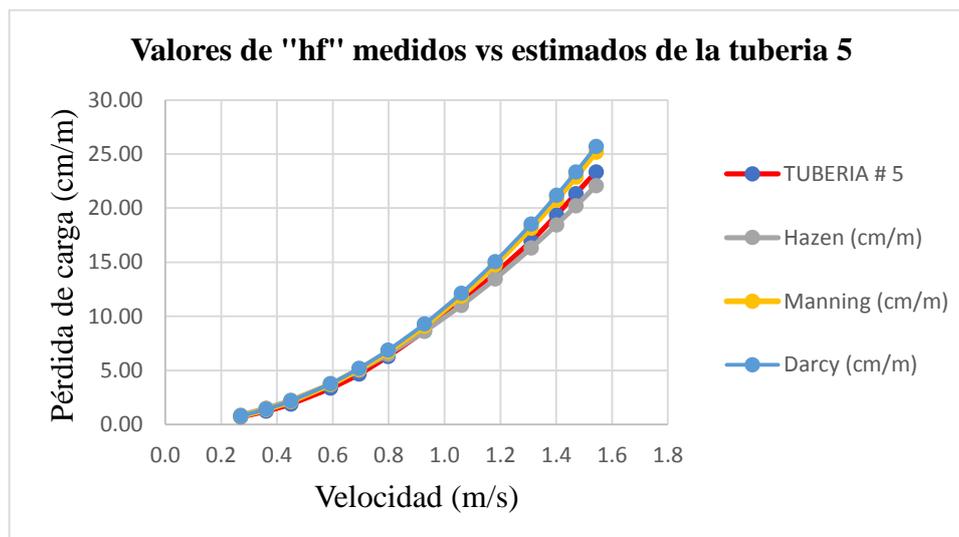


Figura 4.11: Comparación de los valores medidos con los estimado para la tubería 5.

FUENTE: Elaboración propia.

Se puede observar que los valores de los métodos aplicados se ajustan muy bien a los valores medidos, además se observa que los métodos conservan el mismo comportamiento para todas las tuberías analizadas anteriormente, donde el método de Darcy – Weisbach arroja valores mayores que los otros dos métodos, encontrándose ligeramente por encima del valor medido; mientras que el método de Hazem – Williams, por lo general arroja valores menores que los otros dos métodos dando resultados más próximos para tuberías de menor rugosidad, para esta tubería, este método se encuentra ligeramente por debajo de los valores medidos. El cuadro 4.8, mediante los indicadores de ajustes se cuantifica la efectividad de los métodos mencionados.

Cuadro 4.8: Indicadores de ajuste mediante el ECM y el CE para la tubería 5.

	Hazen - Williams	Manning	Darcy - Weisbach
ECM	0.62	0.92	1.20
ECM ($V \leq 0.8$)	0.30	0.31	0.39
CE	0.994	0.986	0.976
CE ($V \leq 0.8$)	0.998	0.998	0.997

FUENTE: Elaboración propia.

El error cuadrático medio y el coeficiente de eficiencia arrojan valores más confiables para el método de Hazen – Williams con un ECM = 0.62 y un coeficiente de eficiencia CE = 0.994, seguido por el método de Manning que presenta valores con ECM = 0.92 y un CE = 0.986, y por último el Método de Darcy – Weisbach con ECM = 1.20 y un CE = 0.976. Vale recalcar que los tres métodos presentaron valores muy confiables y representativos, siendo muy poca la diferencias entre ellos.

Para el análisis de velocidades menores a 0.8 m/s se hallaron valores de muy alta confiabilidad en la representación de los valores estando por encima de 0.996 para los tres métodos aplicados.

f. Análisis comparativo para la tubería 6

La tubería 6 obtuvo un de $C = 46$ por el método de Hazen - Williams, encontrándose muy cercano al valor de la media con $C = 50$

La figura 4.12 muestra los valores de pérdida de carga encontrados en laboratorio, versus los estimados. Se observa que los valores medidos con los valores estimados presentan mayor homogeneidad por el método de Darcy – Weisbach.

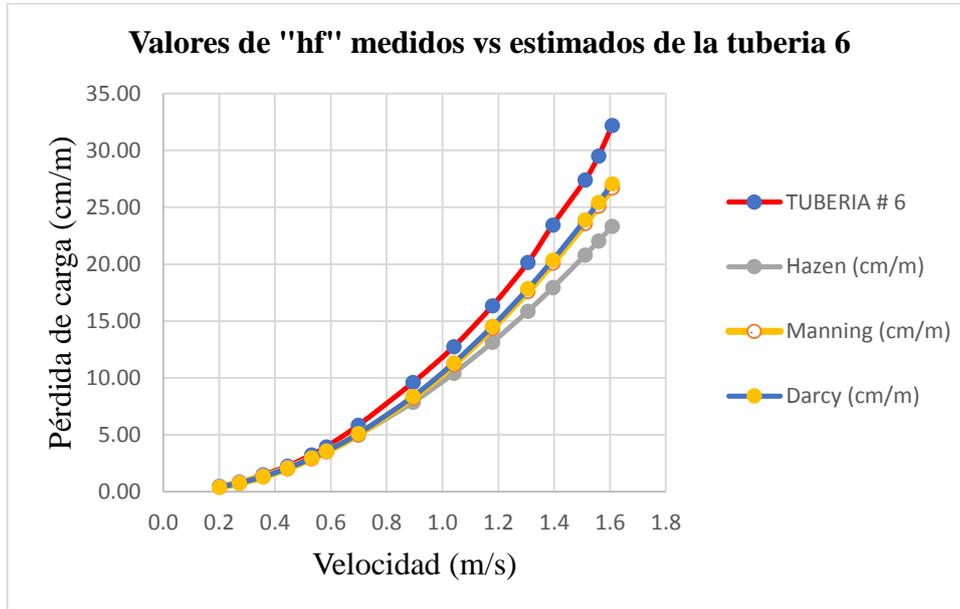


Figura 4.12: Comparación de los valores medidos con los estimados para la tubería 6.

FUENTE: Elaboración propia.

Se puede observar que el método de Darcy – Weisbach se aproxima más a los valores medidos, seguido por el método de Manning que comúnmente presenta valores muy similares a los de Darcy – Weisbach. Es común para tuberías con mayor rugosidad que el método de Darcy – Weisbach presente valores más aproximados. Además, se observa que los valores estimados por los tres métodos se ajustan perfectamente a los medidos hasta una cierta velocidad, donde la pendiente de la curva de los valores medidos es menor, este comportamiento se observa en todas las tuberías analizadas anteriormente.

El cuadro 4.9 nos brinda la cuantificación de la aproximación de los valores estimados a los medidos, mediante indicadores de ajustes como lo son el error cuadrático medio ECM y el coeficiente de eficiencia CE.

Cuadro 4.9: Indicadores de ajuste mediante el ECM y el CE para la tubería 6.

	Hazen - Williams	Manning	Darcy - Weisbach
ECM	4.05	2.47	2.28
ECM ($V \leq 0.8$)	0.37	0.39	0.35
CE	0.864	0.949	0.957
CE ($V \leq 0.8$)	0.9987	0.9986	0.9988

FUENTE: Elaboración propia

Se puede observar que el método de Darcy – Weisbach obtuvo una mayor aproximación a los valores medidos que los demás métodos, presentando un ECM = 2.28. Además, el indicador del coeficiente de eficiencia fue de CE = 0.957, el cual nos indica que el 95% de sus valores son iguales a los valores medidos.

El método de Manning siempre presenta valores muy similares a los obtenidos por Darcy – Weisbach, obteniéndose un error cuadrático medio ECM = 2.47 y un coeficiente de eficiencia CE = 0.949, el cual se obtiene una muy buena representación de los valores medidos.

El método de Hazem – Williams presentó valores más bajos, obteniendo un error cuadrático medio ECM = 4.05 y un coeficiente de eficiencia CE = 0.864, siendo estos valores aun aceptables.

Mientras que para el análisis de velocidades menores a 0.8 m/s los tres métodos presentaron valores mucho más elevados, llegando un error cuadrático medio ECM muy aproximado a cero, y un coeficiente de determinación CE muy cercano a 1.

g. Análisis comparativo para la tubería 7

La tubería 7 obtuvo un valor de rugosidad promedio de $C = 42$ por el método de Hazem – Williams, siendo esta la segunda tubería más rugosa de los bambú analizados, quedando por debajo de la media con $C = 50$.

Se observa en la figura 4.13, que por primera ocasión los valores encontrados a través del método de Manning se acercan más a los valores medidos, esto comparando los valores

obtenidos por los métodos de Darcy – Weisbach y Hazem – Williams. Ya que por los tres métodos se observa que los valores estimados no se encuentran muy cercano a los medidos.

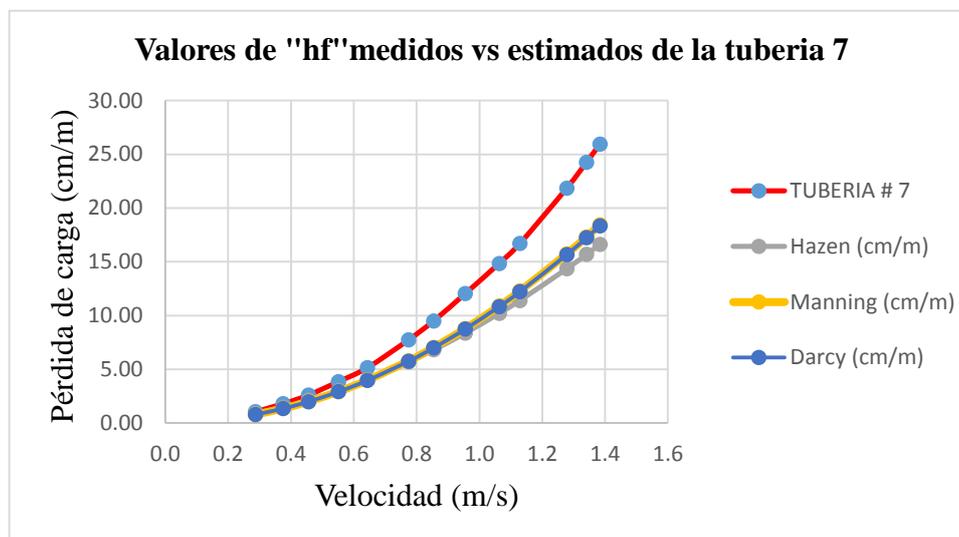


Figura 4.13: Comparación de los valores medidos con los estimados para la tubería 7.

FUENTE: Elaboración propia.

Se puede observar que el método de Manning se acerca más a los valores medidos, seguido por el método de Darcy - Weisbach que comúnmente presenta valores muy similares a los de Manning. Es común en este análisis que para tuberías con mayor rugosidad el método de Darcy – Weisbach y Manning presenten valores más aproximados a los medidos. Además, se observa que los valores estimados por los tres métodos no se alejan tanto entre ellos como se observa para otras tuberías. En general se observa que ninguno de los tres métodos representa bien a los valores medidos, alejándose aún más a medida que aumenta la velocidad. Caso contrario ocurre para velocidades menores a 0.8 m/s, que se ajustan mucho más a los medidos.

Cuadro 4.10: Indicadores de ajuste mediante el ECM y el CE para la tubería 7.

	Hazen - Williams	Manning	Darcy - Weisbach
ECM	4.75	3.93	3.98
ECM (V ≤ 0.8)	1.05	1.06	1.07
CE	0.680	0.781	0.776
CE (V ≤ 0.8)	0.983	0.982	0.982

FUENTE: Elaboración propia.

Se puede observar que el método de Manning obtuvo una mayor aproximación a los valores medidos que los demás métodos, presentando un error cuadrático medio $ECM = 3.93$, y un coeficiente de eficiencia fue de $CE = 0.781$, el cual nos indica que el 78% de sus valores representaron a los valores medidos, el cual se considera una representación regular pero aceptable.

Para el método de Darcy - Weisbach se determinó un error cuadrático medio $ECM = 3.98$ y un coeficiente de eficiencia $CE = 0.776$, siendo estos valores muy cercanos a los encontrados por el método de Manning, los cuales se consideran regulares para la representación de los valores medidos.

El método de Hazem – Williams presentó valores más bajos aun, obteniendo un error cuadrático medio $ECM = 4.75$ y un coeficiente de eficiencia $CE = 0.68$, siendo estos valores no aceptables, y muy poco representativos.

Para el análisis de velocidades menores a 0.8 m/s los tres métodos presentaron valores mucho más elevados, y aún más para el método de Hazen – Williams que obtuvo un error cuadrático medio $ECM = 1.05$, y un coeficiente de determinación $CE = 0.983$. Seguido por los métodos de Darcy – Weisbach y Manning que presentaron valores similares para el coeficiente de eficiencia $CE = 0.982$ para ambos métodos.

h. Análisis comparativo para la tubería 8

La tubería 8 se encontraron valores medios de $C = 60$, como referencia por el método de Hazen – Williams, siendo esta la segunda tubería que presentó rugosidad más baja, teniendo en cuenta que la media aplicada para este método fue de $C = 50$.

La figura 4.14 muestra los valores de pérdida de carga medida con las estimadas por los métodos de Hazen – Williams, Manning y Darcy – Weisbach.

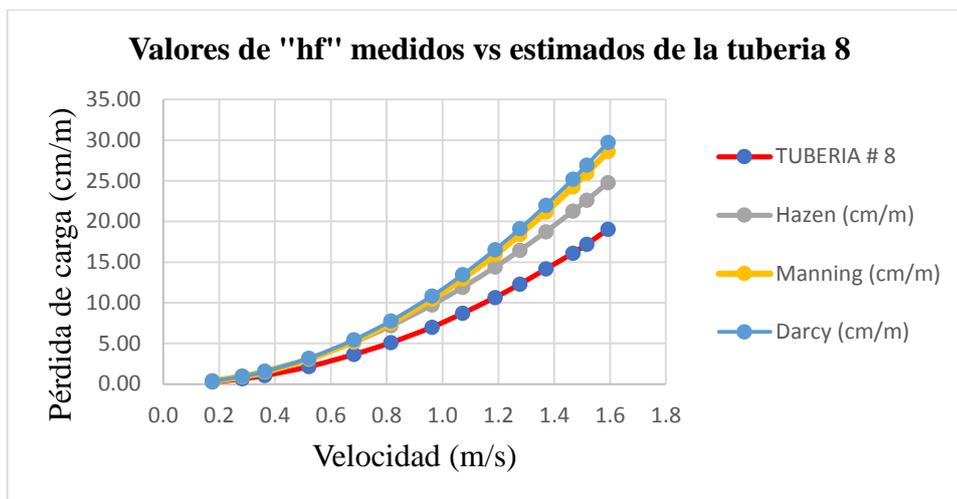


Figura 4.14: Comparación de los valores medidos con los estimados para la tubería 8.

FUENTE: Elaboración propia.

Se observa que la pendiente de la curva de los valores medidos de pérdida de carga es más suave para tuberías que son menos rugosas, además se observa que los métodos de cálculo sobreestiman los valores medidos, observándose una mayor sobreestimación por el método de Darcy – Weisbach, seguido por el método de Manning, que presentan un mismo comportamiento de sobreestimación para las tuberías de menor rugosidad.

Se observa además que a mayores velocidades los valores estimados se alejan aún más, este comportamiento se ha observado para todas las tuberías analizadas.

En el cuadro 4.11 se observan los resultados de los indicadores de ajustes, donde cuantifican el error mediante el cálculo de error cuadrático medio ECM y el cálculo del coeficiente de eficiencia CE.

Cuadro 4.11: Indicadores de ajuste mediante el ECM y el CE para la tubería 8.

	Hazen - Williams	Manning	Darcy - Weisbach
ECM	3.45	5.26	5.87
ECM (V ≤ 0.8)	1.15	1.25	1.40
CE	0.702	0.540	0.490
CE (V ≤ 0.8)	0.969	0.963	0.954

FUENTE: Elaboración propia

Se puede observar que no hubo una buena representación de los valores estimados a los valores medidos. Se observa que el método de Hazen – Williams fue el que mayormente se acercó a los valores medidos de pérdida de carga, obteniendo un error cuadrático medio $ECM = 3.45$ y un coeficiente de eficiencia $CE = 0.70$.

Se observa que los métodos de Darcy – Weisbach y Manning presentan valores muy altos del error cuadrático medio $ECM = 5.87$ y 5.26 , así como el coeficiente de eficiencia $CE = 0.49$ para el método de Darcy – Weisbach y $CE = 0.54$ para el método de Manning, Siendo los valores de estos dos métodos muy deficientes y muy poco representativos.

Para el análisis de velocidades menores a 0.8 m/s los tres métodos presentaron valores mucho más elevados, el método de Hazen – Williams obtuvo una representación superior que los demás métodos, obteniendo un error cuadrático medio $ECM = 1.15$, y un coeficiente de determinación $CE = 0.969$. Seguido por los métodos de Manning que presentaron valores similares para el coeficiente de eficiencia $CE = 0.963$.

i. Análisis comparativo para la tubería 9

La tubería 9 presentó los valores más bajos de rugosidad, encontrándose un $C = 63$ para el método de Hazen – Williams, siendo el valor más alejado de la media $C = 50$.

Se observó que los valores estimados por los tres métodos aplicados sobreestiman fuertemente a los valores medidos.

A continuación, se muestra gráficamente a través de la figura 4.15 los valores de pérdida de carga medida a través del laboratorio y los valores estimados por los métodos de Hazen – Williams, Manning y Darcy – Weisbach.

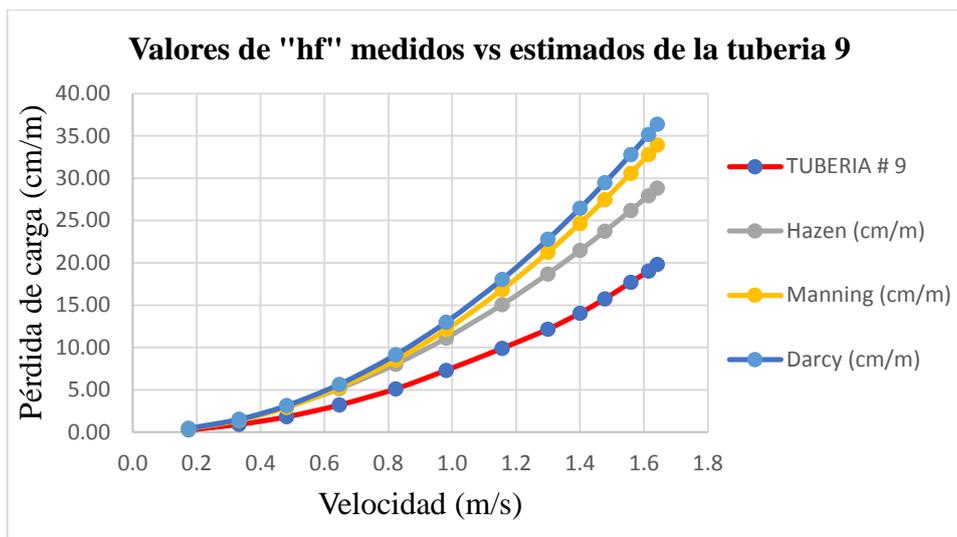


Figura 4.15: Comparación de los valores medidos con los estimados para la tubería 9.

FUENTE: Elaboración propia.

En la figura 4.15 se manifiesta una muy baja representación de los valores estimados hacia los valores medidos, incluso para velocidades menores a 0.8 m/s se observa una diferencia significativa comparada con las demás tuberías anteriormente analizadas. Se observa además que el método de Hazen – Williams realiza un mayor acercamiento comparado con los métodos de Darcy – Weisbach y Manning, donde comúnmente sobrestiman para tuberías con valores de baja rugosidad.

Cuadro 4.12: Indicadores de ajuste mediante el ECM y el CE para la tubería 9.

	Hazen - Williams	Manning	Darcy - Weisbach
ECM	5.89	8.67	10.16
ECM (V ≤ 0.8)	1.67	1.86	2.20
CE	0.494	0.282	0.158
CE (V ≤ 0.8)	0.953	0.942	0.918

FUENTE: Elaboración propia.

Se puede observar para esta tubería los valores más alejados hacia los valores medidos, con una representación muy pobre, más aún para el método Darcy Weisbach que presentó un error cuadrático medio ECM = 10.16 y un coeficiente de eficiencia de apenas del CE = 0.158, seguida por el método de Manning que obtuvo un ECM = 8.67 y un coeficiente de eficiencia

CE = 0.28, siendo estos valores inaceptables y nada representativos. El método de Hazen – Williams obtuvo valores más cercanos a los valores medidos, pero a la vez muy poco representativo encontrándose un ECM = 5.89 y un coeficiente de eficiencia CE = 0.49.

Para el análisis de velocidades menores a 0.8 m/s se encontraron valores muy aceptables, se observó que estos valores fueron menores para los tramos de tubería analizados anteriormente, obteniéndose valores desde CE = 0.918 por el método de Darcy – Weisbach siendo este el valor más bajo entre los tres métodos.

j. Análisis comparativo para la tubería 10

La tubería 10 se encuentra entre las tuberías con valores de más altas de rugosidad, teniendo un C = 43 por el método de Hazen – Williams, siendo esta tubería la tercera más rugosa de las diez analizadas, encontrándose por debajo de la media C = 50.

En la figura 4.16 se observan sus valores medidos de pérdida de carga, así como los valores estimados por los métodos de Hazen – Williams, Manning y Darcy – Weisbach. Se observa en general que los valores estimados por los tres métodos subestiman los valores medidos. Además, se observa que los valores estimados por el método de Darcy – Weisbach obtuvo una mayor aproximación, que los otros dos métodos.

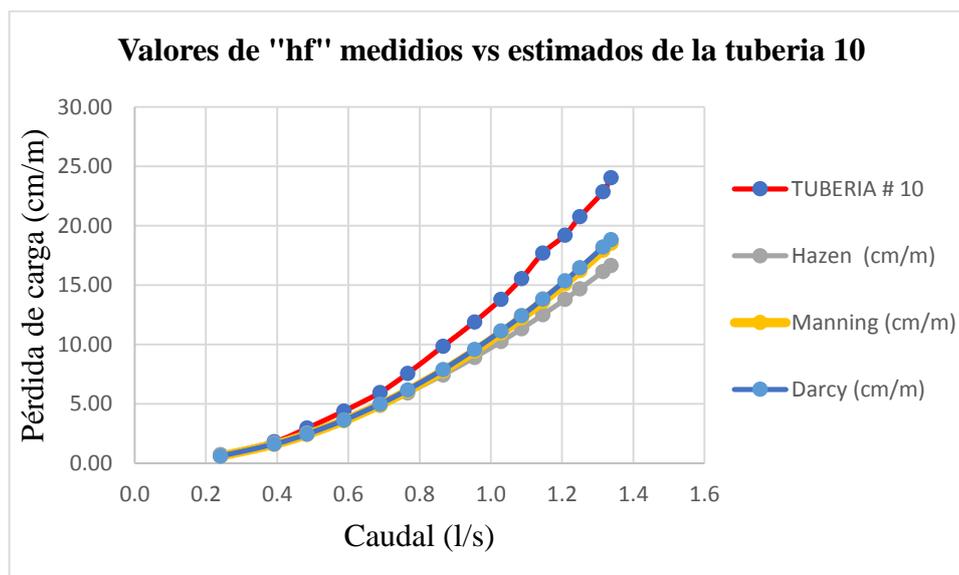


Figura 4.16: Comparación de los valores medidos con los estimados para la tubería 10.

FUENTE: Elaboración propia.

Se observa en la figura 4.16 que existe una buena representación de los valores estimados para los valores medidos por los tres métodos, existiendo un mínimo rango de variación entre ellos, aunque se mantiene lo visto en cada análisis realizado anteriormente, donde el método de Darcy comúnmente realiza una mayor pendiente en su curva a partir de cierta velocidad, haciéndolo favorable para tuberías con mayor rugosidad.

Cuadro 4.13: Indicadores de ajuste mediante el ECM y el CE para la tubería 10.

	Hazen - Williams	Manning	Darcy - Weisbach
ECM	4.02	3.08	2.91
ECM ($V \leq 0.8$)	0.87	0.84	0.78
CE	0.722	0.837	0.854
CE ($V \leq 0.8$)	0.989	0.990	0.991

FUENTE: Elaboración propia.

Se observa en el cuadro 4.13, que el método de Darcy – Weisbach obtuvo una mayor aproximación a los valores medidos obteniendo un ECM = 2.91 y un coeficiente de eficiencia CE = 0.854, siendo este valor representativo a los valores medidos. Luego, el método Manning fue el segundo en representar mejor a los valores medidos, con un error cuadrático medio ECM = 3.08 y un coeficiente de eficiencia CE = 0.837, siendo estos valores cercanos a los obtenidos por Darcy, identificándose como representativo. Mientras que el método de Hazen – Williams obtuvo el valor más bajo de eficiencia CE = 0.72, lo cual se considera como medianamente representativo.

Para el análisis de velocidades menores a 0.8 m/s, se obtuvieron valores muy confiables y bastante representativos para los tres métodos aplicados, encontrándose valores para el error cuadrático medio ECM < 0.87 y valores del coeficiente de eficiencia superiores a CE > 0.98.

4.1.5. Análisis de eficiencia de los métodos de Hazen, Manning y Darcy.

- a. Comparación de los métodos aplicados a través de la media de los errores cuadráticos medios ECM, para las diez tuberías analizadas.

Cuadro 4.14: Media de los errores cuadráticos medios de las diez tuberías analizadas.

ECM de las diez tuberías analizadas				
Nº Tubería	Diámetro (cm)	Error Hazen	Error Manning	Error Darcy
1	7.51	2.41	4.20	4.63
2	7.60	6.82	5.63	5.37
3	7.20	0.89	3.03	3.90
4	7.57	5.05	3.55	3.22
5	7.62	0.62	0.92	1.20
6	7.76	4.05	2.47	2.28
7	8.17	4.75	3.93	3.98
8	7.26	3.45	5.26	5.87
9	6.69	5.89	8.67	10.16
10	7.73	4.02	3.08	2.91
Promedio		3.79	4.07	4.35

FUENTE: Elaboración propia.

Se observa en el cuadro 4.14, que no se encuentra una diferencia significativa entre los tres métodos aplicados, además los tres métodos presentan valores de errores medianamente altos, teniendo en cuenta que un valor perfecto tendría un $ECM = 0$. Se constata que el método de Hazen – Williams obtuvo valores más bajos obteniendo un $ECM = 3.79$, lo cual indica que obtuvo una mayor aproximación a los valores medidos, seguido por el método de Manning que obtuvo un $ECM = 4.07$.

A continuación, se muestra a través del cuadro 4.15 los valores de los errores cuadráticos medios de las diez tuberías analizadas para velocidades menores a 0.8 m/s.

Cuadro 4.15: Media de los errores cuadráticos para velocidades menores a 0.8 m/s.

ECM de las diez tuberías analizadas				
Nº Tubería	Diámetro (cm)	Error Hazen	Error Manning	Error Darcy
1	7.51	0.94	1.00	1.11
2	7.60	1.77	1.70	1.61
3	7.20	0.84	0.99	1.21
4	7.57	0.93	0.91	0.82
5	7.62	0.30	0.31	0.39
6	7.76	0.37	0.39	0.35
7	8.17	1.05	1.06	1.07
8	7.26	1.15	1.25	1.40
9	6.69	1.67	1.86	2.20
10	7.73	0.87	0.84	0.78
Promedio		0.99	1.03	1.10

FUENTE: Elaboración propia.

Se observa que a través de velocidades menores a 0.8 m/s, se obtiene valores de errores cuadráticos medio cercanos a cero, indicando que los valores estimados representan muy bien a los valores medidos. Se observa además que los valores medios de los tres métodos no presentan diferencias significativas. El método de Hazen Williams obtuvo los valores más bajos de errores, obteniendo un ECM = 0.99, seguido por el método Manning que obtuvo un ECM = 1.03.

b. Comparación de los métodos aplicados a través de la media de los coeficientes de eficiencia CE, para las diez tuberías analizadas.

Otro indicador muy importante es el coeficiente de eficiencia, a continuación, se muestran los coeficientes encontrados para las diez tuberías analizadas, se muestran los resultados considerando la totalidad de los valores medidos y para velocidades menores a 0.8 m/s.

Cuadro 4.16: Media de los coeficientes de eficiencia de las diez tuberías analizadas.

CE de las diez tuberías analizadas				
Nº Tubería	Diámetro (cm)	CE Hazen	CE Manning	CE Darcy
1	7.51	0.86	0.65	0.62
2	7.60	0.57	0.7	0.73
3	7.20	0.99	0.9	0.83
4	7.57	0.73	0.87	0.89
5	7.62	0.99	0.99	0.98
6	7.76	0.86	0.95	0.96
7	8.17	0.68	0.78	0.78
8	7.26	0.7	0.54	0.49
9	6.69	0.49	0.28	0.16
10	7.73	0.72	0.84	0.85
Promedio		0.76	0.75	0.73

FUENTE: Elaboración propia.

Se puede observar que la media del coeficiente de eficiencia para los distintos métodos está dentro de un rango de 0.76 para el método de Hazen – Williams y 0.73 para el método de Darcy Weisbach, siendo para este método el valor más bajo encontrado. Se observa además que no existe una diferencia significativa entre los resultados de los métodos analizados.

Cuadro 4.17: Media de los coeficientes de eficiencia para velocidades menor a 0.8 m/s

CE de las diez tuberías analizadas				
Nº Tubería	Diámetro (cm)	CE Hazen	CE Manning	CE Darcy
1	7.51	0.9843	0.9823	0.9782
2	7.60	0.9722	0.9743	0.9768
3	7.20	0.995	0.993	0.9896
4	7.57	0.9933	0.9936	0.9948
5	7.62	0.9983	0.9983	0.9973
6	7.76	0.9987	0.9986	0.9988
7	8.17	0.983	0.982	0.982
8	7.26	0.969	0.963	0.954
9	6.69	0.953	0.942	0.918
10	7.73	0.989	0.99	0.991
Promedio		0.9835	0.9817	0.9781

FUENTE: Elaboración propia.

Se puede observar que a velocidades menores a 0.8 m/s, los valores estimados por los métodos aplicados, representan muy bien a los valores medidos, obteniéndose valores de CE > 0.978, valor más bajo obtenido por el método de Darcy Weisbach.

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

4.2.1. Determinación de la máxima presión de soporte del bambú como sistema.

Cuadro 4.18: Máxima presión de soporte del bambú como sistema.

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

FUENTE: Elaboración propia.

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 ese rango de presión de trabajo.

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

Se puede observar que un sistema de conducción soporto más presión, esto se debe al nivel de ajuste de las cámaras de bicicleta, y al ajuste de los tensores de alambre, como se lo describe en la metodología.

Bajo este análisis de presión de soporte del bambú, se instaló el sistema de riego para la parcela demostrativa para el cultivo de papa, donde estuvo sometida por 4 meses, el tiempo que duro el cultivo, a una presión de 25 PSI que era la máxima presión que daba el sistema.

4.2.2. Análisis de velocidades recomendables para el dimensionamiento de tuberías de bambú.

En la figura 4.17 se muestra la pérdida de carga de las diez tuberías analizadas, en función de la velocidad.

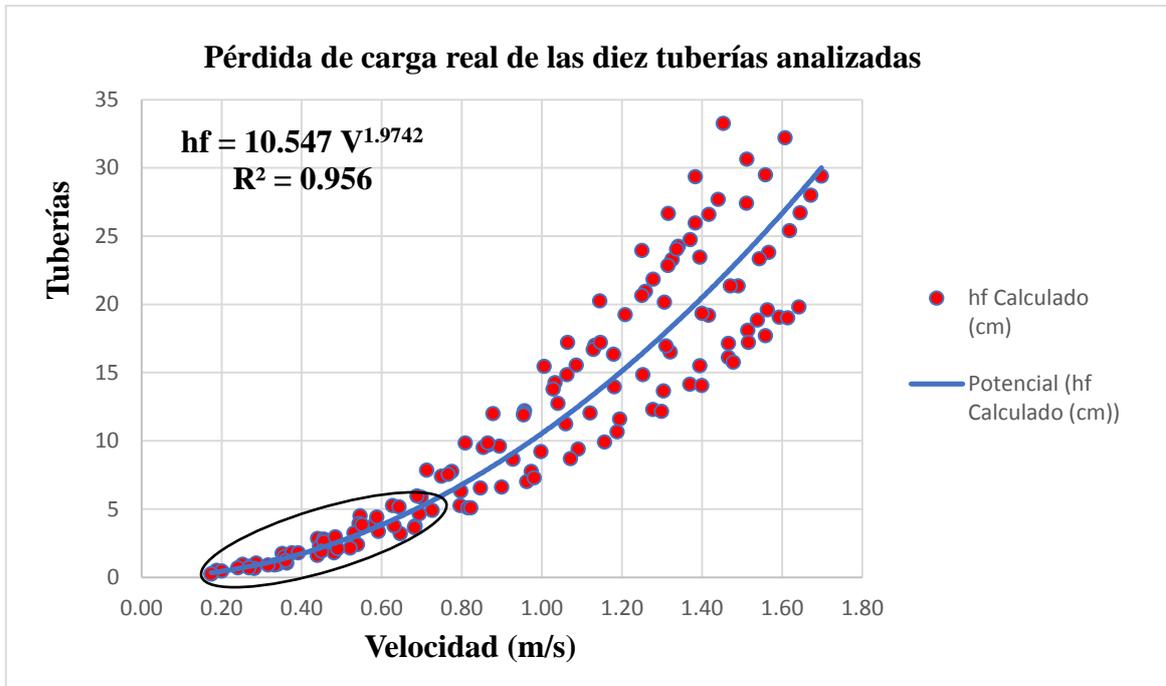


Figura 4.17: Análisis de velocidad recomendada para el diseño de bambú.

FUENTE: Elaboración propia.

Se puede observar en la figura 4.17, que las pérdidas de carga de las diez tuberías analizadas son muy similares hasta velocidades cercanas a 0.8 m/s, 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 m/s aproximadamente, las pérdidas de carga se elevan potencialmente obteniéndose valores distintos para cada bambú.

Es por ello que en esta investigación se recomienda mantener velocidades desde 0.30 - 0.8 m/s, como velocidad máxima para el diseño de tuberías de bambú.

4.3. Implementación de la parcela demostrativa

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en campo para los parámetros más importante relacionados al tema de investigación, como lo es, la eficiencia de aplicación que cumple con el objetivo general que inspiro a la ejecución de este proyecto, de encontrar métodos económicos que ayuden hacer frente al cambio climático con sistemas de riego que mejoren la eficiencia en el uso del agua.

4.3.1. Eficiencia de aplicación encontrada en la parcela demostrativa

Cuadro 4.19: Eficiencia de aplicación.

Riego continuo		
Fecha:	Distancia Prueba (m)	Ea (%)
23/Junio/17 - 13/oct/17	31.00	54.22
	61.00	47.96

FUENTE: Elaboración propia.

Se puede observar en el cuadro 4.19, que a medida que aumenta la distancia del surco la eficiencia de aplicación disminuye, esto se debe a la percolación profunda que se genera en los surcos al conducir el agua a una cierta distancia, donde se va infiltrando en el suelo llegando a profundidades más allá de las raíces del cultivo donde no son aprovechadas por las plantas. En general se encontró una eficiencia de aplicación cercana al 50 por ciento, porcentaje muy beneficioso en el ahorro del agua, encontrándose muy por encima de valores comunes para este tipo de riego con valores de eficiencia de apenas del 30 por ciento.

4.3.2. Costo de construcción del sistema de riego con tubería de bambú.

Cuadro 4.20: Costo de implementación del sistema de riego por bambú.

Costo para una línea de multicompuertas de 21 metros y línea de abastecimiento de bambú de 20 metros				
Rubros	Unidad	Cantidad	P. Unitario	Total
Bambú	Tramos	13	S/17.00	S/221.00
Multicompuertas de 2 plg	Unidad	25	S/3.50	S/87.50
Punto medidor de presión	Unidad	2	S/30.00	S/60.00
Válvula de compuerta de 3 plg	Unidad	1	S/25.00	S/25.00
Codo de 90 de 4 plg	Unidad	1	S/15.00	S/15.00
Pegamento silicona Sika	tubo	2	S/25.00	S/50.00
Barniz ultra violeta	Galón	0.5	S/90.00	S/45.00
Tinner	Litro	1.0	S/6.00	S/6.00
Tornillo enroscable	unidad	80.0	S/0.25	S/20.00
Alambre sin punta	m	10.0	S/1.00	S/10.00
Lija # 150	pliegue	6	S/1.50	S/9.00
Brocha	Unidad	1	S/12.00	S/12.00
Tapón de 3 plg	Unidad	1	S/3.50	S/3.50
Cámara de bicicleta usado	Unidad	10	S/1.00	S/10.00

Gasto Total	S/564
--------------------	--------------

FUENTE: Elaboración propia.

El cuadro 4.20 se observan los gastos efectuados para la construcción del sistema de riego por multicompuertas, implementados en la parcela demostrativa. El sistema contaba de dos partes, una que funcionaba como línea de abastecimiento con una longitud de 20 metros de tubería de bambú ciega, y otra parte como línea de riego a través de las multicompuertas con una longitud de 21 metros para 21 surcos, distanciados a 1 metro.

Como se puede observar, el rubro más fuerte se dio en la compra del bambú con un valor de S /. 17 soles o de \$ 5.23 dólares americanos por costo unitario por bambú, que fueron comprados en la ciudad de Lima Perú, donde no se dan las condiciones idóneas para su reproducción natural, mayormente el bambú es obtenido del lado norte del País, lo que hacen encarecer sus precios drásticamente. Valor mucho más bajo se da en el país de Ecuador donde por ser un País tropical existe una abundancia de bambú, por lo cual su valor referencial esta por \$ 1 dólar o S /. 3.25 soles. Además, hay que considerar que en la mayoría

de los campos agrícolas de la costa del Ecuador los agricultores poseen el bambú de forma natural en sus campos.

4.4. Manual práctico de fácil entendimiento para la construcción de la conducción de bambú con sus rangos de aplicabilidad.

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.

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

En el cuadro 4.21 se detallan los posibles caudales, en función del diámetro y la pendiente, se seleccionó una gama de diámetros de 6 – 10 centímetros de diámetro interno, para un rango de pendientes de 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3 y 4 por ciento.

Cuadro 4.21: Selección de diámetro en función de la pendiente.

Diámetro (cm)	S %	Q (l/s)	S %	Q (l/s)	S %	Q (l/s)	S %	Q (l/s)						
6.00	0.5	0.49	1.0	0.70	1.5	0.85	2.0	0.98	2.5	1.10	3.0	1.20	4.0	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		1.12		1.58		1.93		2.23		2.50		2.73		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							

FUENTE: Elaboración propia.

Se observa en el cuadro 4.21, que a mayor pendiente y diámetro aumenta potencialmente el caudal, este cuadro servirá como 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.

4.4.2. Rango de caudales para conducciones de bambú para presiones constantes.

En los siguientes cuadros se observan los posibles caudales que podrían darse para presiones efectivas de 5, 10 y 15 mca, y para longitudes de 50, 100, 150, 200 y 300 metros.

Las presiones efectivas se consideran a las diferencias de cotas entre la carga de cabeza constante y la cota de la entrega del agua. Ya que, a diferencia en condiciones de pendiente, la carga de cabeza constante puede ser usado para terrenos ondulantes, hasta para sistemas de riego que se encuentren en contra de la pendiente.

Se consideró en los cuadros hasta presiones de 15 mca, para darle un rango de seguridad a posibles fallas que podrían darse en el sistema.

Cuadro 4.22: Selección de diámetro para presión de 5 mca.

Diámetro (cm)	H Carga (m)	L (m)	Caudal (l/s)								
6.00	5	50	2.20	100	1.56	150	1.27	200	1.10	300	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			4.98		3.54		2.90		2.51		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						

FUENTE: Elaboración propia.

Cuadro 4.23: Selección de diámetro para presión de 10 mca.

Diámetro (cm)	H Carga (m)	L (m)	Caudal (l/s)								
6.00	10	50	3.11	100	2.20	150	1.80	200	1.56	300	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			7.04		5.01		4.10		3.55		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

FUENTE: Elaboración propia.

Cuadro 4.24: Selección de diámetro para presión de 15 mca.

Diámetro (cm)	H Carga (m)	L (m)	Caudal (l/s)								
6.00	15	50	3.80	100	2.70	150	2.21	200	1.91	300	1.56
6.25			4.27		3.03		2.48		2.15		1.76
6.50			4.78		3.40		2.78		2.41		1.97
6.75			5.32		3.78		3.09		2.68		2.19
7.00			5.90		4.20		3.43		2.97		2.43
7.25			6.52		4.64		3.79		3.29		2.69
7.50			7.18		5.11		4.18		3.62		2.96
7.75			7.88		5.60		4.58		3.97		3.25
8.00			8.62		6.13		5.02		4.35		3.55
8.25			9.40		6.69		5.47		4.74		3.88
8.50			10.22		7.28		5.95		5.16		4.22
8.75			11.09		7.90		6.46		5.60		4.58
9.00			12.00		8.55		7.00		6.07		4.96
9.25			12.96		9.23		7.56		6.56		5.36
9.50			13.97		9.95		8.15		7.07		5.78
9.75			15.02		10.71		8.77		7.60		6.22
10.00			16.12		11.49		9.41		8.16		6.67

FUENTE: Elaboración propia.

V. CONCLUSIONES

1.- Mediante el uso del bambú como material de conducción, se logró dar una alternativa más económica y eficiente para agricultores de bajos recursos económicos.

2.- 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 rugosidad “n” por el método de Manning, encontrándose un $K_s = 0.0161$ metros, $C = 50$ y $n = 0.0232$. Estos coeficientes podrán ser usados para el diseño de tuberías de bambú, utilizando los métodos ya mencionados.

3.- 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 $CE = 0.73$.

4.- A partir de velocidades superiores a 0.8 m/s 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 m/s, 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.

5.- 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.

6.- 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.

7.- Se midió la eficiencia de aplicación en el tiempo del cultivo, encontrándose una $E_a = 50$ por ciento aproximadamente.

8.- 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, 10 y 15 mca.

VI. RECOMENDACIONES

1.- Para el diseño de tuberías de bambú a través de los coeficientes de rugosidad encontrados en esta investigación se recomienda utilizar velocidades no superiores a 0.8 m/s, con el objetivo de obtener resultados más aproximados a la realidad con un nivel de confianza superior al 97 por ciento para cualquier método a utilizar.

2.- Evitar en lo posible presiones superiores a 15 mca, presión que se pudo comprobar en todo el proceso de cosecha de la papa, aunque en laboratorio se comprobó que soporta presiones hasta de 21 mca.

3.- En el proceso de construcción, se recomienda que la perforación de los entrenudos sea lo más perfecta y uniforme posible, con el objetivo de evitar excesivas pérdidas de carga.

4.- Para la construcción de la línea de conducción guiados a través de los cuadros de selección de diámetro, se debe en lo posible mantener lo más uniforme los diámetros seleccionados para toda la línea a construir.

5.- Evaluar la durabilidad del bambú como conducción de agua para un sistema de riego por multicompuertas.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASENSO, CZEKAJ y PIERRE. 2011. Feasibility of Water Distribution using a Bamboo Piping System in Matènwa, Haiti. Bachelor of Science. Institute Polytechnic of Worcester. 34 – 36 pp.

BROWN, G.O. 2005. The History of the Darcy-Weisback Equation for Pipe Flow Resistance, in Environmental and Water Resources History. Oklahoma State University.

BOMBARDELLI, F. 2003. Hydraulic Design of Large-Diameter Pipes, Journal of Hydraulic Engineering, vol. 129. 11 p.

BAMBÚSA. 2015. Diseño y construcción con Bambú (en línea). Valencia, consultado el 15 octubre. 2016 en <http://bambúsa.es/bambú-caracteristicas/>

CLARK, L.G. 1986. Systematics of Chusquea section Chusquea, section Swallenochloa, section Verticillatae, and section Serpentes (Poaceae: Bambusoideae). Iowa State University. 1-4 pp.

CARMÍOL, U.V. 2009. Bambú Guadua: un recurso ecológico (en línea). Costa Rica, consultado el 4 noviembre. 2016 en <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4835838.pdf>

CHIE, Y.B.1992. Dimensionally Homogeneous Manning's Formula. Journal of Hydraulic Engineering, vol. 118. 9 p.

CHIPANTASIG, 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. Quito, Ecuador. Universidad Central del Ecuador. 6-15 pp.

CHOW, V., Te. (1994). Hidráulica de canales abiertos. McGraw W-Hill Interamericana S.A., Santa Fe de Bogotá Colombia. 3-335 pp.

CYTED (Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo). 2008. Evaluación de campo al riego de los agricultores: casos prácticos y ventajas para la difusión de la tecnología apropiada; asesoramiento a los regantes para la modernización de los regadíos y su ambientalidad (en línea) Guatemala. Consultado 15 julio. 2016. en <http://ceer.isa.utl.pt/cyted/2008/guatemala/cursos/Curso13>

DÁVILA, K. 2012. Evaluación del estado de conservación de la caña guadua (*Guadua angustifolia kunth*) en la cuenca alta de las riveras del río Portoviejo. Tesis, Ingeniero en Gestión Ambiental. Portoviejo, Ecuador. Universidad Técnica Particular de Loja. 20-22 pp.

FRANZINI, B. Y FINNEMORE, E. 1999. Mecánica de fluidos con aplicaciones en Ingeniería. 9ª ed. España, McGraw Hill/Interamericana de España, S.A.U.

HIDALGO, O. 1974. Bambú, su cultivo y Aplicaciones, Estudio Técnicos Cali, Colombia. 5-63 pp.

IFPRI (International Food Policy Research Institute). 2009. El impacto en la agricultura y los costos de adaptación. (en línea) Consultado. 20 agosto. 2016. Disponible en. <https://www.ifpri.org/node/2343>

LIPANGILE, T.N, ANNA, N., INGWE, REBECCA, Y. 1989. Water, Engineering and Development. Africa. 15th WEDC, Conference. 27 – 30 pp.

MAG (Ministerio de agricultura y ganadería del Ecuador). 2004. Servicio de información agropecuaria (en línea). Perú, consultado el 15 septiembre. 2016 en <http://www4.congreso.gob.pe/historico/cip/materiales/bambú/doc2.pdf>

MERCEDES, J.R. 2006. Guía Técnica Cultivo del Bambú. Santo Domingo, República Dominicana. CEDAF. 19 p.

MONTIEL, M. 1998. Cultivo y uso del bambú en el neotrópico. San José, Costa Rica. Universidad de 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 mayz l.*) Tesis Ingeniero Agrícola. Portoviejo, Ecuador. Universidad Técnica de Manabí. 5-15 pp.

MUNSON, B.R. 2003. Fundamentos de Mecánica de Fluidos. 2ª reimpresión. Ed. Limusa, México.

NOBOA, J.L. 2014. “Evaluación de varios tipos de sustratos en la reproducción de plántulas de Caña guadua (*Guadua angustifolia*) en la zona de Babahoyo, Provincia de Los Ríos. Tesis Ingeniero Agrónomo. Babahoyo, Ecuador. 2 p.

PSI (Proyecto subsectorial de irrigación).2016. Sistema de riego por multicompuertas (en línea). Peru, consultado el 23 septiembre. 2016 en http://www.psi.gob.pe/wp-content/uploads/2016/03/biblioteca_hojas_riego_multicompuertas.pdf

ROMERO, I. 2007. Comportamiento Hidráulico en Modelo Reducido de Túneles de Sección Portal Trabajando a Presión con Rugosidad Compuesta. Tesis, Maestro. Mexico. Universidad Nacional Autónoma de México. 10-22 pp.

VERNAN, J. Y PANT. 1981. Production and utilization of bamboos. *The Indian Forester* vol 107. n8. 465-476 pp.

VIZCARRA, J. 1991. Manejo y Aprovechamiento de la caña guadua. Primer Simposio Nacional Bambú / Guadua. Portoviejo Ecuador. 4 p.

VIII. ANEXOS

ANEXO 1: Altura de los piezómetros y del vertedero encontrados para la tubería 1

Piezómetro y h vertedero de la Tubería 1			
# Prueba	H Piezómetro 1 (cm)	H Piezómetro 2 (cm)	H Vertedero (cm)
1	121.2	82.0	15.1
2	122.2	84.5	15.0
3	125.5	89.3	14.9
4	128.8	94.5	14.7
5	134.0	103.0	14.4
6	139.6	112.3	14.0
7	148.2	125.0	13.5
8	155.4	136.6	13.0
9	162.3	146.8	12.4
10	166.7	153.5	12.0
11	171.9	161.4	11.4
12	177.2	169.7	10.7
13	182.6	177.8	9.7
14	185.3	182.1	8.9
15	187.5	185.6	8.0

ANEXO 2: Altura de los piezómetros y del vertedero encontrados para la tubería 2

Piezómetro y h vertedero de la Tubería # 2				
# Prueba	H Piezómetro 1 (cm)	H Piezómetro 2 (cm)	H Piezómetro 3 (cm)	H Vertedero (cm)
1	130.0	94.7	63.5	14.8
2	137.3	106.2	78.6	14.5
3	142.1	114.2	88.8	14.2
4	147.0	121.8	99.1	13.9
5	154.0	132.9	113.5	13.4
6	158.9	140.1	124.5	13.0
7	162.5	146.3	131.6	12.7
8	169.6	155.8	145.6	12.0
9	172.8	162.5	153.1	11.6
10	177.1	168.8	161.4	11.0
11	182.9	178.1	173.9	9.9
12	185.8	182.9	180.1	9.0
13	187.7	185.8	184.2	8.2
14	189.3	188.4	187.4	7.2

ANEXO 3: Altura de los piezómetros y del vertedero encontrados para la tubería 3

Piezómetro y h vertedero de la Tubería # 3				
# Prueba	H Piezómetro 1 (cm)	H Piezómetro 2 (cm)	H Piezómetro 3 (cm)	H Vertedero (cm)
1	121.0	84.6	62.2	15.1
2	122.7	87.1	66.7	15.0
3	125.8	92.1	72.4	14.9
4	130.0	98.5	79.2	14.8
5	134.4	105.4	86.8	14.6
6	139.2	113.0	96.5	14.3
7	144.4	120.5	106.0	14.0
8	150.9	130.3	117.9	13.6
9	155.3	136.7	125.6	13.3
10	163.4	149.1	139.3	12.7
11	168.1	156.8	149.7	12.1
12	174.7	166.5	161.6	11.3
13	179.1	173.2	169.3	10.6
14	182.0	177.4	174.5	10.0
15	185.5	183.0	181.3	9.0
16	188.5	187.4	186.7	7.5

ANEXO 4: Altura de los piezómetros y del vertedero encontrados para la tubería 4

Piezómetro y h vertedero de la Tubería # 4			
# Prueba	H Piezómetro 1 (cm)	H Piezómetro 2 (cm)	H Vertedero (cm)
1	160.3	99.0	15.0
2	163.1	107.7	14.7
3	164.7	111.5	14.6
4	166.0	116.5	14.4
5	168.2	121.6	14.2
6	170.4	128.5	13.9
7	174.0	140.0	13.3
8	177.0	148.5	12.8
9	179.4	155.0	12.4
10	181.4	162.0	11.9
11	184.0	169.2	11.2
12	186.1	175.6	10.4
13	187.3	179.4	9.8
14	188.5	182.9	9.1
16	190.5	189.5	6.3

ANEXO 5: Altura de los piezómetros y del vertedero encontrados para la tubería 5

Piezómetro y h vertedero de la Tubería # 5				
# Prueba	H Piezómetro 1 (cm)	H Piezómetro 2 (cm)	H Piezómetro 3 (cm)	H Vertedero (cm)
1	137.8	98.9	91.1	15.2
2	142.6	107.0	99.9	14.9
3	146.9	114.5	108.2	14.6
4	152.3	124.5	118.4	14.2
5	159.7	136.2	131.8	13.6
6	165.6	147.0	143.1	13.0
7	171.5	157.0	154.2	12.3
8	176.3	165.7	163.7	11.6
9	180.3	172.5	171.0	10.9
10	183.3	177.6	176.6	10.2
11	186.4	183.2	182.6	9.1
12	188.0	186.0	185.6	8.3
13	189.5	188.3	188.1	7.4

ANEXO 6: Altura de los piezómetros y del vertedero encontrados para la tubería 6

Piezómetro y h vertedero de la Tubería # 6				
# Prueba	H Piezómetro 1 (cm)	H Piezómetro 2 (cm)	H Piezómetro 3 (cm)	H Vertedero (cm)
1	136.2	95.3	71.8	15.7
2	141.7	104.5	82.7	15.5
3	145.3	111.5	90.5	15.3
4	150.3	121.0	103.4	14.8
5	156.5	131.8	116.2	14.4
6	163.4	143.1	130.7	13.8
7	169.4	154.0	143.9	13.1
8	175.0	163.3	155.8	12.3
9	180.5	173.2	168.8	11.1
10	183.8	179.0	175.9	10.3
11	185.2	181.3	178.7	9.9
12	186.8	184.2	182.3	9.2
13	188.3	186.4	185.3	8.4
14	189.3	188.4	187.7	7.5
15	190.2	189.6	189.3	6.6

ANEXO 7: Altura de los piezómetros y del vertedero encontrados para la tubería 7

Piezómetro y h vertedero de la Tubería # 7				
# Prueba	H Piezómetro 1 (cm)	H Piezómetro 2 (cm)	H Piezómetro 3 (cm)	H Vertedero (cm)
2	118.1	98.0	66.2	15.4
3	123.0	104.8	74.5	15.2
4	129.5	113.0	85.8	14.9
5	144.3	131.0	110.9	14.2
6	148.9	137.5	119.2	13.8
7	156.8	147.5	132.7	13.2
8	164.0	156.9	145.0	12.6
9	169.2	163.0	153.7	12.1
10	175.6	171.9	165.3	11.2
11	180.0	177.1	172.3	10.5
12	183.4	181.2	178.2	9.7
13	185.9	184.3	182.3	9.0
14	188.0	187.3	185.9	8.0

ANEXO 8: Altura de los piezómetros y del vertedero encontrados para la tubería 8

Piezómetro y h vertedero de la Tubería # 8				
# Prueba	H Piezómetro 1 (cm)	H Piezómetro 2 (cm)	H Piezómetro 3 (cm)	H Vertedero (cm)
1	102.6	90.5	64.5	14.8
2	109.1	97.8	74.7	14.5
3	117.2	107.0	85.0	14.3
4	126.5	117.4	98.2	13.9
5	136.2	128.4	111.6	13.5
6	142.6	136.6	121.3	13.1
7	151.5	146.3	134.1	12.6
8	160.2	156.0	146.2	12.0
9	168.7	165.7	158.5	11.2
10	175.0	173.1	167.7	10.4
11	181.9	180.5	177.6	9.3
12	186.5	185.9	184.4	8.0
13	188.3	188.0	187.0	7.2
14	190.3	190.1	189.8	5.9

ANEXO 9: Altura de los piezómetros y del vertedero encontrados para la tubería 9

Piezómetro y h vertedero de la Tubería # 9			
# Prueba	H Piezómetro 1 (cm)	H Piezómetro 2 (cm)	H Vertedero (cm)
1	137.6	98.0	14.0
2	141.0	103.0	13.9
3	144.4	109.0	13.7
4	139.5	108.0	13.4
5	154.0	125.9	13.1
6	160.4	136.1	12.7
7	166.5	146.7	12.1
8	175.0	160.4	11.3
9	179.8	169.6	10.5
10	183.8	177.4	9.5
11	187.5	183.9	8.4
12	189.4	187.6	7.2
13	190.6	190.1	5.5

ANEXO 10: Altura de los piezómetros y del vertedero encontrados para la tubería 10

Piezómetro y h vertedero de la Tubería # 10				
# Prueba	H Piezómetro 1 (cm)	H Piezómetro 2 (cm)	H Piezómetro 3 (cm)	H Vertedero (cm)
1	107.0	61.7	58.9	14.5
2	110.8	67.8	65.1	14.4
3	118.9	80.0	77.4	14.1
4	122.5	86.6	84.1	13.9
5	128.1	94.7	92.7	13.6
6	134.4	105.2	103.3	13.3
7	140.9	115.0	113.3	13.0
8	147.7	125.6	123.9	12.6
9	155.2	136.7	135.5	12.1
10	163.2	149.1	148.1	11.5
11	168.5	157.4	156.6	11.0
12	174.9	166.7	166.1	10.3
13	179.9	174.5	174.0	9.5
14	184.2	180.9	180.6	8.7
15	188.3	187.1	186.9	7.1

ANEXO 11: Resultados de los cálculos hidráulicos para la tubería 1

TUBERIA # 1								
hf (cm/m)	Caudal (lt/s)	Diámetro (cm)	Velocidad (m/s)	Reynolds	Fricción	Rugosidad Ks (m)	Factor (C) Hazen	Manning (n)
19.60	6.92	7.51	1.56	116197.3	0.1181	0.0097	54	0.0200
18.85	6.81	7.51	1.54	114356.1	0.1173	0.0096	55	0.0199
18.10	6.70	7.51	1.51	112532.0	0.1163	0.0095	55	0.0198
17.15	6.49	7.51	1.47	108935.0	0.1176	0.0097	55	0.0200
15.50	6.17	7.51	1.39	103667.1	0.1174	0.0096	55	0.0199
13.65	5.77	7.51	1.30	96879.2	0.1184	0.0098	55	0.0200
11.60	5.29	7.51	1.19	88769.3	0.1198	0.0100	55	0.0201
9.40	4.83	7.51	1.09	81070.3	0.1164	0.0095	56	0.0199
7.75	4.31	7.51	0.97	72365.2	0.1204	0.0101	56	0.0202
6.60	3.98	7.51	0.90	66880.1	0.1201	0.0100	56	0.0202
5.25	3.52	7.51	0.80	59121.7	0.1222	0.0103	56	0.0203
3.75	3.02	7.51	0.68	50767.9	0.1184	0.0098	58	0.0200
2.40	2.39	7.51	0.54	40100.9	0.1215	0.0102	58	0.0203
1.60	1.94	7.51	0.44	32605.6	0.1225	0.0103	59	0.0204
0.95	1.50	7.51	0.34	25234.3	0.1214	0.0102	60	0.0203

Promedio	0.0099	56	0.0201
-----------------	--------	----	--------

ANEXO 12: Resultados de los cálculos hidráulicos para la tubería 2

TUBERIA # 2								
hf (cm/m)	Caudal (lt/s)	Diámetro (cm)	Velocidad (m/s)	Reynoldss	Fricción	Rugo Ks (m)	Factor (C) Hazen	Manning (n)
33.25	6.59	7.60	1.45	109350.6	0.2349	0.0262	38	0.0283
29.35	6.28	7.60	1.38	104097.8	0.2288	0.0253	38	0.0279
26.65	5.97	7.60	1.32	98995.4	0.2298	0.0255	38	0.0280
23.95	5.67	7.60	1.25	94042.1	0.2288	0.0253	39	0.0279
20.25	5.19	7.60	1.14	86114.5	0.2307	0.0256	39	0.0280
17.20	4.83	7.60	1.06	80064.0	0.2267	0.0251	39	0.0278
15.45	4.56	7.60	1.01	75694.2	0.2278	0.0252	39	0.0278
12.00	3.98	7.60	0.88	66050.0	0.2324	0.0258	39	0.0281
9.85	3.67	7.60	0.81	60880.7	0.2245	0.0248	40	0.0276
7.85	3.23	7.60	0.71	53583.7	0.2310	0.0256	40	0.0280
4.50	2.48	7.60	0.55	41091.3	0.2252	0.0248	42	0.0277
2.85	1.99	7.60	0.44	33077.5	0.2201	0.0242	43	0.0274
1.75	1.59	7.60	0.35	26445.1	0.2114	0.0230	45	0.0268
0.95	1.15	7.60	0.25	19023.7	0.2218	0.0244	45	0.0275

Promedio	0.0251	40	0.0278
-----------------	--------	----	--------

ANEXO 13: Resultados de los cálculos hidráulicos para la tubería 3

TUBERIA # 3								
hf (cm/m)	Caudal (lt/s)	Diámetro (cm)	Velocidad (m/s)	Reynolds	Fricción	Rugo Ks (m)	Factor (C) Hazen	Manning (n)
29.40	6.92	7.20	1.70	121119.8	0.1440	0.01282	49	0.022
28.00	6.81	7.20	1.67	119200.5	0.1416	0.01250	49	0.022
26.70	6.70	7.20	1.64	117299.1	0.1394	0.01221	50	0.022
25.40	6.59	7.20	1.62	115415.6	0.1370	0.01188	50	0.021
23.80	6.38	7.20	1.57	111701.8	0.1371	0.01189	50	0.021
21.35	6.07	7.20	1.49	106263.6	0.1359	0.01173	51	0.021
19.20	5.77	7.20	1.42	100983.3	0.1353	0.01165	51	0.021
16.50	5.38	7.20	1.32	94186.0	0.1337	0.01143	52	0.021
14.85	5.10	7.20	1.25	89268.7	0.1339	0.01146	52	0.021
12.05	4.56	7.20	1.12	79892.5	0.1357	0.01170	52	0.021
9.20	4.06	7.20	1.00	71118.1	0.1307	0.01103	53	0.021
6.55	3.45	7.20	0.85	60334.8	0.1293	0.01084	54	0.021
4.90	2.96	7.20	0.73	51737.5	0.1315	0.01114	55	0.021
3.75	2.57	7.20	0.63	44975.1	0.1332	0.01137	55	0.021
2.10	1.99	7.20	0.49	34912.1	0.1238	0.01010	58	0.020
0.90	1.29	7.20	0.32	22523.3	0.1275	0.01059	59	0.021

Promedio	0.01152	52	0.02118
-----------------	---------	----	---------

ANEXO 14: Resultados de los cálculos hidráulicos para la tubería 4

TUBERIA # 4								
hf (cm/m)	Caudal (lt/s)	Diámetro (cm)	Velocidad (m/s)	Reynolds	Fricción	Rugo Ks (m)	Factor (C) Hazen	Manning (n)
30.65	6.81	7.57	1.51	113364.4	0.1992	0.0212	41	0.0260
27.70	6.49	7.57	1.44	107990.4	0.1984	0.0211	41	0.0260
26.60	6.38	7.57	1.42	106232.8	0.1969	0.0209	41	0.0259
24.75	6.17	7.57	1.37	102768.1	0.1958	0.0208	42	0.0258
23.30	5.97	7.57	1.33	99370.4	0.1971	0.0210	42	0.0259
20.95	5.67	7.57	1.26	94398.3	0.1964	0.0209	42	0.0258
17.00	5.10	7.57	1.13	84898.1	0.1970	0.0209	42	0.0259
14.25	4.65	7.57	1.03	77427.1	0.1986	0.0212	42	0.0260
12.20	4.31	7.57	0.96	71737.7	0.1980	0.0211	43	0.0259
9.70	3.90	7.57	0.87	64979.8	0.1919	0.0202	44	0.0255
7.40	3.37	7.57	0.75	56167.6	0.1960	0.0208	44	0.0258
5.25	2.82	7.57	0.63	47002.1	0.1985	0.0211	44	0.0260
3.95	2.45	7.57	0.54	40745.5	0.1988	0.0212	45	0.0260
2.80	2.05	7.57	0.45	34096.6	0.2012	0.0215	45	0.0261
0.50	0.85	7.57	0.19	14086.6	0.2105	0.0228	47	0.0267

Promedio	0.0211	43	0.0259
-----------------	--------	----	--------

ANEXO 15: Resultados de los cálculos hidráulicos para la tubería 5

TUBERIA # 5								
hf (cm/m)	Caudal (lt/s)	Diámetro (cm)	Velocidad (m/s)	Reynolds	Fricción	Rugo Ks (m)	Factor (C) Hazen	Manning (n)
23.35	7.03	7.62	1.54	116348.8	0.1466	0.0139	48	0.0223
21.35	6.70	7.62	1.47	110904.9	0.1476	0.0141	48	0.0224
19.35	6.38	7.62	1.40	105612.7	0.1475	0.0141	48	0.0224
16.95	5.97	7.62	1.31	98790.3	0.1477	0.0141	49	0.0224
13.95	5.38	7.62	1.18	89051.7	0.1496	0.0144	49	0.0226
11.25	4.83	7.62	1.06	79898.1	0.1498	0.0144	49	0.0226
8.65	4.23	7.62	0.93	69944.1	0.1503	0.0145	50	0.0226
6.30	3.63	7.62	0.80	60126.9	0.1482	0.0142	51	0.0225
4.65	3.16	7.62	0.69	52311.6	0.1445	0.0136	52	0.0222
3.35	2.69	7.62	0.59	44596.6	0.1432	0.0134	53	0.0221
1.90	2.05	7.62	0.45	33897.5	0.1406	0.0131	54	0.0219
1.22	1.64	7.62	0.36	27170.7	0.1411	0.0131	55	0.0219
0.70	1.23	7.62	0.27	20286.0	0.1446	0.0136	56	0.0222

Promedio	0.0139	51	0.0223
-----------------	--------	----	--------

ANEXO 16: Resultados de los cálculos hidráulicos para la tubería 6

TUBERIA # 6								
hf (cm/m)	Caudal (lt/s)	Diámetro (cm)	Velocidad (m/s)	Reynolds	Fricción	Rugo Ks (m)	Factor (C) Hazen	Manning (n)
32.20	7.60	7.76	1.61	123472.6	0.1897	0.0204	42	0.0255
29.50	7.37	7.76	1.56	119725.3	0.1849	0.0197	42	0.0252
27.40	7.14	7.76	1.51	116045.2	0.1828	0.0194	43	0.0250
23.45	6.59	7.76	1.39	107137.0	0.1835	0.0195	43	0.0251
20.15	6.17	7.76	1.31	100307.9	0.1799	0.0190	44	0.0248
16.35	5.57	7.76	1.18	90553.0	0.1791	0.0189	44	0.0248
12.75	4.92	7.76	1.04	79901.7	0.1794	0.0189	45	0.0248
9.60	4.23	7.76	0.89	68670.5	0.1829	0.0194	45	0.0250
5.85	3.30	7.76	0.70	53653.7	0.1826	0.0194	46	0.0250
3.95	2.76	7.76	0.58	44823.6	0.1766	0.0185	47	0.0246
3.25	2.51	7.76	0.53	40752.6	0.1758	0.0184	48	0.0245
2.25	2.10	7.76	0.44	34166.2	0.1732	0.0180	49	0.0243
1.50	1.69	7.76	0.36	27455.1	0.1788	0.0188	49	0.0247
0.80	1.29	7.76	0.27	20907.7	0.1644	0.0168	52	0.0237
0.45	0.95	7.76	0.20	15376.2	0.1710	0.0177	52	0.0242

Prom	0.0189	46	0.0248
-------------	--------	----	--------

ANEXO 17: Resultados de los cálculos hidráulicos para la tubería 7

TUBERIA # 7								
hf (cm/m)	Caudal (lt/s)	Diámetro (cm)	Velocidad (m/s)	Reynolds	Fricción	Rugo Ks (m)	Factor (C) Hazen	Manning (n)
25.95	7.26	8.17	1.38	111915.1	0.2175	0.0256	39	0.0275
24.25	7.03	8.17	1.34	108453.0	0.2164	0.0255	39	0.0275
21.85	6.70	8.17	1.28	103378.5	0.2146	0.0252	40	0.0273
16.70	5.92	8.17	1.13	91308.5	0.2103	0.0246	40	0.0271
14.85	5.57	8.17	1.06	85973.2	0.2109	0.0246	41	0.0271
12.05	5.01	8.17	0.95	77260.1	0.2119	0.0248	41	0.0272
9.50	4.48	8.17	0.85	69085.8	0.2089	0.0244	42	0.0270
7.75	4.06	8.17	0.77	62678.1	0.2071	0.0241	42	0.0269
5.15	3.37	8.17	0.64	52050.3	0.1995	0.0230	44	0.0264
3.85	2.89	8.17	0.55	44570.2	0.2034	0.0235	44	0.0266
2.60	2.39	8.17	0.46	36839.0	0.2011	0.0232	45	0.0265
1.80	1.97	8.17	0.38	30359.5	0.2050	0.0238	45	0.0267
1.05	1.50	8.17	0.29	23181.7	0.2051	0.0238	46	0.0267

Prom	0.0243	42	0.0270
-------------	--------	----	--------

ANEXO 18: Resultados de los cálculos hidráulicos para la tubería 8

TUBERIA # 8								
hf (cm/m)	Caudal (lt/s)	Diámetro (cm)	Velocidad (m/s)	Reynolds	Fricción n	Rugo Ks (m)	Factor (C) Hazen	Manning g (n)
19.05	6.59	7.26	1.59	114483.8	0.1070	0.0080	57	0.0189
17.20	6.28	7.26	1.52	108984.4	0.1066	0.0079	58	0.0189
16.10	6.07	7.26	1.47	105405.7	0.1067	0.0079	58	0.0189
14.15	5.67	7.26	1.37	98456.6	0.1075	0.0080	58	0.0190
12.30	5.29	7.26	1.28	91782.8	0.1075	0.0080	58	0.0190
10.65	4.92	7.26	1.19	85380.8	0.1076	0.0080	59	0.0190
8.70	4.44	7.26	1.07	77016.1	0.1080	0.0081	59	0.0190
7.00	3.98	7.26	0.96	69150.5	0.1078	0.0081	59	0.0190
5.10	3.37	7.26	0.81	58582.4	0.1094	0.0083	60	0.0191
3.65	2.82	7.26	0.68	49022.8	0.1118	0.0086	60	0.0194
2.15	2.16	7.26	0.52	37470.4	0.1127	0.0087	61	0.0194
1.05	1.50	7.26	0.36	26090.9	0.1136	0.0088	62	0.0195
0.65	1.17	7.26	0.28	20253.2	0.1167	0.0092	63	0.0198
0.25	0.72	7.26	0.17	12548.8	0.1169	0.0092	65	0.0198

Prom	0.0083	60	0.0192
-------------	--------	----	--------

ANEXO 19: Resultados de los cálculos hidráulicos para la tubería 9

TUBERIA # 9								
hf (cm/m)	Caudal (lt/s)	Diámetro (cm)	Velocidad (m/s)	Reynolds	Fricción	Rugo Ks (m)	Factor (C) Hazen	Manning (n)
19.80	5.77	6.69	1.64	108732.4	0.0964	0.0061	61	0.0177
19.00	5.67	6.69	1.61	106874.7	0.0958	0.0060	61	0.0177
17.70	5.48	6.69	1.56	103215.3	0.0956	0.0060	61	0.0177
15.75	5.19	6.69	1.48	97865.3	0.0947	0.0059	62	0.0176
14.05	4.92	6.69	1.40	92680.9	0.0942	0.0058	63	0.0175
12.15	4.56	6.69	1.30	86023.2	0.0945	0.0058	63	0.0175
9.90	4.06	6.69	1.16	76575.4	0.0972	0.0062	62	0.0178
7.30	3.45	6.69	0.98	64964.6	0.0996	0.0064	62	0.0180
5.10	2.89	6.69	0.82	54452.6	0.0990	0.0064	63	0.0180
3.20	2.27	6.69	0.65	42808.6	0.1005	0.0065	64	0.0181
1.80	1.69	6.69	0.48	31846.1	0.1022	0.0067	65	0.0182
0.90	1.17	6.69	0.33	21984.8	0.1072	0.0073	65	0.0187
0.25	0.61	6.69	0.17	11506.4	0.1087	0.0075	68	0.0188

Prom	0.0064	63	0.0179
-------------	--------	----	--------

ANEXO 20: Resultados de los cálculos hidráulicos para la tubería 10

TUBERIA # 10								
hf (cm/m)	Caudal (lt/s)	Diámetro (cm)	Velocidad (m/s)	Reynolds	Fricción	Rugo Ks (m)	Factor (C) Hazen	Manning (n)
24.05	6.28	7.73	1.34	102337.1	0.2042	0.0224	41	0.0264
22.85	6.17	7.73	1.31	100648.7	0.2006	0.0219	41	0.0262
20.75	5.87	7.73	1.25	95681.6	0.2016	0.0220	41	0.0263
19.20	5.67	7.73	1.21	92451.5	0.1998	0.0218	42	0.0261
17.70	5.38	7.73	1.15	87727.3	0.2045	0.0224	41	0.0264
15.55	5.10	7.73	1.09	83147.2	0.2000	0.0218	42	0.0262
13.80	4.83	7.73	1.03	78709.8	0.1981	0.0215	42	0.0260
11.90	4.48	7.73	0.95	73013.2	0.1985	0.0216	43	0.0261
9.85	4.06	7.73	0.87	66241.2	0.1996	0.0217	43	0.0261
7.55	3.60	7.73	0.77	58618.1	0.1954	0.0211	44	0.0258
5.95	3.23	7.73	0.69	52677.4	0.1907	0.0205	45	0.0255
4.40	2.76	7.73	0.59	44975.9	0.1934	0.0209	45	0.0257
2.95	2.27	7.73	0.48	37031.4	0.1913	0.0206	46	0.0256
1.80	1.84	7.73	0.39	29973.0	0.1782	0.0187	48	0.0247
0.70	1.13	7.73	0.24	18389.1	0.1841	0.0195	49	0.0251

Prom	0.0212	43	0.0259
-------------	--------	----	--------

ANEXO 21: Pérdida de carga “hf” medidos vs estimados para la tubería 1

Tubería 1					
Valores medidos			Valores estimados de hf		
Caudal (lt/s)	Diámetro (cm)	hf medido (cm/m)	Hazen (cm/m)	Manning (cm/m)	Darcy (cm/m)
6.9199	7.5075	19.6	23.02	26.37	27.06
6.8103	7.5075	18.85	22.35	25.54	26.21
6.7017	7.5075	18.1	21.70	24.73	25.38
6.4875	7.5075	17.15	20.43	23.18	23.78
6.1737	7.5075	15.5	18.64	20.99	21.54
5.7695	7.5075	13.65	16.44	18.33	18.81
5.2865	7.5075	11.6	13.98	15.39	15.79
4.8280	7.5075	9.4	11.82	12.84	13.17
4.3096	7.5075	7.75	9.58	10.23	10.49
3.9829	7.5075	6.6	8.28	8.74	8.96
3.5209	7.5075	5.25	6.59	6.83	7.00
3.0234	7.5075	3.75	4.97	5.03	5.16
2.3881	7.5075	2.4	3.21	3.14	3.22
1.9418	7.5075	1.6	2.19	2.08	2.13
1.5028	7.5075	0.95	1.36	1.24	1.28

ANEXO 22: Pérdida de carga “hf ”medidos vs estimados para la tubería 2

Tubería 2					
Valores medidos			Valores estimados de hf		
Caudal (lt/s)	Diámetro (cm)	hf medido (cm/m)	Hazen (cm/m)	Manning (cm/m)	Darcy (cm/m)
6.59	7.60	33.25	19.81	22.40	22.88
6.28	7.60	29.35	18.09	20.30	20.74
5.97	7.60	26.65	16.48	18.36	18.75
5.67	7.60	23.95	14.98	16.57	16.92
5.19	7.60	20.25	12.73	13.89	14.19
4.83	7.60	17.20	11.12	12.01	12.27
4.56	7.60	15.45	10.02	10.73	10.96
3.98	7.60	12.00	7.79	8.17	8.35
3.67	7.60	9.85	6.70	6.94	7.09
3.23	7.60	7.85	5.29	5.38	5.49
2.48	7.60	4.50	3.23	3.16	3.23
1.99	7.60	2.85	2.16	2.05	2.09
1.59	7.60	1.75	1.43	1.31	1.34
1.15	7.60	0.95	0.78	0.68	0.69

ANEXO 23: Pérdida de carga “hf ”medidos vs estimados para la tubería 3

Tubería 3					
Valores medidos			Valores estimados de hf		
Caudal (lt/s)	Diámetro (cm)	hf medido (cm/m)	Hazen (cm/m)	Manning (cm/m)	Darcy (cm/m)
6.92	7.20	29.40	28.18	32.90	34.29
6.81	7.20	28.00	27.36	31.87	33.21
6.70	7.20	26.70	26.55	30.86	32.16
6.59	7.20	25.40	25.77	29.88	31.13
6.38	7.20	23.80	24.26	27.99	29.16
6.07	7.20	21.35	22.11	25.33	26.39
5.77	7.20	19.20	20.12	22.87	23.83
5.38	7.20	16.50	17.69	19.90	20.73
5.10	7.20	14.85	16.01	17.87	18.63
4.56	7.20	12.05	13.04	14.32	14.92
4.06	7.20	9.20	10.51	11.34	11.82
3.45	7.20	6.55	7.75	8.16	8.51
2.96	7.20	4.90	5.83	6.00	6.26
2.57	7.20	3.75	4.50	4.54	4.73
1.99	7.20	2.10	2.81	2.73	2.85
1.29	7.20	0.90	1.25	1.14	1.19

ANEXO 24: Pérdida de carga “hf ”medidos vs estimados para la tubería 4

Tubería 4					
Valores medidos			Valores estimados de hf		
Caudal (lt/s)	Diámetro (cm)	hf medido (cm/m)	Hazen (cm/m)	Manning (cm/m)	Darcy (cm/m)
6.81	7.57	30.65	21.42	24.38	24.94
6.49	7.57	27.70	19.58	22.13	22.63
6.38	7.57	26.60	19.00	21.41	21.90
6.17	7.57	24.75	17.86	20.04	20.49
5.97	7.57	23.30	16.79	18.74	19.16
5.67	7.57	20.95	15.26	16.91	17.29
5.10	7.57	17.00	12.54	13.68	13.99
4.65	7.57	14.25	10.57	11.37	11.63
4.31	7.57	12.20	9.18	9.76	9.99
3.90	7.57	9.70	7.64	8.01	8.19
3.37	7.57	7.40	5.84	5.99	6.12
2.82	7.57	5.25	4.20	4.19	4.29
2.45	7.57	3.95	3.22	3.15	3.22
2.05	7.57	2.80	2.32	2.21	2.26
0.85	7.57	0.50	0.45	0.38	0.38

ANEXO 25: Pérdida de carga “hf ”medidos vs estimados para la tubería 5

Tubería 5					
Valores medidos			Valores estimados de hf		
Caudal (lt/s)	Diámetro (cm)	hf medido (cm/m)	Hazen (cm/m)	Manning (cm/m)	Darcy (cm/m)
7.03	7.62	23.35	22.09	25.19	25.71
6.70	7.62	21.35	20.21	22.89	23.36
6.38	7.62	19.35	18.46	20.75	21.18
5.97	7.62	16.95	16.31	18.16	18.53
5.38	7.62	13.95	13.46	14.76	15.06
4.83	7.62	11.25	11.01	11.88	12.12
4.23	7.62	8.65	8.61	9.10	9.29
3.63	7.62	6.30	6.50	6.73	6.86
3.16	7.62	4.65	5.03	5.09	5.20
2.69	7.62	3.35	3.74	3.70	3.78
2.05	7.62	1.90	2.25	2.14	2.18
1.64	7.62	1.22	1.49	1.37	1.40
1.23	7.62	0.70	0.87	0.77	0.78

ANEXO 26: Pérdida de carga “hf ”medidos vs estimados para la tubería 6

Tubería 6					
Valores medidos			Valores estimados de hf		
Caudal (lt/s)	Diámetro (cm)	hf medido (cm/m)	Hazen (cm/m)	Manning (cm/m)	Darcy (cm/m)
7.60	7.76	32.20	23.33	26.68	27.05
7.37	7.76	29.50	22.03	25.09	25.43
7.14	7.76	27.40	20.79	23.57	23.89
6.59	7.76	23.45	17.94	20.09	20.37
6.17	7.76	20.15	15.88	17.61	17.85
5.57	7.76	16.35	13.14	14.35	14.55
4.92	7.76	12.75	10.42	11.17	11.33
4.23	7.76	9.60	7.87	8.25	8.37
3.30	7.76	5.85	4.98	5.04	5.11
2.76	7.76	3.95	3.57	3.52	3.56
2.51	7.76	3.25	2.99	2.91	2.95
2.10	7.76	2.25	2.16	2.04	2.07
1.69	7.76	1.50	1.44	1.32	1.34
1.29	7.76	0.80	0.87	0.77	0.78
0.95	7.76	0.45	0.49	0.41	0.42

ANEXO 27: Pérdida de carga “hf ”medidos vs estimados para la tubería 7

Tubería 7					
Valores medidos			Valores estimados de hf		
Caudal (lt/s)	Diámetro (cm)	hf medido (cm/m)	Hazen (cm/m)	Manning (cm/m)	Darcy (cm/m)
7.26	8.17	25.95	16.63	18.44	18.35
7.03	8.17	24.25	15.69	17.31	17.23
6.70	8.17	21.85	14.35	15.73	15.66
5.92	8.17	16.70	11.40	12.27	12.22
5.57	8.17	14.85	10.20	10.88	10.83
5.01	8.17	12.05	8.37	8.79	8.75
4.48	8.17	9.50	6.80	7.03	6.99
4.06	8.17	7.75	5.68	5.78	5.76
3.37	8.17	5.15	4.03	3.99	3.97
2.89	8.17	3.85	3.02	2.92	2.91
2.39	8.17	2.60	2.12	2.00	1.99
1.97	8.17	1.80	1.48	1.36	1.35
1.50	8.17	1.05	0.90	0.79	0.79

ANEXO 28: Pérdida de carga “hf ”medidos vs estimados para la tubería 8

Tubería 8					
Valores medidos			Valores estimados de hf		
Caudal (lt/s)	Diámetro (cm)	hf medido (cm/m)	Hazen (cm/m)	Manning (cm/m)	Darcy (cm/m)
6.59	7.26	19.05	24.77	28.61	29.73
6.28	7.26	17.20	22.61	25.93	26.94
6.07	7.26	16.10	21.26	24.26	25.20
5.67	7.26	14.15	18.74	21.16	21.99
5.29	7.26	12.30	16.45	18.39	19.11
4.92	7.26	10.65	14.39	15.91	16.53
4.44	7.26	8.70	11.89	12.95	13.45
3.98	7.26	7.00	9.74	10.44	10.84
3.37	7.26	5.10	7.16	7.49	7.78
2.82	7.26	3.65	5.15	5.25	5.45
2.16	7.26	2.15	3.13	3.07	3.18
1.50	7.26	1.05	1.60	1.49	1.54
1.17	7.26	0.65	1.00	0.90	0.93
0.72	7.26	0.25	0.41	0.34	0.36

ANEXO 29: Pérdida de carga “hf ”medidos vs estimados para la tubería 9

Tubería 9					
Valores medidos			Valores estimados de hf		
Caudal (lt/s)	Diámetro (cm)	hf medido (cm/m)	Hazen (cm/m)	Manning (cm/m)	Darcy (cm/m)
5.77	6.69	19.8	28.84	33.93	36.38
5.67	6.69	19	27.94	32.78	35.15
5.48	6.69	17.7	26.19	30.57	32.79
5.19	6.69	15.75	23.73	27.49	29.48
4.92	6.69	14.05	21.46	24.65	26.43
4.56	6.69	12.15	18.69	21.24	22.77
4.06	6.69	9.9	15.07	16.83	18.05
3.45	6.69	7.3	11.11	12.11	12.99
2.89	6.69	5.1	8.01	8.51	9.12
2.27	6.69	3.2	5.13	5.26	5.64
1.69	6.69	1.8	2.97	2.91	3.12
1.17	6.69	0.9	1.49	1.39	1.49
0.61	6.69	0.25	0.45	0.38	0.41

ANEXO 30: Pérdida de carga “hf ”medidos vs estimados para la tubería 10

Tubería 10					
Valores medidos			Valores estimados de hf		
Caudal (lt/s)	Diámetro (cm)	hf medido (cm/m)	Hazen (cm/m)	Manning (cm/m)	Darcy (cm/m)
6.28	7.73	24.05	16.64	18.54	18.82
6.17	7.73	22.85	16.14	17.93	18.20
5.87	7.73	20.75	14.70	16.20	16.45
5.67	7.73	19.20	13.79	15.13	15.36
5.38	7.73	17.70	12.51	13.62	13.83
5.10	7.73	15.55	11.33	12.24	12.42
4.83	7.73	13.80	10.24	10.97	11.13
4.48	7.73	11.90	8.91	9.44	9.58
4.06	7.73	9.85	7.44	7.77	7.88
3.60	7.73	7.55	5.93	6.08	6.17
3.23	7.73	5.95	4.87	4.91	4.99
2.76	7.73	4.40	3.63	3.58	3.63
2.27	7.73	2.95	2.53	2.43	2.46
1.84	7.73	1.80	1.71	1.59	1.61
1.13	7.73	0.70	0.69	0.60	0.61

ANEXO 31: Cálculos para la guía de selección de diámetros para pendiente del 0.5%.

f	F(f)	F(Ks,Re,D,f)	H Pendiente (m)	Velocidad (m/s)	Reynolds Re	Diámetro (cm)	L (m)	Ks (m)
0.192	2.282	2.282	0.13	0.17	10336	6.00	25	0.0161
0.186	2.317	2.317	0.13	0.18	11154	6.25		
0.181	2.351	2.351	0.13	0.19	11998	6.50		
0.176	2.384	2.384	0.13	0.19	12868	6.75		
0.171	2.416	2.416	0.13	0.20	13762	7.00		
0.167	2.446	2.446	0.13	0.20	14682	7.25		
0.163	2.476	2.476	0.13	0.21	15625	7.50		
0.159	2.504	2.504	0.13	0.22	16593	7.75		
0.156	2.532	2.532	0.13	0.22	17585	8.00		
0.153	2.558	2.558	0.13	0.23	18600	8.25		
0.150	2.584	2.584	0.13	0.23	19638	8.50		
0.147	2.609	2.609	0.13	0.24	20699	8.75		
0.144	2.634	2.634	0.13	0.24	21783	9.00		
0.142	2.658	2.658	0.13	0.25	22889	9.25		
0.139	2.681	2.681	0.13	0.26	24017	9.50		
0.137	2.703	2.703	0.13	0.26	25166	9.75		
0.135	2.725	2.725	0.13	0.27	26338	10.00		

ANEXO 32: Cálculos para la guía de selección de diámetros para pendiente del 1%.

f	F(f)	F(Ks,Re,D,f)	H Pendiente (m)	Velocidad (m/s)	Reynolds Re	Diámetro (cm)	L (m)	Ks (m)
0.192	2.282	2.282	0.25	0.25	14618	6.00	25	0.0161
0.186	2.317	2.317	0.25	0.25	15775	6.25		
0.181	2.352	2.351	0.25	0.26	16969	6.50		
0.176	2.384	2.384	0.25	0.27	18198	6.75		
0.171	2.416	2.416	0.25	0.28	19464	7.00		
0.167	2.446	2.446	0.25	0.29	20764	7.25		
0.163	2.476	2.475	0.25	0.30	22099	7.50		
0.159	2.504	2.504	0.25	0.31	23468	7.75		
0.156	2.532	2.532	0.25	0.31	24870	8.00		
0.153	2.558	2.558	0.25	0.32	26306	8.25		
0.150	2.584	2.584	0.25	0.33	27774	8.50		
0.147	2.610	2.609	0.25	0.34	29275	8.75		
0.144	2.634	2.634	0.25	0.35	30808	9.00		
0.142	2.658	2.658	0.25	0.35	32372	9.25		
0.139	2.681	2.681	0.25	0.36	33967	9.50		
0.137	2.704	2.703	0.25	0.37	35593	9.75		
0.135	2.726	2.725	0.25	0.38	37249	10.00		

ANEXO 33: Cálculos para la guía de selección de diámetros para pendiente del 1.5%.

f	F(f)	F(Ks,Re,D,f)	H Pendiente (m)	Velocidad (m/s)	Reynolds Re	Diámetro (cm)	L (m)	Ks (m)
0.192	2.282	2.282	0.38	0.30	17900	6.00	25	0.0161
0.186	2.317	2.317	0.38	0.31	19317	6.25		
0.181	2.351	2.351	0.38	0.32	20779	6.50		
0.176	2.384	2.384	0.38	0.33	22285	6.75		
0.171	2.416	2.416	0.38	0.34	23835	7.00		
0.167	2.446	2.446	0.38	0.35	25427	7.25		
0.163	2.475	2.475	0.38	0.36	27062	7.50		
0.160	2.504	2.504	0.38	0.37	28738	7.75		
0.156	2.531	2.531	0.38	0.38	30456	8.00		
0.153	2.558	2.558	0.38	0.39	32214	8.25		
0.150	2.584	2.584	0.38	0.40	34012	8.50		
0.147	2.609	2.609	0.38	0.41	35850	8.75		
0.144	2.634	2.634	0.38	0.42	37727	9.00		
0.142	2.658	2.658	0.38	0.43	39643	9.25		
0.139	2.681	2.681	0.38	0.44	41596	9.50		
0.137	2.703	2.703	0.38	0.45	43588	9.75		
0.135	2.725	2.725	0.38	0.46	45616	10.00		

ANEXO 34: Cálculos para la guía de selección de diámetros para pendiente del 2%.

f	F(f)	F(Ks,Re,D,f)	H Pendiente (m)	Velocidad (m/s)	Reynolds Re	Diámetro (cm)	L (m)	Ks (m)
0.192	2.282	2.282	0.50	0.35	20669	6.00	25	0.0161
0.186	2.317	2.317	0.50	0.36	22305	6.25		
0.181	2.351	2.351	0.50	0.37	23994	6.50		
0.176	2.384	2.384	0.50	0.39	25733	6.75		
0.171	2.415	2.415	0.50	0.40	27522	7.00		
0.167	2.446	2.446	0.50	0.41	29361	7.25		
0.163	2.475	2.475	0.50	0.42	31248	7.50		
0.160	2.504	2.504	0.50	0.43	33184	7.75		
0.156	2.531	2.531	0.50	0.44	35167	8.00		
0.153	2.558	2.558	0.50	0.46	37197	8.25		
0.150	2.584	2.584	0.50	0.47	39274	8.50		
0.147	2.609	2.609	0.50	0.48	41396	8.75		
0.144	2.634	2.634	0.50	0.49	43563	9.00		
0.142	2.658	2.658	0.50	0.50	45775	9.25		
0.139	2.681	2.681	0.50	0.51	48031	9.50		
0.137	2.703	2.703	0.50	0.52	50330	9.75		
0.135	2.725	2.725	0.50	0.53	52673	10.00		

ANEXO 35: Cálculos para la guía de selección de diámetros para pendiente del 2.5%.

f	F(f)	F(Ks,Re,D,f)	H Pendiente (m)	Velocidad (m/s)	Reynolds Re	Diámetro (cm)	L (m)	Ks (m)
0.192	2.282	2.282	0.63	0.39	23109	6.00	25	0.0161
0.186	2.317	2.317	0.63	0.40	24938	6.25		
0.181	2.351	2.351	0.63	0.42	26825	6.50		
0.176	2.384	2.384	0.63	0.43	28770	6.75		
0.171	2.415	2.415	0.63	0.44	30770	7.00		
0.167	2.446	2.446	0.63	0.46	32826	7.25		
0.163	2.475	2.475	0.63	0.47	34936	7.50		
0.160	2.504	2.504	0.63	0.48	37100	7.75		
0.156	2.531	2.531	0.63	0.50	39318	8.00		
0.153	2.558	2.558	0.63	0.51	41588	8.25		
0.150	2.584	2.584	0.63	0.52	43909	8.50		
0.147	2.609	2.609	0.63	0.53	46282	8.75		
0.144	2.634	2.634	0.63	0.55	48705	9.00		
0.142	2.657	2.657	0.63	0.56	51178	9.25		
0.139	2.681	2.681	0.63	0.57	53700	9.50		
0.137	2.703	2.703	0.63	0.58	56271	9.75		
0.135	2.725	2.725	0.63	0.59	58890	10.00		

ANEXO 36: Cálculos para la guía de selección de diámetros para pendiente del 3%.

f	F(f)	F(Ks,Re,D,f)	H Pendiente (m)	Velocidad (m/s)	Reynolds Re	Diámetro (cm)	L (m)	Ks (m)
0.192	2.282	2.282	0.75	0.43	25314	6.00	25	0.0161
0.186	2.317	2.317	0.75	0.44	27318	6.25		
0.181	2.351	2.351	0.75	0.46	29385	6.50		
0.176	2.384	2.384	0.75	0.47	31515	6.75		
0.171	2.415	2.415	0.75	0.49	33707	7.00		
0.167	2.446	2.446	0.75	0.50	35959	7.25		
0.163	2.475	2.475	0.75	0.52	38270	7.50		
0.160	2.504	2.504	0.75	0.53	40641	7.75		
0.156	2.531	2.531	0.75	0.54	43070	8.00		
0.153	2.558	2.558	0.75	0.56	45557	8.25		
0.150	2.584	2.584	0.75	0.57	48100	8.50		
0.147	2.609	2.609	0.75	0.59	50699	8.75		
0.144	2.634	2.634	0.75	0.60	53353	9.00		
0.142	2.657	2.657	0.75	0.61	56062	9.25		
0.139	2.681	2.681	0.75	0.63	58825	9.50		
0.137	2.703	2.703	0.75	0.64	61641	9.75		
0.135	2.725	2.725	0.75	0.65	64510	10.00		

ANEXO 37: Cálculos para la guía de selección de diámetros para pendiente del 4%.

f	F(f)	F(Ks,Re,D,f)	H Pendiente (m)	Velocidad (m/s)	Reynolds Re	Diámetro (cm)	L (m)	Ks (m)
0.192	2.282	2.282	1.00	0.49	29230	6.00	25	0.0161
0.186	2.317	2.317	1.00	0.51	31544	6.25		
0.181	2.351	2.351	1.00	0.53	33931	6.50		
0.176	2.384	2.384	1.00	0.54	36390	6.75		
0.171	2.415	2.415	1.00	0.56	38921	7.00		
0.167	2.446	2.446	1.00	0.58	41521	7.25		
0.163	2.475	2.475	1.00	0.60	44190	7.50		
0.160	2.504	2.504	1.00	0.61	46928	7.75		
0.156	2.531	2.531	1.00	0.63	49733	8.00		
0.153	2.558	2.558	1.00	0.64	52604	8.25		
0.150	2.584	2.584	1.00	0.66	55540	8.50		
0.147	2.609	2.609	1.00	0.68	58542	8.75		
0.144	2.634	2.634	1.00	0.69	61607	9.00		
0.142	2.657	2.657	1.00	0.71	64735	9.25		
0.139	2.681	2.681	1.00	0.72	67925	9.50		
0.137	2.703	2.703	1.00	0.74	71177	9.75		
0.135	2.725	2.725	1.00	0.75	74489	10.00		

ANEXO 38: Cálculos para selección de diámetros a presión de 5 m y 50 m de longitud.

f	F(f)	F(Ks,Re,D,f)	H Presión(m)	Velocidad (m/s)	Reynolds Re	Diámetro (cm)	L (m)	Ks (m)
0.192	2.281	2.281	5.00	0.78	46134	6.00	50	0.0161
0.186	2.317	2.317	5.00	0.80	49780	6.25		
0.181	2.351	2.351	5.00	0.83	53541	6.50		
0.176	2.384	2.384	5.00	0.86	57414	6.75		
0.171	2.415	2.415	5.00	0.89	61398	7.00		
0.167	2.446	2.446	5.00	0.91	65492	7.25		
0.163	2.475	2.475	5.00	0.94	69692	7.50		
0.160	2.504	2.504	5.00	0.96	73999	7.75		
0.156	2.531	2.531	5.00	0.99	78411	8.00		
0.153	2.558	2.558	5.00	1.02	82925	8.25		
0.150	2.584	2.584	5.00	1.04	87542	8.50		
0.147	2.609	2.609	5.00	1.06	92258	8.75		
0.144	2.634	2.634	5.00	1.09	97074	9.00		
0.142	2.657	2.657	5.00	1.11	101987	9.25		
0.139	2.681	2.681	5.00	1.14	106996	9.50		
0.137	2.703	2.703	5.00	1.16	112101	9.75		
0.135	2.725	2.725	5.00	1.18	117300	10.00		

ANEXO 39: Cálculos para selección de diámetros a presión de 5 m y 100 m de longitud

f	F(f)	F(Ks,Re,D,f)	H Presión(m)	Velocidad (m/s)	Reynolds Re	Diámetro (cm)	L (m)	Ks (m)
0.192	2.282	2.282	5.00	0.55	32742	6.00	100	0.0161
0.186	2.317	2.317	5.00	0.57	35339	6.25		
0.181	2.351	2.351	5.00	0.59	38019	6.50		
0.176	2.384	2.384	5.00	0.61	40781	6.75		
0.171	2.415	2.415	5.00	0.63	43623	7.00		
0.167	2.446	2.446	5.00	0.65	46545	7.25		
0.163	2.475	2.475	5.00	0.67	49545	7.50		
0.160	2.504	2.504	5.00	0.69	52623	7.75		
0.156	2.531	2.531	5.00	0.70	55777	8.00		
0.153	2.558	2.558	5.00	0.72	59006	8.25		
0.150	2.584	2.584	5.00	0.74	62311	8.50		
0.147	2.609	2.609	5.00	0.76	65689	8.75		
0.144	2.634	2.634	5.00	0.78	69139	9.00		
0.142	2.657	2.657	5.00	0.79	72663	9.25		
0.139	2.681	2.681	5.00	0.81	76257	9.50		
0.137	2.703	2.703	5.00	0.83	79922	9.75		
0.135	2.725	2.725	5.00	0.84	83656	10.00		

ANEXO 40: Cálculos para selección de diámetros a presión de 5 m y 150 m de longitud

f	F(f)	F(Ks,Re,D,f)	H Presión(m)	Velocidad (m/s)	Reynolds Re	Diámetro (cm)	L (m)	Ks (m)
0.192	2.282	2.282	5.00	0.45	26767	6.00	150	0.0161
0.186	2.317	2.317	5.00	0.47	28893	6.25		
0.181	2.351	2.351	5.00	0.48	31087	6.50		
0.176	2.384	2.384	5.00	0.50	33349	6.75		
0.171	2.415	2.415	5.00	0.51	35676	7.00		
0.167	2.446	2.446	5.00	0.53	38069	7.25		
0.163	2.475	2.475	5.00	0.55	40527	7.50		
0.160	2.504	2.504	5.00	0.56	43049	7.75		
0.156	2.531	2.531	5.00	0.58	45634	8.00		
0.153	2.558	2.558	5.00	0.59	48282	8.25		
0.150	2.584	2.584	5.00	0.61	50991	8.50		
0.147	2.609	2.609	5.00	0.62	53761	8.75		
0.144	2.634	2.634	5.00	0.64	56592	9.00		
0.142	2.657	2.657	5.00	0.65	59482	9.25		
0.139	2.681	2.681	5.00	0.66	62431	9.50		
0.137	2.703	2.703	5.00	0.68	65439	9.75		
0.135	2.725	2.725	5.00	0.69	68505	10.00		

ANEXO 41: Cálculos para selección de diámetros a presión de 5 m y 200 m de longitud

f	F(f)	F(Ks,Re,D,f)	H Presión(m)	Velocidad (m/s)	Reynolds Re	Diámetro (cm)	L (m)	Ks (m)
0.192	2.282	2.282	5.00	0.39	23196	6.00	200	0.0161
0.186	2.317	2.317	5.00	0.40	25039	6.25		
0.181	2.351	2.351	5.00	0.42	26942	6.50		
0.176	2.384	2.384	5.00	0.43	28903	6.75		
0.171	2.415	2.415	5.00	0.45	30921	7.00		
0.167	2.446	2.446	5.00	0.46	32997	7.25		
0.163	2.475	2.475	5.00	0.47	35129	7.50		
0.160	2.504	2.504	5.00	0.49	37317	7.75		
0.156	2.531	2.531	5.00	0.50	39560	8.00		
0.153	2.558	2.558	5.00	0.51	41857	8.25		
0.150	2.584	2.584	5.00	0.53	44208	8.50		
0.147	2.609	2.609	5.00	0.54	46613	8.75		
0.144	2.634	2.634	5.00	0.55	49070	9.00		
0.142	2.657	2.657	5.00	0.56	51579	9.25		
0.139	2.681	2.681	5.00	0.58	54139	9.50		
0.137	2.703	2.703	5.00	0.59	56751	9.75		
0.135	2.725	2.725	5.00	0.60	59413	10.00		

ANEXO 42: Cálculos para selección de diámetros a presión de 5 m y 300 m de longitud

f	F(f)	F(Ks,Re,D,f)	H Presión(m)	Velocidad (m/s)	Reynolds Re	Diámetro (cm)	L (m)	Ks (m)
0.192	2.282	2.282	5.00	0.32	18951	6.00	300	0.0161
0.186	2.317	2.317	5.00	0.33	20458	6.25		
0.181	2.351	2.351	5.00	0.34	22014	6.50		
0.176	2.384	2.384	5.00	0.35	23617	6.75		
0.171	2.416	2.416	5.00	0.36	25268	7.00		
0.167	2.446	2.446	5.00	0.38	26966	7.25		
0.163	2.475	2.475	5.00	0.39	28710	7.50		
0.160	2.504	2.504	5.00	0.40	30499	7.75		
0.156	2.531	2.531	5.00	0.41	32334	8.00		
0.153	2.558	2.558	5.00	0.42	34213	8.25		
0.150	2.584	2.584	5.00	0.43	36137	8.50		
0.147	2.609	2.609	5.00	0.44	38104	8.75		
0.144	2.634	2.634	5.00	0.45	40115	9.00		
0.142	2.658	2.658	5.00	0.46	42168	9.25		
0.139	2.681	2.681	5.00	0.47	44264	9.50		
0.137	2.703	2.703	5.00	0.48	46402	9.75		
0.135	2.725	2.725	5.00	0.49	48582	10.00		

ANEXO 43: Cálculos para selección de diámetros a presión de 10 m y 50 m de longitud

f	F(f)	F(Ks,Re,D,f)	H Presión(m)	Velocidad (m/s)	Reynolds Re	Diámetro (cm)	L (m)	Ks (m)
0.192	2.281	2.281	10.00	1.10	65243	6.00	50	0.0161
0.186	2.317	2.317	10.00	1.14	70399	6.25		
0.181	2.351	2.351	10.00	1.18	75717	6.50		
0.176	2.384	2.384	10.00	1.21	81195	6.75		
0.171	2.415	2.415	10.00	1.25	86829	7.00		
0.167	2.446	2.446	10.00	1.29	92618	7.25		
0.163	2.475	2.475	10.00	1.33	98559	7.50		
0.160	2.504	2.504	10.00	1.36	104650	7.75		
0.156	2.531	2.531	10.00	1.40	110889	8.00		
0.153	2.558	2.558	10.00	1.44	117273	8.25		
0.150	2.584	2.584	10.00	1.47	123802	8.50		
0.147	2.609	2.609	10.00	1.51	130472	8.75		
0.144	2.634	2.634	10.00	1.54	137282	9.00		
0.142	2.657	2.657	10.00	1.57	144230	9.25		
0.139	2.681	2.681	10.00	1.61	151315	9.50		
0.137	2.703	2.703	10.00	1.64	158534	9.75		
0.135	2.725	2.725	10.00	1.68	165886	10.00		

ANEXO 44: Cálculos para selección de diámetros a presión de 10 m y 100 m de longitud

f	F(f)	F(Ks,Re,D,f)	H Presión(m)	Velocidad (m/s)	Reynolds Re	Diámetro (cm)	L (m)	Ks (m)
0.192	2.281	2.281	10.00	0.78	46303	6.00	100	0.0161
0.186	2.317	2.317	10.00	0.81	49976	6.25		
0.181	2.351	2.351	10.00	0.84	53766	6.50		
0.176	2.384	2.384	10.00	0.86	57672	6.75		
0.171	2.415	2.415	10.00	0.89	61691	7.00		
0.167	2.446	2.446	10.00	0.92	65823	7.25		
0.163	2.475	2.475	10.00	0.94	70066	7.50		
0.160	2.504	2.504	10.00	0.97	74419	7.75		
0.156	2.531	2.531	10.00	1.00	78879	8.00		
0.153	2.558	2.558	10.00	1.02	83446	8.25		
0.150	2.584	2.584	10.00	1.05	88119	8.50		
0.147	2.609	2.609	10.00	1.07	92897	8.75		
0.144	2.634	2.634	10.00	1.10	97777	9.00		
0.142	2.657	2.657	10.00	1.12	102759	9.25		
0.139	2.681	2.681	10.00	1.15	107842	9.50		
0.137	2.703	2.703	10.00	1.17	113025	9.75		
0.135	2.725	2.725	10.00	1.19	118307	10.00		

ANEXO 45: Cálculos para selección de diámetros a presión de 10 m y 150 m de longitud

f	F(f)	F(Ks,Re,D,f)	H Presión(m)	Velocidad (m/s)	Reynolds Re	Diámetro (cm)	L (m)	Ks (m)
0.192	2.282	2.282	10.00	0.64	37854	6.00	150	0.0161
0.186	2.317	2.317	10.00	0.66	40860	6.25		
0.181	2.351	2.351	10.00	0.68	43963	6.50		
0.176	2.384	2.384	10.00	0.71	47161	6.75		
0.171	2.415	2.415	10.00	0.73	50453	7.00		
0.167	2.446	2.446	10.00	0.75	53837	7.25		
0.163	2.475	2.475	10.00	0.77	57313	7.50		
0.160	2.504	2.504	10.00	0.79	60880	7.75		
0.156	2.531	2.531	10.00	0.81	64536	8.00		
0.153	2.558	2.558	10.00	0.84	68280	8.25		
0.150	2.584	2.584	10.00	0.86	72111	8.50		
0.147	2.609	2.609	10.00	0.88	76029	8.75		
0.144	2.634	2.634	10.00	0.90	80032	9.00		
0.142	2.657	2.657	10.00	0.92	84119	9.25		
0.139	2.681	2.681	10.00	0.94	88290	9.50		
0.137	2.703	2.703	10.00	0.96	92544	9.75		
0.135	2.725	2.725	10.00	0.98	96880	10.00		

ANEXO 46: Cálculos para selección de diámetros a presión de 10 m y 200 m de longitud

f	F(f)	F(Ks,Re,D,f)	H Presión(m)	Velocidad (m/s)	Reynolds Re	Diámetro (cm)	L (m)	Ks (m)
0.192	2.282	2.282	10.00	0.55	32803	6.00	200	0.0161
0.186	2.317	2.317	10.00	0.57	35409	6.25		
0.181	2.351	2.351	10.00	0.59	38100	6.50		
0.176	2.384	2.384	10.00	0.61	40874	6.75		
0.171	2.415	2.415	10.00	0.63	43729	7.00		
0.167	2.446	2.446	10.00	0.65	46664	7.25		
0.163	2.475	2.475	10.00	0.67	49680	7.50		
0.160	2.504	2.504	10.00	0.69	52774	7.75		
0.156	2.531	2.531	10.00	0.71	55946	8.00		
0.153	2.558	2.558	10.00	0.72	59194	8.25		
0.150	2.584	2.584	10.00	0.74	62519	8.50		
0.147	2.609	2.609	10.00	0.76	65919	8.75		
0.144	2.634	2.634	10.00	0.78	69394	9.00		
0.142	2.657	2.657	10.00	0.80	72942	9.25		
0.139	2.681	2.681	10.00	0.81	76563	9.50		
0.137	2.703	2.703	10.00	0.83	80257	9.75		
0.135	2.725	2.725	10.00	0.85	84022	10.00		

ANEXO 47: Cálculos para selección de diámetros a presión de 10 m y 300 m de longitud

f	F(f)	F(Ks,Re,D,f)	H Presión(m)	Velocidad (m/s)	Reynolds Re	Diámetro (cm)	L (m)	Ks (m)
0.192	2.282	2.282	10.00	0.45	26800	6.00	300	0.0161
0.186	2.317	2.317	10.00	0.47	28931	6.25		
0.181	2.351	2.351	10.00	0.48	31131	6.50		
0.176	2.384	2.384	10.00	0.50	33399	6.75		
0.171	2.415	2.415	10.00	0.52	35733	7.00		
0.167	2.446	2.446	10.00	0.53	38134	7.25		
0.163	2.475	2.475	10.00	0.55	40600	7.50		
0.160	2.504	2.504	10.00	0.56	43131	7.75		
0.156	2.531	2.531	10.00	0.58	45726	8.00		
0.153	2.558	2.558	10.00	0.59	48384	8.25		
0.150	2.584	2.584	10.00	0.61	51104	8.50		
0.147	2.609	2.609	10.00	0.62	53887	8.75		
0.144	2.634	2.634	10.00	0.64	56730	9.00		
0.142	2.657	2.657	10.00	0.65	59634	9.25		
0.139	2.681	2.681	10.00	0.67	62598	9.50		
0.137	2.703	2.703	10.00	0.68	65622	9.75		
0.135	2.725	2.725	10.00	0.69	68704	10.00		

ANEXO 48: Cálculos para selección de diámetros a presión de 15 m y 50 m de longitud

f	F(f)	F(Ks,Re,D,f)	H Presión(m)	Velocidad (m/s)	Reynolds Re	Diámetro (cm)	L (m)	Ks (m)
0.192	2.281	2.281	15.00	1.35	79905	6.00	50	0.0161
0.186	2.317	2.317	15.00	1.39	86221	6.25		
0.181	2.351	2.351	15.00	1.44	92734	6.50		
0.176	2.384	2.384	15.00	1.49	99443	6.75		
0.171	2.415	2.415	15.00	1.53	106343	7.00		
0.167	2.446	2.446	15.00	1.58	113433	7.25		
0.163	2.475	2.475	15.00	1.63	120709	7.50		
0.160	2.504	2.504	15.00	1.67	128169	7.75		
0.156	2.531	2.531	15.00	1.71	135810	8.00		
0.153	2.558	2.558	15.00	1.76	143629	8.25		
0.150	2.584	2.584	15.00	1.80	151625	8.50		
0.147	2.609	2.609	15.00	1.84	159794	8.75		
0.144	2.634	2.634	15.00	1.89	168135	9.00		
0.142	2.657	2.657	15.00	1.93	176644	9.25		
0.139	2.681	2.681	15.00	1.97	185321	9.50		
0.137	2.703	2.703	15.00	2.01	194163	9.75		
0.135	2.725	2.725	15.00	2.05	203167	10.00		

ANEXO 49: Cálculos para selección de diámetros a presión de 15 m y 100 m de longitud

f	F(f)	F(Ks,Re,D,f)	H Presión(m)	Velocidad (m/s)	Reynolds Re	Diámetro (cm)	L (m)	Ks (m)
0.192	2.281	2.281	15.00	0.95	56709	6.00	100	0.0161
0.186	2.317	2.317	15.00	0.99	61208	6.25		
0.181	2.351	2.351	15.00	1.02	65849	6.50		
0.176	2.384	2.384	15.00	1.06	70633	6.75		
0.171	2.415	2.415	15.00	1.09	75556	7.00		
0.167	2.446	2.446	15.00	1.12	80616	7.25		
0.163	2.475	2.475	15.00	1.16	85813	7.50		
0.160	2.504	2.504	15.00	1.19	91143	7.75		
0.156	2.531	2.531	15.00	1.22	96606	8.00		
0.153	2.558	2.558	15.00	1.25	102200	8.25		
0.150	2.584	2.584	15.00	1.28	107923	8.50		
0.147	2.609	2.609	15.00	1.31	113774	8.75		
0.144	2.634	2.634	15.00	1.34	119751	9.00		
0.142	2.657	2.657	15.00	1.37	125853	9.25		
0.139	2.681	2.681	15.00	1.40	132079	9.50		
0.137	2.703	2.703	15.00	1.43	138427	9.75		
0.135	2.725	2.725	15.00	1.46	144895	10.00		

ANEXO 50: Cálculos para selección de diámetros a presión de 15 m y 150 m de longitud

f	F(f)	F(Ks,Re,D,f)	H Presión(m)	Velocidad (m/s)	Reynolds Re	Diámetro (cm)	L (m)	Ks (m)
0.192	2.281	2.281	15.00	0.78	46361	6.00	150	0.0161
0.186	2.317	2.317	15.00	0.81	50043	6.25		
0.181	2.351	2.351	15.00	0.84	53843	6.50		
0.176	2.384	2.384	15.00	0.86	57760	6.75		
0.171	2.415	2.415	15.00	0.89	61791	7.00		
0.167	2.446	2.446	15.00	0.92	65936	7.25		
0.163	2.475	2.475	15.00	0.95	70194	7.50		
0.160	2.504	2.504	15.00	0.97	74562	7.75		
0.156	2.531	2.531	15.00	1.00	79039	8.00		
0.153	2.558	2.558	15.00	1.02	83625	8.25		
0.150	2.584	2.584	15.00	1.05	88317	8.50		
0.147	2.609	2.609	15.00	1.07	93115	8.75		
0.144	2.634	2.634	15.00	1.10	98018	9.00		
0.142	2.657	2.657	15.00	1.12	103024	9.25		
0.139	2.681	2.681	15.00	1.15	108133	9.50		
0.137	2.703	2.703	15.00	1.17	113342	9.75		
0.135	2.725	2.725	15.00	1.20	118653	10.00		

ANEXO 51: Cálculos para selección de diámetros a presión de 15 m y 200 m de longitud

f	F(f)	F(Ks,Re,D,f)	H Presión(m)	Velocidad (m/s)	Reynolds Re	Diámetro (cm)	L (m)	Ks (m)
0.192	2.282	2.282	15.00	0.68	40174	6.00	200	0.0161
0.186	2.317	2.317	15.00	0.70	43367	6.25		
0.181	2.351	2.351	15.00	0.73	46662	6.50		
0.176	2.384	2.384	15.00	0.75	50059	6.75		
0.171	2.415	2.415	15.00	0.77	53556	7.00		
0.167	2.446	2.446	15.00	0.80	57151	7.25		
0.163	2.475	2.475	15.00	0.82	60844	7.50		
0.160	2.504	2.504	15.00	0.84	64634	7.75		
0.156	2.531	2.531	15.00	0.87	68518	8.00		
0.153	2.558	2.558	15.00	0.89	72497	8.25		
0.150	2.584	2.584	15.00	0.91	76569	8.50		
0.147	2.609	2.609	15.00	0.93	80734	8.75		
0.144	2.634	2.634	15.00	0.95	84989	9.00		
0.142	2.657	2.657	15.00	0.98	89335	9.25		
0.139	2.681	2.681	15.00	1.00	93770	9.50		
0.137	2.703	2.703	15.00	1.02	98293	9.75		
0.135	2.725	2.725	15.00	1.04	102904	10.00		

ANEXO 52: Cálculos para selección de diámetros a presión de 15 m y 300 m de longitud

f	F(f)	F(Ks,Re,D,f)	H Presión(m)	Velocidad (m/s)	Reynolds Re	Diámetro (cm)	L (m)	Ks (m)
0.192	2.282	2.282	15.00	0.55	32823	6.00	300	0.0161
0.186	2.317	2.317	15.00	0.57	35433	6.25		
0.181	2.351	2.351	15.00	0.59	38127	6.50		
0.176	2.384	2.384	15.00	0.61	40905	6.75		
0.171	2.415	2.415	15.00	0.63	43764	7.00		
0.167	2.446	2.446	15.00	0.65	46704	7.25		
0.163	2.475	2.475	15.00	0.67	49725	7.50		
0.160	2.504	2.504	15.00	0.69	52824	7.75		
0.156	2.531	2.531	15.00	0.71	56002	8.00		
0.153	2.558	2.558	15.00	0.73	59257	8.25		
0.150	2.584	2.584	15.00	0.74	62589	8.50		
0.147	2.609	2.609	15.00	0.76	65997	8.75		
0.144	2.634	2.634	15.00	0.78	69479	9.00		
0.142	2.657	2.657	15.00	0.80	73036	9.25		
0.139	2.681	2.681	15.00	0.82	76666	9.50		
0.137	2.703	2.703	15.00	0.83	80369	9.75		
0.135	2.725	2.725	15.00	0.85	84144	10.00		

ANEXO 53: Manual práctico para la construcción de un sistema de riego por multicompuertas a través de tuberías de bambú.

Materiales:

Bambú de 4 metros (guía de selección de diámetro a través de la tabla), varilla metálica de 12 mm de 2.5 metros, taladro, martillo, destornillador, pie de rey, flexómetro, tornillos, serrucho, lija, alambre, regla, playo, barniz para madera, compuertas plásticas, broca de madera, válvula de compuerta, pegamento Sika para madera y liga.

Paso 1: Perforación de los entrenudos.

A través de una varilla de acero de 12 mm de grosor de 2.5 m de largo con la punta achatada afilada y con una agarradera en forma de “T” en el otro extremo de la varilla, con el fin de poder sostenerla. Tratar lo mayor posible de remover los entrenudos.



Paso 2: Tratamiento para la preservación del bambú.



Sumergir el bambú totalmente en agua por el transcurso de 4 horas, en una solución de cloro líquido a una concentración al 3 por ciento del volumen total, tener en cuenta que el bambú se encuentre en estado seco. Aplicar una capa de barniz con protección ultra violeta a la superficie externa del bambú.

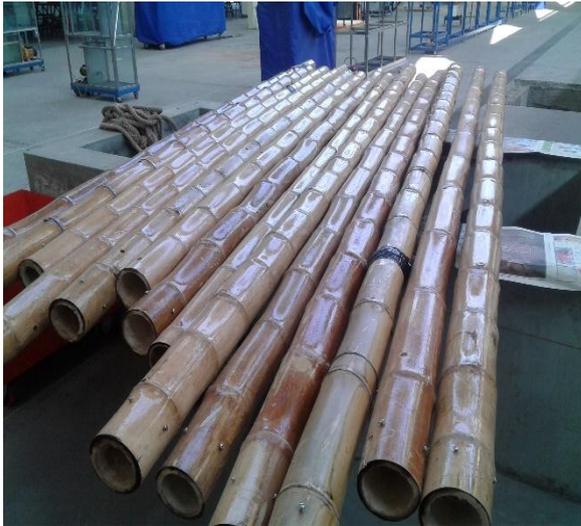
Paso 3: Taladrado y atornillado de los tramos de bambú.

Con el objetivo de asegurar que no existan fugas en el sistema y también evitar la separación de los tramos por mínimos esfuerzos que pueden ser por la misma presión del sistema o eventos antrópicos, tensar a través de alambres que impiden la separación de los mismos, estos alambres tensores se sostienen mediante pernos de forma enroscada de media pulgada que fueron colocados a 10 cm de distancia del borde, y se colocaron 4 pernos de forma simétrica incrustados en el bambú, para evitar que se fisure el bambú por el incrustamiento de los pernos, se realizó una pequeña perforación mediante un taladro con broca de punta fina para madera.



Paso 4: Lijado y construcción de los empaques.

Lijar cada extremo de los tramos de bambú a unir quedando lo más recto y uniforme posible, que al momento de unir no queden orificios entre los tramos. Construir unos empaques de cámaras de bicicletas construidas a la medida del diámetro de cada uno de los respectivos tramos, con el objetivo de sellar las pequeñas fisuras que puedan quedar al momento de ser unidas, y así evitar posibles fugas de agua del sistema de riego.



Paso 5: Unión de los tramos de bambú.

Para la unión de los bambú, se inicia con el lado del tramo más grueso de la tubería de mayor diámetro, quedando en la parte inferior el tramo más delgado del bambú, luego se colocó el segundo tramo de mayor diámetro, pero iniciando con el lado más delgado para poder lograr sus respectivas uniones con la mayor uniformidad posible. Se procede a colocarle el pegamento de silicona sobre los empaques contruidos así como por sus lados, colocada el pegamento y unidos los tramos en la posición correcta se procedió a recubrirlos con cámaras de bicicletas (ligas).



Paso 6: Tensado de la unión de los tramos de bambú

Recubierto los dos tramos con la cámara de bicicleta, se procedió a realizar el tensado mediante alambres que se anclan a los pernos incrustados sobre los tramos de bambú y que

se ajustan con la ayuda del playo, este procedimiento se lo realizó en los cuatros puntos de ajustes.



Paso 7: Instalación de las multicompuertas

Son pequeñas compuertas ya fabricadas para este tipo de riego que se utilizan para líneas de tuberías de bolsas plásticas flexibles, mas conocido como riego californiano, pero que a su vez tienen como ventaja la regulación de su caudal a través de pequeñas compuertas regulables para un caudal deseado. Estas se colocan en la línea del bambú al mismo espaciamiento de los surcos, para ello se perforo el bambú a través del taladro con una broca de 5 cm de diámetro.

