



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 1

Neiva, 19 de octubre de 2021

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Neiva (Huila)

El (Los) suscrito(s):

Jesús Erney Carrillo Hernández, con C.C. No. 1083873668,

Seidy Yadira Vidal Hidalgo, con C.C. No. 1080264249,

Autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado, titulado: Determinación de coeficiente de rugosidad (n de Manning) en tubería de guadua (Angustifolia Kunth) para drenaje agrícola.

Presentado y aprobado en el año 2021 como requisito para optar al título de Ingeniero Agrícola;

Autorizo (amos) al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que, con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales “open access” y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

Jesús Erney Carrillo Hernández / ESTUDIANTE:

Seidy Yadira Vidal Hidalgo /ESTUDIANTE:

Firma: Jesús Erney Carrillo H.

Firma: Seidy Yadira Vidal H.

Vigilada Mineducación



TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: DETERMINACIÓN DE COEFICIENTE DE RUGOSIDAD (n de Manning) EN TUBERÍA DE GUADUA (*Angustifolia Kunth*) PARA DRENAJE AGRÍCOLA.

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Carrillo Hernández	Jesús Erney
Vidal Hidalgo	Seidy Yadira

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Duarte Toro	Mauricio
Mújica Rodríguez	Edinson

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniero Agrícola

FACULTAD: Ingeniería

PROGRAMA O POSGRADO: Ingeniería Agrícola

CIUDAD: Pitalito

AÑO DE PRESENTACIÓN: 2021

NÚMERO DE PÁGINAS: 65

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Diagramas___ Fotografías_X Grabaciones en discos___ Ilustraciones en general_X Grabados___ Láminas___
Litografías___ Mapas___ Música impresa___ Planos___ Retratos___ Sin ilustraciones___ Tablas o Cuadros_X

SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento: Ninguno

MATERIAL ANEXO: Fichas técnicas y tablas

PREMIO O DISTINCIÓN (En caso de ser LAUREADAS o Meritoria):

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>	<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. <u>Drenaje</u>	<u>Drainage</u>	6. <u>Perforación</u>	<u>Perforation</u>
2. <u>Agrícola</u>	<u>Agricultural</u>	7. <u>Rugosidad</u>	<u>Roughness</u>
3. <u>Guadua</u>	<u>Guadua</u>	8. <u>Manning</u>	<u>Manning</u>
4. <u>Tubería</u>	<u>Piping</u>	9. <u>Variables</u>	<u>Variables</u>



5. Banco hidráulico

hydraulic bench

10. Modelos

Models

RESUMEN DEL CONTENIDO:

Los problemas de drenaje presentes en la zona del valle de Laboyos, afectan en gran medida la producción agrícola de la cual depende la economía de la región, se ha propuesto la utilización de guadua *Angustifolia Kunth* para drenaje agrícola como reemplazo de la tubería de PVC tradicional. Se hizo necesario el diseño y construcción de un banco hidráulico para determinar el coeficiente de rugosidad de la guadua; se diseñó dos modelos de perforación perimetrales (Modelos A y B) los cuales se probaron en dos pendientes (1% y 2%), posteriormente mediante el uso de funciones matemáticas se encontró los valores de n de Manning, se analizaron los datos obtenidos, no encontrándose diferencias estadísticas significativas entre los modelos con un nivel de confianza del 95%. Los valores del coeficiente n Manning se presentaron entre 0,020308 y 0,030668 en las variables utilizadas, estos valores obtenidos son cercanos a los encontrados por Chow (2004) para canales en madera.

ABSTRACT:

The drainage problems present in the Laboyos Valley area greatly affect agricultural production, on which the region's economy depends. The use of guadua *Angustifolia Kunt* for agricultural drainage has been proposed as a replacement for traditional PVC piping. It was necessary to design and build a hydraulic bench to determine the roughness coefficient of the guadua; two perimeter perforation models (Models A and B) were designed and tested in two slopes (1% and 2%), then using mathematical functions the values of Manning's n were found, the data obtained were analyzed and no significant statistical differences were found between the models with a confidence level of 95%. The values of the Manning's n coefficient were between 0.020308 and 0.030668 for the variables used; these values are close to those found by Chow (2004) for wooden channels.

APROBACIÓN DE LA TESIS

Nombre Jurado: JHON JAIRO BELTRÁN

Firma:

Nombre Jurado: JAIME IZQUIERDO BAUTISTA

Firma:

**DETERMINACIÓN DE COEFICIENTE DE RUGOSIDAD (n de Manning)
EN TUBERÍA DE GUADUA (*Angustifolia Kunth*)
PARA DRENAJE AGRÍCOLA**

**JESÚS ERNEY CARRILLO HERNÁNDEZ
SEIDY YADIRA VIDAL HIDALGO**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA
PITALITO HUILA
2021**

**DETERMINACIÓN DE COEFICIENTE DE RUGOSIDAD (n de Manning)
EN TUBERÍA DE GUADUA (*Angustifolia Kunth*)
PARA DRENAJE AGRÍCOLA.**

**JESÚS ERNEY CARRILLO HERNÁNDEZ
SEIDY YADIRA VIDAL HIDALGO**

Proyecto de trabajo de grado presentado a la facultad de ingeniería como requisito
para optar al título de:
Ingeniero Agrícola

DIRECTOR

Ing. MAURICIO DUARTE TORO
M. en Ingeniería Civil. Esp. en Estadística

CODIRECTOR

Ing. EDISON MUJICA RODRÍGUEZ
M.I Agrícola y Uso Integral del Agua

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA
PITALITO HUILA
2021**

Nota de aceptación

Firma del director
MAURICIO DUARTE TORO
Magister en Ingeniería Civil. Esp. En Estadística

Firma del director
EDINSON MUJICA RODRÍGUEZ
Magister en Ingeniería Agrícola y uso integral del agua

Firma del jurado
JHON JAIRO BELTRÁN

Firma del jurado
JAIME IZQUIERDO BAUTISTA

DEDICATORIA

Seidy Yadira Vidal Hidalgo

Dedico este trabajo principalmente a Dios por darme la sabiduría para finalizar satisfactoriamente esta etapa académica.

A mis padres, Evaristo Vidal y Carmen Hidalgo quienes con sus consejos y amor me han guiado a lo largo de toda mi formación académica. A mis hermanos Luz, Oliver, Sulma, Aleida y Carlos por brindarme siempre su apoyo incondicional. Mis sobrinos Lorena, Brahian, Marly e Isabella los cuales con su cariño y comprensión han aportado a este proceso formativo profesional.

A mi compañero de trabajo Erney con el que formé un excelente equipo de trabajo el cual permitió culminar satisfactoriamente este proyecto de grado.

Jesús Erney Carrillo Hernández

Este trabajo es dedicado primero a Dios, sin él nada sería posible, a mis padres, Rubiela Hernández y Jesús Elías Carrillo, quienes tuvieron para mí siempre palabras de apoyo y fe en que todo es posible, a mis hermanas Albenis, Deysi, Johana y Sirley, por todo su apoyo y paciencia. Mi sobrino Juan José y mi cuñado Cristóbal, también este logro es de ustedes.

Por último, pero no menos importante a mi novia Seidy quien siempre ha estado a mi lado apoyándome en los momentos difíciles y de flaqueza durante este proceso académico.

AGRADECIMIENTOS

Seidy Yadira Vidal y Jesús Erney Carrillo

Agradecemos a la institución que nos brindó el conocimiento y las herramientas necesarias para todo nuestro proceso formativo. A los profesores quienes nos guiaron y acompañaron, especialmente a los ingenieros Edinson Mujica y Mauricio Duarte por su colaboración y asesoría como directores de este proyecto de grado. Al ingeniero Jhon Jairo Beltrán por ayudarnos a resolver las dudas que tuvimos, siempre con la mejor disposición, a Sirley Carrillo la cual nos aconsejó, corrigió y enseñó en todo el proceso de realización de este trabajo de grado.

A todas las personas que nos colaboraron en este camino para que la realización y culminación de este trabajo llegara a buen término, principalmente a Julián Molina, Liliana Carantón y Juan Manuel Silva los cuales día a día nos acompañaron y ayudaron a cumplir con todos los objetivos planteados. Al señor Jacinto Molina por compartimos su experiencia de vida y de ese modo encontrar soluciones a distintos problemas técnicos que se nos presentaron, además de prestarnos su espacio de trabajo cuando fue necesario.

Finalmente agradecemos al personal de seguridad y aseo del plantel que de una u otra forma fue parte de este proyecto que culmina.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
2. JUSTIFICACIÓN	4
3. HIPÓTESIS EXPERIMENTAL	5
4. OBJETIVOS	6
4.1 Objetivo General	6
4.2 Objetivos Específicos	6
5. MARCO TEÓRICO	7
5.1 Drenaje agrícola	7
5.2 Tubería para drenaje agrícola.....	9
5.3 La guadua	13
6. METODOLOGÍA	17
6.1 Localización	17
6.2 Diseño de modelo de perforaciones.....	17
6.2.1. Diámetro interno promedio de la tubería	18
6.2.2 Diámetro de los orificios de las perforaciones:.....	18
6.2.3 Espaciamiento de los orificios:	18
6.3 Perforaciones internas y perimetrales.....	20
6.4 Banco hidráulico	22
6.4.1 Tanque de inmersión.....	22
6.4.2 Tanque receptor	23
6.4.3 Calibración del vertedero	27
6.5 Diseño experimental	27
6.5.1 Arreglo completo al azar.....	27
6.5.2 Tratamientos del diseño experimental.....	28
6.6 Cálculo de coeficiente de rugosidad (n de Manning).....	30
6.7 Procedimiento de toma de datos	32
6.8 Análisis estadístico	34
6.8.1 Diseño estadístico.....	34

6.8.2	Modelo estadístico	34
7.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	35
7.1	Resultados	35
7.1.1	Modelos de Perforaciones	35
7.1.2	Banco hidráulico	36
7.1.3	Coefficiente de rugosidad n de Manning	41
7.1.4	Intervalos de confianza para resultado de n de Manning.....	42
7.2	Discusión de resultados	42
8.	CONCLUSIONES	45
9.	RECOMENDACIONES	46
10.	BIBLIOGRAFÍA.....	47
11.	ANEXOS	51

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación lugar de estudio. Fuente Cuellar et al. (2015).....	17
Figura 2. Vista frontal modelo A. Fuente: Autores.	19
Figura 3. Vista lateral modelo A. Fuente: Autores.	19
Figura 4. Vista frontal modelo B. Fuente: Autores.	20
Figura 5. Vista lateral modelo B. Fuente: Autores.	20
Figura 6. Utilización banda elástica para marcación perimetral. Fuente: Autores.	21
Figura 7. Marcación longitudinal de los culmos. Fuente: Autores.	21
Figura 8. Vista lateral banco hidráulico propuesto. Fuente: Autores.	22
Figura 9. Vista lateral y transversal tanque de inmersión. Fuente: Autores.....	23
Figura 10. Tanque receptor. Fuente: Autores.....	23
Figura 11. Pre dimensionamiento pantalla de aquietamiento, corte longitudinal.	25
Figura 12. Vista planta. Fuente: Autores.....	25
Figura 13. Isometría pantalla de aquietamiento, vertedero triangular.	25
Figura 14. Corte transversal vertedero triangular pared delgada. Fuente: (Lux, 2010)	26
Figura 15. Arreglo completo al azar para pendiente 1%. Fuente: Autores.....	27
Figura 16. Arreglo completo al azar para pendiente 2%. Fuente: Autores.....	28
Figura 17. Códigos de las pruebas realizadas.....	28
Figura 18. Tipo de sección circular. Fuente Chow (2004).	31
Figura 19. Instalación de piezómetros y tablero piezométrico. Fuente: Autores.	32
Figura 20. Válvulas 1 y 2 para control de caudales. Fuente: Autores.....	32
Figura 21. Lecturas con regla limnimétrica. Fuente: Autores.....	33
Figura 22. Calibración de pendientes con nivel de precisión. Fuente: Autores.	33
Figura 23. Modelo de perforación A. Fuente: Autores.....	35
Figura 24. Modelo de perforación B. Fuente: Autores.....	35
Figura 25. Tanque de inmersión. Fuente: Autores.	37
Figura 26. Estructura de soporte del tanque de inmersión. Fuente: Autores.....	38
Figura 27. Tanque de inmersión sobre la estructura metálica. Fuente: Autores.	38
Figura 28. Collarines para sujetar la guadua. Fuente: Autores.....	39
Figura 29. Construcción del tanque receptor. Fuente: Autores.....	39
Figura 30. Tanque receptor y estructura en madera. Fuente: Autores.....	40

Figura 31. Motobomba Utilizada en la recirculación del flujo de agua.	40
Figura 32. Banco hidráulico construido. Fuente: Autores.....	41

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Código de pruebas diseño experimental para pendiente 1%. Fuente: Autores	29
Tabla 2. Código de pruebas diseño experimental para pendiente 2%. Fuente: Autores	29
Tabla 3. Dimensiones tanque de inmersión. Fuente: Autores	36
Tabla 4. Dimensiones tanque receptor. Fuente: Autores.....	36
Tabla 5. Dimensionamiento del vertedero triangular. Fuente: Autores	37
Tabla 6. Resultados estadísticos arrojados por software SPSS del n de Manning.	42
Tabla 7. Intervalos de confianza para modelos y sus pendientes.	42

LISTADO DE ECUACIONES

Ecuación 1. Diámetro interior de tubería resultante de ecuación de Manning.....	11
Ecuación 2. Ecuación para determinación de diámetro de orificios.....	18
Ecuación 3. Determinación del caudal	24
Ecuación 4. Volumen a partir del tiempo de retención	24
Ecuación 5. Expresión para cálculo de caudal teórico	26
Ecuación 6. Expresión para cálculo de caudal real	26
Ecuación 7. Ecuación de Manning	30
Ecuación 8. Ecuación de Manning reescrita.....	30
Ecuación 9. Ecuación del Caudal	30
Ecuación 10. Ecuación velocidad.....	30
Ecuación 11. Cálculo de n de Manning mediante función matemática.....	30
Ecuación 12. Radio Hidráulico para sección circular.....	31
Ecuación 13. Condición 1 para el valor de "y".....	31
Ecuación 14. Condición 2 para el valor de "y"	31

LISTADO DE ANEXOS

Anexo 1. Especificaciones taladro de perforación.	51
Anexo 2. Características motobomba de recirculación	51
Anexo 3. Diámetros y espesores de guadas. Fuente: Carantón & Molina (2021).....	52
Anexo 4. Representación tabla de cálculos N de Manning. Pendiente 1%.	52
Anexo 5. Representación tabla de cálculos N de Manning. Pendiente 2%	52
Anexo 6. Resumen de los resultados de las pruebas para las dos pendientes.	52

INTRODUCCIÓN

Los problemas de drenaje presentes en la zona del valle de Laboyos, afectan en gran medida la producción agrícola de la cual depende la economía de la región, presentándose en la zona sur del municipio precipitaciones promedio anual de 1313,9 mm (CENICAFÉ, 2018), suelos caracterizados por tener drenaje natural pobre e imperfecto siendo este su mayor limitante, presentando la necesidad de evacuar excedente hídrico durante los meses de mayo y junio, con valores que van de 30 a 60 mm, haciendo necesario la implementación de sistemas de drenaje que mitiguen las afectaciones (POT, 1999), pero al mismo tiempo incrementando los costos de adecuación y mantenimiento de los terrenos destinados para los cultivos.

Por lo anterior se propone la utilización de la guadua (*Angustifolia Kunth*) como una opción de estudio para el reemplazo de la tubería de PVC, su forma hueca y cilíndrica de la guadua (características fisiológicas) y la disponibilidad en la zona, permite tenerla en cuenta como una buena opción. El sur del departamento del Huila es un territorio que posee condiciones ambientales aptas para el desarrollo vegetativo de la guadua; cuenta con una fuerte influencia del río grande de la Magdalena, con más de 1061,6 ha en la zona sur del departamento del Huila, situación que facilita el desarrollo de este cultivo (Giraldo & Sabogal, 1999), a nivel local se cuenta con una extensión de 347,9 has. (Montealegre, 2014).

La utilización de la guadua (*Angustifolia Kunth*) como tubería para drenaje agrícola, trae consigo la determinación de factores que pueden afectar el funcionamiento de este material en el transporte de fluidos, el coeficiente de rugosidad (n de Manning) es uno de ellos, este representa las características internas de la superficie de la tubería, su valor depende del tipo de material, calidad del acabado y el estado de conservación de la tubería (CONAGUA, 2009). La pendiente de un canal y la rugosidad de la superficie, son los principales factores que determinan el coeficiente de rugosidad ... En cuanto a la pendiente, conforme esta aumenta, incrementa el coeficiente de rugosidad, sin embargo, la relación no es lineal (Afshar & Lau, 2013).

Para su uso, la tubería deberá tener adecuaciones internas, como la perforación de nudos, el diseño de los modelos de los orificios de ingreso de agua y la perforación de los mismos en el material vegetal. En cuanto a la perforación interna y la perforación de los

orificios de ingreso de agua se realizaron con ayuda del proyecto “Implementación de la guadua (*Angustifolia Kunth*) como uso alternativo de tubería para el diseño y construcción de drenaje agrícola en la Usco - Pitalito” el cual está a cargo de los estudiantes de ingeniería agrícola, Liliana Andrea Carantón y Julián Fernando Molina.

El material que se usará en el presente estudio será utilizado posteriormente en la instalación de dicho proyecto. Por otro lado, los diseños de los modelos de perforación fueron realizados en la presente investigación como parte de las variables a evaluar en la obtención del coeficiente de rugosidad (n de Manning).

Por lo anterior, se hizo necesario el diseño y construcción de un banco hidráulico que permitió realizar las pruebas controladas para caudales, posteriormente mediante el uso de funciones matemáticas encontrar los valores de n de Manning correspondientes a cada variable evaluada, finalmente se analizaron los datos obtenidos, que según los análisis de varianza no se encontraron diferencias estadísticas significativas entre los modelos de perforación diseñados con un nivel de confianza del 95%. Los valores del coeficiente n Manning corresponden a valores entre 0,020308 y 0,030668 en las variables utilizadas, estos datos obtenidos son cercanos a los encontrados por Chow (2004) para canales en madera.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El municipio de Pitalito posee dificultades de drenaje por tener suelos con deficiencia en la velocidad de infiltración y permeabilidad, proveniente de riegos y precipitaciones principalmente (CENICAFÉ, 2018), el municipio registra una precipitación promedio de 1313,9 mm anuales, haciendo necesario la implementación de sistemas de drenaje agrícola, para evacuar aproximadamente un excedente hídrico que va desde 30 a 60 mm en los meses de mayo y junio (POT, 1999).

Durante la última actualización del Plan de Ordenación y Manejo de cuencas Hidrográficas - POMCA del río Guarapas, expresa que el municipio de Pitalito tiene un área de 17.309,5 ha. equivalente a un 24,53% del área total de la cuenca que según la zonificación ambiental está destinada para uso múltiple y se puede utilizar para la producción agrícola en la zona plana del municipio, pero presenta problema de drenaje (CAM, 2019).

Los sistemas de drenaje representan un incremento en los costos de adecuación de tierras para los cultivadores, por esta razón es importante la búsqueda de nuevas opciones de tubería que pueda ser más económicos y sustituyan materiales convencionales. La guadua es un material que por sus características físicas representa una opción favorable para este uso, pero es necesario conocer algunas propiedades hidráulicas necesarias para el cálculo en diseños, esto conlleva a plantear la siguiente pregunta de investigación, ¿Cuál es el coeficiente de rugosidad (n de Manning) en la guadua como tubería de drenaje agrícola?

2. JUSTIFICACIÓN

La necesidad de encontrar nuevos materiales que puedan ser utilizados para la solución de los problemas de drenaje en la zona rural del municipio de Pitalito, abren la posibilidad de nuevas investigaciones que permitan mejorar los suelos de la región haciéndolos más productivos, sumado a esto, se puede encontrar que son materiales vegetales, naturales que están disponibles en la zona, lo que podría disminuir los costos.

Es necesario realizar investigaciones sobre materiales no convencionales encontrándose poca información bibliográfica sobre estos, es importante evaluarlos y determinar propiedades hidráulicas que aseguren la viabilidad del material, la eficiencia del mismo mucho antes de establecerlos en los cultivos. La guadua (*Angustifolia Kunth*) por su fisiología es una buena opción como material alternativo, con gran resistencia mecánica y forma cilíndrica como lo señala Montoya *et al.* (2006).

El estudio de la guadua como tubería para drenaje agrícola abre un camino de nuevos usos, este material se ha implementado en el campo constructivo dando excelentes resultados, sin considerar usos distintos que permitan solucionar problemas de la región como son los drenajes en los suelos, aprovechando las magníficas condiciones físicas y mecánicas que posee la guadua. Los resultados obtenidos en las pruebas hidráulicas traerán como efecto la posibilidad de implementar sistemas de drenaje en la zona con materiales renovables diferentes a los convencionales.

3. HIPÓTESIS EXPERIMENTAL

Como lo afirma Montoya *et al.* (2006), la parte de la guadua conocida como el culmo, es un cilindro hueco y adelgazado que está dividido en segmentos separados por nodos que en conjunto con una pared maciza dan al tallo una increíble resistencia mecánica, si se perforan estos nodos podemos encontrar la forma de una tubería en material vegetal, perfecto para el transporte de agua de drenaje. En estudios realizados por Monge (2018) muestran como la guadua (*Angustifolia Kunth*) fue estudiada como alternativa de conducción para un sistema de riego, con las adecuaciones necesarias (modelos de perforación) puede ser utilizada para actividades de drenaje agrícola como es nuestro caso.

Además de lo anterior, la guadua puede alcanzar diámetros interiores entre 10 y 14 cm lo que se asemeja a diámetros de tuberías de drenaje usados comercialmente lo que nos lleva a suponer que la guadua es un material apto para el uso como tubería para drenaje agrícola (Ibíd.).

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo General

Determinar el coeficiente de rugosidad (n de Manning) en tubería de guadua (*Angustifolia Kunth*) para drenaje agrícola.

4.2 Objetivos Específicos

- Diseñar modelos de perforación perimetrales para entrada de agua en la tubería de guadua (*Angustifolia Kunth*) y la posterior evaluación de los mismos.
- Dimensionar y construir un banco hidráulico para la realización de las pruebas hidráulicas en la tubería de guadua para drenaje agrícola.
- Realizar el diseño experimental aplicado en las adecuaciones de la guadua (*Angustifolia Kunth*) como tubería de drenaje.
- Evaluar la propiedad hidráulica coeficiente de rugosidad n de Manning en la guadua (*Angustifolia Kunth*) adecuada como tubería de drenaje.

5. MARCO TEÓRICO

5.1 Drenaje agrícola

El empleo del drenaje agrícola se remonta desde la antigüedad, pero el desarrollo teórico del mismo data de hace unos 120 años con los experimentos de Darcy en Francia (Eggelsmann, 1970). La teoría del drenaje se basa en situaciones ideales que se dan muy pocas veces en la naturaleza, para ello es que solo las soluciones aproximadas se han usado como resultados satisfactorios para resolver los problemas prácticos (Luthin, 1966).

Según Llerena (2009), el drenaje agrícola es el conjunto de obras necesarias para construir en una parcela cuando existen excesos de agua sobre su superficie o dentro del perfil del suelo, con el objeto de desalojar dichos excedentes en un tiempo adecuado y asegurar un contenido de humedad apropiado para las raíces de las plantas consiguiendo su óptimo desarrollo.

“La función del drenaje es eliminar el exceso de agua deprimiendo los niveles freáticos, mejorando la aireación, la exploración radicular y el acceso a nutrientes” (Liotta, 2012). Un sistema de drenes sub-superficiales tiene como objetivo fundamental el control de la profundidad de la capa freática, de forma tal que el balance de aguas y sales dentro de la zona radicular sea el óptimo para los requerimientos del cultivo en una condición de suelos y clima específico. Para lograr este objetivo, un sistema de drenes sub-superficiales consta fundamentalmente de tres tipos de drenes: laterales, colectores y dren principal (INIA-Carillanca, 2001)

La acumulación de agua en el suelo y formación de freáticas superficiales, pueden tener varios orígenes: Que se genere directamente en el lugar, proceder de zonas topográficamente más altas, o por influencia de la presión artesiana provenientes de acuíferos profundos en años de abundancia hídrica (...) El agua percola en profundidad y se dirige por capas permeables hacia las zonas bajas (Liotta, 2012).

Para Pizarro (1975), la influencia del mal drenaje recae principalmente sobre las propiedades físicas del suelo (aireación, estructura, permeabilidad, textura y temperatura) y en el índice de salinidad en el suelo. El efecto más importante de un mal drenaje en los suelos

es la disminución de la aireación en la zona de raíces, el nivel de oxígeno se reduce y aumenta el CO₂. La falta de aireación trastorna la fisiología de las raíces, dificultando la absorción del agua y de los nutrientes hacia las partes aéreas de las plantas (Tenorio, 1992)

La estructura y textura del suelo hacen a su drenaje, pero también es un factor importante es el relieve, la vegetación y el nivel freático. El drenaje externo está dado por el escurrimiento superficial y el drenaje interno por la infiltración y la percolación. La infiltración es el ingreso del agua al suelo hasta la saturación, y la percolación es el proceso por el cual el agua recorre (acción de la gravedad) el perfil del suelo luego de la saturación (Briseño *et al.* 2012)

Debido a los problemas de drenaje se opta por dejar de utilizar los terrenos, Liotta (2012) afirma que cuando se presentan formaciones freáticas tan superficiales y el no uso de los predios, se produce una “re-salinización (ascenso de sales por capilaridad)” causando que estos terrenos se vuelvan pocos productivos.

La conductividad hidráulica del suelo, K, es una medida de su capacidad para desalojar el agua existente en su seno y proporciona un criterio necesario para el diseño de los sistemas de drenaje. La conductividad hidráulica se mide y se reporta, frecuentemente, en pulgadas cúbicas por pulgada cuadrada por hora ($\text{pulg}^3 / \text{pulg}^2 / \text{h}$) o en centímetros cúbicos por centímetro cuadrado por hora ($\text{cm}^3 / \text{cm}^2 / \text{h}$). El rendimiento específico del agua (S), es el volumen de agua que puede ser drenado de un área unitaria de suelo saturado por la acción de la gravedad, respecto a un decremento unitario del nivel freático y dado en forma de una caída unitaria de la tabla de agua expresada como porcentaje de un volumen unitario de suelo saturado (Briceño *et al.* 2012).

El drenaje subterráneo se utiliza para la remoción o control del agua subterránea, así como para la lixiviación de sales. Los drenes pueden ser zanjas abiertas, o tubos perforados enterrados (...) Su espaciamiento apropiado puede ser determinado considerando factores tales como la profundidad de los drenes, profundidad de la capa impermeable, conductividad hidráulica, rendimiento específico del suelo, profundidad radicular requerida por los cultivos que se van a sembrar, prácticas de riego, lluvia, otras condiciones climáticas, calidad del agua de riego, salinidad del suelo, pendiente y topografía del terreno. La estimación del

espaciamiento de drenaje requiere de la determinación de la percolación profunda, del comportamiento del nivel freático y su relación con cada fuente de recarga. La elevación del nivel freático debido a la precipitación o a las aplicaciones de riego puede determinarse por medio de mediciones de campo (Ibíd.).

Un sistema de drenaje sub superficial, es aquel que controla la elevación del nivel freático permitiendo que se den las condiciones agrológicas necesarias para el óptimo desarrollo del cultivo. Este control se logra ya sea con la construcción de canales o con la instalación de tubos, de tal forma que su nombre se debe a la función que cumple y no al tipo de obra (Soto, 1994)

El cálculo de la capacidad de desagüe de tuberías de drenaje requiere conocer sus coeficientes de rugosidad, que se han determinado experimentalmente para todo tipo de tuberías de drenaje, tanto sin perforar como perforadas, y para flujo a capacidad plena o parcial. La capacidad de desagüe puede calcularse según dos principios: el de transporte y el de drenaje (FAO, 2009).

5.2 Tubería para drenaje agrícola

Las tuberías de drenaje se encuentran disponibles en diversos materiales, como plástico (corrugado o liso), arcilla y hormigón. La mayor ventaja de las tuberías plásticas frente a las tuberías de hormigón y arcilla es relación con su menor peso por unidad de largo y facilidad de manejo... Las tuberías de plástico de PVC o PV son las más frecuentemente utilizadas en la actualidad, en sus versiones lisa y corrugada (Velez, 2006).

Los tubos corrugados ofrecen una mayor resistencia hidráulica al flujo, razón por la cual requieren de un mayor diámetro para drenar la misma cantidad de agua que drena una tubería lisa, llegando a una diferencia del 25% (PAVCO, 1997). Actualmente, para drenaje agrícola prácticamente sólo se utiliza tubería de plástico corrugada, debido a su menor costo y sus facilidades de transporte e instalación por su formato de fabricación en rollos. Estas tuberías se fabrican en diferentes diámetros (50, 65, 100, 160 y 200 mm), la profundidad de la corrugación varía entre 2,5 a 5,5 mm, el ancho de la corrugación entre 3 a 8 mm y el ancho de la depresión de la corrugación o "valle" fluctúa entre 2,5 a 5 mm. Las perforaciones son de 1,2 a 1,8 mm de ancho y de 3 a 5 mm de largo (Velez, 2006).

La tubería se puede perforar con agujeros circulares o hacerle ranuras en sentido transversal. Los orificios de la tubería se hacen generalmente con diámetros de 5 a 1,5 milímetros, con una densidad de 15 a 30 agujeros por metro de tubería. Entre mayor sea la abertura de las ranuras, el paso del agua se hace más fácil, pero al mismo tiempo, se pasa la arena y el limo a través de los orificios (Suarez, 2009).

ICONTEC (2013) mediante la norma NTC 6028, expresa que el área mínima de entrada de agua por metro de longitud de tubo debe ser de 8 cm^2 . Las ranuras para entrada de agua, deben estar dispuestas de manera uniforme en al menos 5 líneas sobre la circunferencia del tubo. Deben estar constituidas de manera que la entrada del flujo de agua a través de la tubería no sea obstruida por material residual. El ancho de las ranuras para entrada de agua es igual a la longitud del eje menor. Aplican para una longitud delgada un ancho de $0,8 \pm 0,2$ mm, para una longitud media un ancho de $1,2 \pm 0,2$ mm y una longitud ancha del eje menor, podrá tener un ancho de $1,7 \pm 0,3$ mm.

El menor ancho de los orificios es de 0.01 pulgadas, pero este fácilmente produce el taponamiento y se requiere una limpieza más frecuente (Cornforth, 2005). En la mayoría de los casos se utilizan anchos de 0,02 pulgadas. Las normas para tuberías de drenaje especifican las propiedades necesarias de los materiales (cerámica, hormigón y plásticos) con los que se confeccionan las tuberías y las especificaciones de estas materias primas (FAO, 2009).

El diámetro interno y externo con sus tolerancias se especifican para tuberías de drenaje y además generalmente se incluyen en las normas los siguientes parámetros, según La FAO (2009), las tuberías de plástico deben realizarse ensayos donde se evalúan parámetros como:

- Rigidez y resistencia a elongación.
- Resistencia a impacto y fragilidad.
- Flexibilidad y posibilidad de enrollado.
- Perforaciones y propiedades hidráulicas.
- Instrucciones de manejo e instalación.

Así como:

- La densidad
- Absorción de agua

La sustitución de tubos de cerámica y hormigón por tuberías de plástico corrugado restó importancia a las normas para tubos de cerámica y hormigón, aunque todavía son útiles en países donde todavía se instalan este tipo de tubos incluyendo drenes colectores de gran diámetro (Ibíd.).

Para determinar el diámetro de la tubería se utiliza la fórmula de Manning (ecuación 1), asumiendo que el flujo es a tubería llena, pero sin presión.

La ecuación resultante es:

$$d = \left(\frac{Q}{S_o^{\frac{1}{2}} * \frac{0.3117}{n}} \right)^{\frac{3}{8}}$$

Ecuación 1. Diámetro interior de tubería resultante de ecuación de Manning

Donde:

d = diámetro interior de la tubería (m)

Q=Caudal de drenaje (m³/s)

n = Coeficiente de rugosidad de Manning (adimensional).

So = Pendiente de la rasante (m/m).

Según Vélez (2006), el valor del coeficiente de rugosidad de Manning (n) es generalmente un dato entregado por el propio fabricante, como especificación técnica del producto, en el respectivo catálogo.

Al aplicar la ecuación de Manning se presenta la dificultad de determinar el coeficiente de rugosidad n, debido a que no existe una manera exacta para encontrar este coeficiente. Dicho esto, es necesario analizar los factores que afectan la n de Manning, estos son: la rugosidad superficial, la vegetación, la irregularidad de la superficie que se analizará, la alineación y los sedimentos que se quedaran dentro del conducto (Chow, 2004).

El mayor problema que conlleva el funcionamiento de los drenes enterrados es el de colmatación, cuya ocurrencia se debe a que el agua fluye hacia los drenes a altas velocidades generando erosión al suelo que rodea el dren y de esta manera los sedimentos pueden penetrar al dren (Hernández, 1994). Un material es colocado alrededor de las tuberías de drenaje con el propósito de cumplir una función filtrante que disminuya el ingreso de partículas al interior de la tubería donde pueden sedimentar y eventualmente taponarla. Existe una gran cantidad de materiales que pueden utilizarse como envolventes que van desde materiales minerales y orgánicos a materiales sintéticos y fibras minerales (Velez, 2006). Las gravas y las arenas en estado natural son utilizados en la mayoría de los casos y específicamente como filtros (UNAL, 1988). La grava es utilizada como filtro, aunque puede obstruirse bajo condiciones severas de potencial de ocre. Duarte (1998), evaluó el taponamiento de filtros con componentes férricos encontrando que cuando ocurría taponamiento el caudal de la tubería de 100 mm tuvo una mayor disminución, esto ocurre debido a que esta posee mayor área de contacto con el agua y, por ende, esta va a fluir más fácilmente, llevando consigo una mayor cantidad de partículas de las que puedan ir por la tubería de 65mm.

La grava ha sido utilizada por muchos años, pero tiene un gran costo en algunas regiones (Ford, 1994). Davenport y Skaggs (1990), investigaron el efecto de la envoltura en tubería de drenaje y como la pendiente afecta el rendimiento del sistema de drenaje combinado con sistemas de riego superficiales. Los materiales comúnmente utilizados para drenaje nombrados anteriormente podrían ser remplazados con materiales de origen vegetal, con el propósito de utilizar elementos naturales de fácil consecución, dadas las amplias propiedades de la guadua puede pensarse como una opción viable para este fin (Velez, 2006).

La sedimentación e irregularidades de alineación en tuberías de drenaje reducen su capacidad de desagüe hasta un 50%, como lo asegura *El Atfy et al.* (1990) referenciado por FAO (2009) “Las propiedades hidráulicas de tuberías de drenaje son bien conocidas, pero la precisión de la colocación y el futuro colmatado de la tubería necesitan la introducción de un coeficiente de reducción o un factor de seguridad”.

5.3 La guadua

La guadua, es un bambú nativo de América, con 30 especies aproximadas que van desde México hasta Argentina, es una planta gramínea del gigante que puede llegar a medir hasta 30 metros de altura y un diámetro que puede variar desde 1 a 22 cm (Hidalgo, 2003).

Los botánicos Humboldt y Bonpland identificaron la Guadua como *Bambusa guadua*, en 1822 el botánico alemán Karl S. Kunth, usando la palabra guadua como era conocida por los indígenas en Colombia y Ecuador, pero rebautizándola como *Guadua Angustifolia Kunth* (Ibíd.).

La guadua hoy en día es de gran potencial dentro de los países tropicales, gracias a sus propiedades de alta resistencia mecánica, según Londoño (2011), el bambú se ha convertido en una alternativa para contrarrestar los efectos que causa el cambio climático, gracias a que se pueden sustituir obras que generan un agotamiento al planeta ya sea por su producción o implementación. A partir de la descripción dada por Rivas *et al.*, (1998), la guadua en su composición botánica está formada por:

- El rizoma
- Las raíces
- El tallo
- Las ramas
- Las hojas
- La semilla
- Las flores

El culmo de esta especie es un cilindro hueco y adelgazado dividido en segmentos o internodos separados por diafragmas (nodos), que en conjunto con una pared maciza dan al tallo una increíble resistencia mecánica. Los internodos pueden alcanzar diámetros entre 10 y 14 cm y alturas entre 17 y 23 m (Montoya *et al.* 2006) A su vez, según Teneche (2013) afirma que el culmo se puede dividir en:

- Cepa – Es la parte del culmo con mayor diámetro y espesores de pared mayores; Posee una longitud de 4 metros. Las distancias de cañutos son las más cortas y en la construcción se les utiliza como columnas.

- Basa – El diámetro es intermedio y la distancia entre nudos es mayor que en la cepa; es la parte del culmo de la guadua que más se utiliza; tiene una longitud aproximada de 11 metros.
- Sobre basa – El diámetro es menor y la distancia entre nudos es un poco mayor, comparado con la basa, la longitud es de aproximadamente cuatro metros.

La Guadua (*Angustifolia Kunth*) en estado natural en Colombia, forma colonias dominantes conocidas popularmente como “guadales” concentrados principalmente en la región andina, entre los 0 y 2000 msnm; Conocida como “el Bambú colombiano” ha sido el bambú leñoso y nativo más útil para el hombre colombiano...La guadua es una especie forestal representada por esbeltos y modulados tallos ...es larga, recta, uniforme en su desarrollo, liviana, hueca, resistente, suave, de rápido crecimiento, de bello color e imperceptiblemente cónica (FAO, 2009). La vida productiva del rizoma es de cuatro (4) años y el ciclo vegetativo superior a los diez (10) años. Un rizoma de Guadua angustifolia produce, con características similares en el diámetro y por consiguiente en altura, de uno a cuatro brotes, tres de ellos pueden producirse simultáneamente (Arbelaéz, 1986). La edad apropiada para el corte es entre los dos (2) y los seis (6) años, es la duración promedio de vida del culmo, de este tiempo en adelante la planta pierde resistencia (...) Las rajaduras o aberturas que suceden cuando no se corta en el estado adecuado, o generadas por agujeros o astillas, constituyen otro punto importante a tener en cuenta (FAO, 2009).

El componente más utilizado y estudiado generalmente es el tallo también conocido como Culmo, ya que en este se encuentra la mayor uniformidad del diámetro de la guadua y el mejor comportamiento estructural y resistivo. El culmo en condiciones ambientales normales alcanza en promedio 20 metros de longitud con 12 centímetros aproximadamente de diámetro y grosor de paredes entre 2 y 5 centímetros (Briceño, 2015). Para el aprovechamiento del material vegetal y su transformación en elemento estructural se debe tener en cuenta los criterios de Preservación y secado del culmo. El secado se da a partir de la especificación de la norma NSR-10 Título G, la cual suscribe “guadua destinada a la construcción de estructuras debe ser secada hasta un contenido de humedad (CH%), lo más cercano posible al contenido de humedad de equilibrio (CHE) con el medio ambiente de la zona en donde va a quedar instalada” (ICONTEC, 2010).

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 (...) Dentro de los productos químicos de baja toxicidad se puede utilizar el pentaborato 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).

La guadua al igual que la madera también contiene humedad, la cual es indispensable extraer, para obtener mayor resistencia y controlar hongos y agentes que la puedan atacar. El material después del proceso de corte debe ser sometido a un proceso de secado, en este proceso se contrae y obtiene su color amarillo, al estar seca pierde toda la savia y no es tan propensa al ataque de hongos, en este proceso se desecha casi un 20% de guadua en rajadas o torcidas (Garzon, 1996). Es un material higroscópico (absorbe por naturaleza agua) y va perdiendo o ganando agua en función de la temperatura y humedad relativa del ambiente en que se encuentra hasta que alcanza una situación de equilibrio con el entorno. El calor del contenido de humedad de la guadua en esta situación de equilibrio se denomina contenido de humedad de equilibrio y suele ser conocida con las siglas CHE o también humedad de equilibrio Higroscópico (HEH) (Montoya, 2005).

Las razones por las cuales no se han vuelto a usar tuberías en bambú en el ámbito hidráulico, es principalmente porque su ciclo de vida que es comparativamente más corto respecto a los materiales convencionales de transporte de agua; además de que su uso básico está asociado a obras estructurales. El bambú tiende a pudrirse por la acción permanente de la humedad. Esto se traduce en que se produce una filtración de agua en las fibras por el efecto capilar. Sin embargo, esto se ha solucionado empleando impermeabilizantes tradicionales como alquitranes, láminas bituminosas o polietileno (Barcenás *et al.* 2002).

Villada (2015) expresa que las propiedades físico – mecánicas de la guadua (*Angustifolia Kunth*) se deben explotar de manera apropiada, los entrenudos permiten

presentarla como un material rígido y de gran elasticidad, lo cual evita que ésta se rompa al doblarse y pueda ser usada en varias labores. Para poder analizar estas propiedades e identificarlas, se requiere hacerle unas pruebas teniendo en cuenta las condiciones de ensayo de las normas colombianas sobre maderas establecidas por el instituto colombiano de normas técnicas y certificación (ICONTEC) en su norma NSR10 Título G y las normas de las American Society For Testing and Materials (ASTM D143) y todas las relacionadas.

En un estudio realizado por Monge (2018), mediante la utilización de la ecuación de Colebrook – White encontró que el valor de rugosidad absoluta del bambú, 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. Respecto a la máxima presión de trabajo del bambú, se determinó que soporta presiones hasta de 30 PSI o 20 m.c.a. aproximadamente, a partir de presiones superiores a las mencionadas, se producen fugas en las uniones (ibíd.). Es posible indagar sobre los accesorios que podrían diseñarse para adaptar el sistema del bambú, ya sean del mismo material o de otro. En el primer caso el mayor reto sería el crear un proceso de moldeo del bambú para los accesorios o con la búsqueda de pegantes o epóxicos que permitan la unión hermética del sistema con los bambús seccionados en partes sin necesidad de modificar su estructura generando así accesorios (Cruz, 2019).

Entre los aportes más valiosos de la especie se debe mencionar su comportamiento como una bomba de almacenamiento de agua, cuyo funcionamiento es el principio de “vasos comunicantes” donde en épocas húmedas absorbe importantes (Velez, 2006). La guadua puede ser utilizada en muchos sectores económicos tales como construcción de viviendas, puentes, muebles, canaletas, acueductos, entre otros (Brand *et al.* 2015).

6. METODOLOGÍA

6.1 Localización

Los estudios propuestos se llevaron a cabo en las instalaciones de la universidad Surcolombiana sede Pitalito, ubicada en el Km 1 vía a la vereda El Macal del corregimiento Charguayaco del municipio de Pitalito en el departamento del Huila, Republica de Colombia, como se muestra en la figura 1.

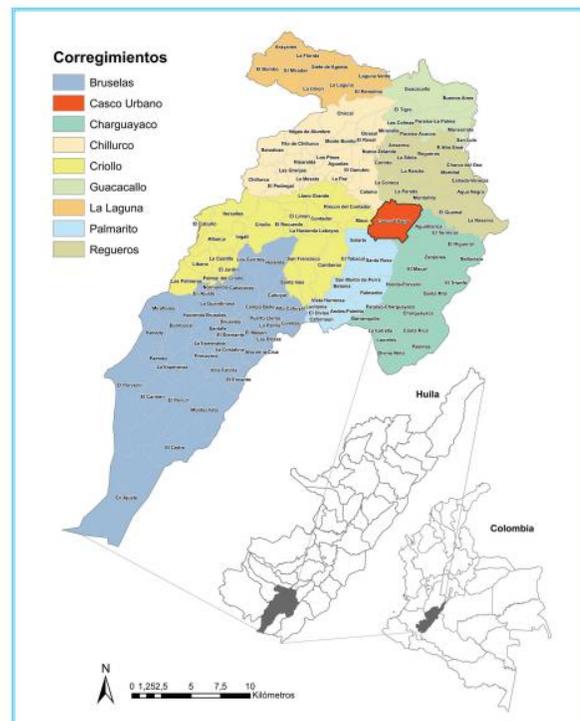


Figura 1. Ubicación lugar de estudio. Fuente Cuellar *et al.* (2015)

6.2 Diseño de modelo de perforaciones.

Basado en la norma técnica colombiana NTC – 6028, donde se expresa que el área mínima de entrada de agua por metro de longitud de tubo debe ser de 8 cm^2 y que las ranuras para entrada de agua, deben estar dispuestas de manera uniforme en al menos 5 líneas sobre la circunferencia del tubo, se procedió a calcular la cantidad de agujeros y la disposición de éstos en el perímetro de la guadua.

Para realizar lo anterior descrito fue necesario efectuar los puntos que se mencionan a continuación:

6.2.1. Diámetro interno promedio de la tubería

Dado que la guadua es un material vegetal y no se cuenta con un diámetro constante a través de ésta, fue necesario realizar varias mediciones y obtener un valor promedio, para esto, Carantón y Molina (2021) realizaron la caracterización de estos diámetros internos y externos, así como los espesores de las guaduas que se utilizaron para las pruebas hidráulicas.

6.2.2 Diámetro de los orificios de las perforaciones:

Para el cálculo del diámetro de los orificios se debe tener en cuenta el área de las ranuras de drenaje y la cantidad de líneas sobre la circunferencia del tubo por cada metro lineal, en el presente caso de estudio, el material vegetal con el que se cuenta se puede asimilar a la tubería de drenaje para uso agrícola de 4 pulgadas que dispone PAVCO (1994), ésta cuenta con un área de drenaje de 30 cm² por cada metro lineal cumpliendo así la norma NTC- 6028.

Las ranuras que dispone PAVCO en su tubería para drenaje agrícola son de forma ovalada, para facilitar el trabajo de perforación de la tubería de guadua se utilizaron brocas para madera convencionales que se ajusten al diámetro necesario.

Para el cálculo del diámetro de los orificios se aplicó la ecuación 2:

$$d = \sqrt{\frac{4 * A}{\pi}}$$

Ecuación 2. Ecuación para determinación de diámetro de orificios

Donde:

d= diámetro de los orificios

A= área de drenaje correspondiente a cada orificio

6.2.3 Espaciamiento de los orificios:

En el espaciamiento de los orificios se utilizaron dos modelos experimentales (A y B) que se describen a continuación:

- MODELO A:** Este modelamiento está determinado por 10 líneas en cada metro lineal de la tubería, teniendo 6 agujeros por línea en la circunferencia de la guadua, espaciados como lo muestran las figuras 2 y 3.

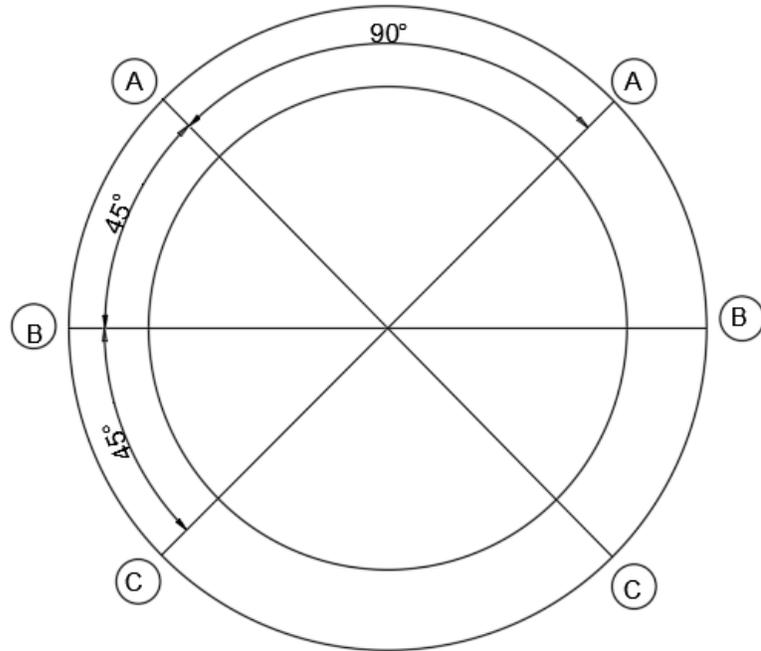


Figura 2. Vista frontal modelo A. Fuente: Autores.

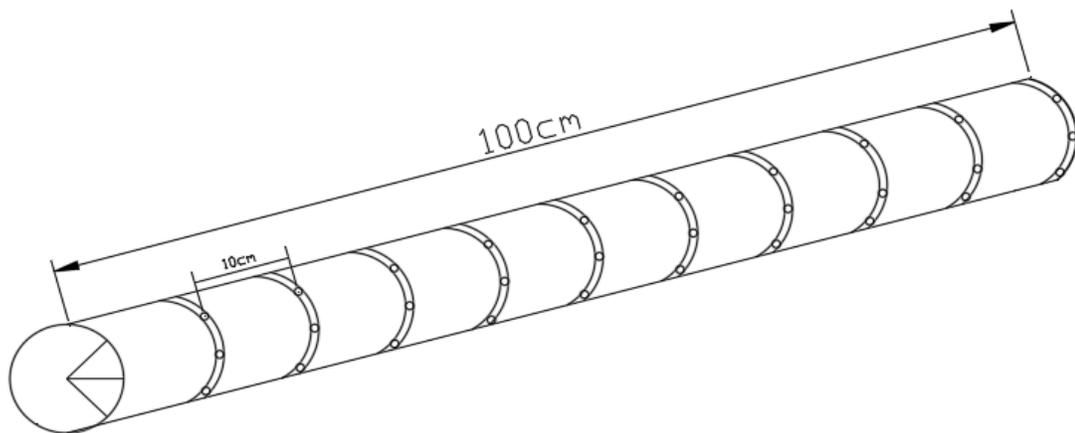


Figura 3. Vista lateral modelo A. Fuente: Autores.

- MODELO B:** Este modelamiento contó con líneas de 4 y 2 agujeros en forma intercalada sobre la circunferencia de la guadua, con un total de 20 líneas cada 5 cm por metro lineal, espaciados gradualmente, esto se indica en las figuras 4 y 5.

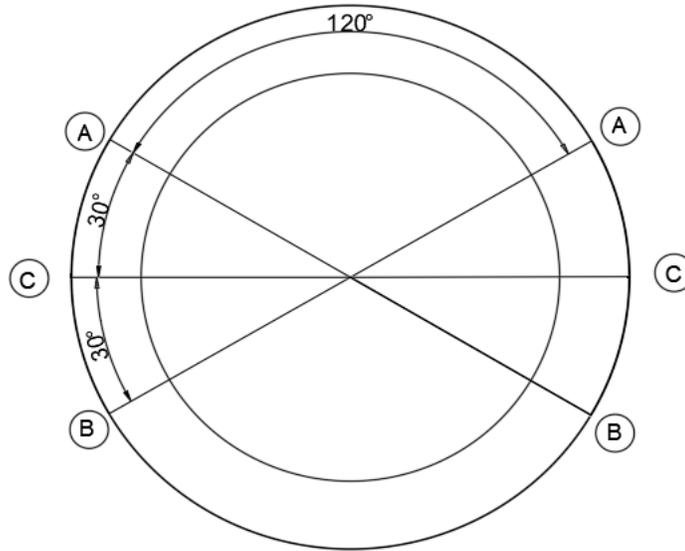


Figura 4. Vista frontal modelo B. Fuente: Autores.

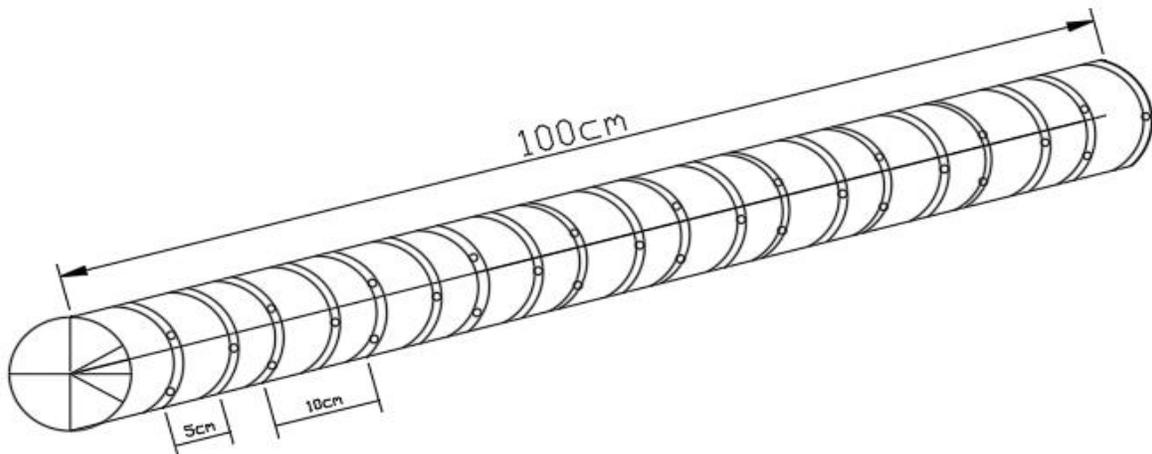


Figura 5. Vista lateral modelo B. Fuente: Autores.

6.3 Perforaciones internas y perimetrales

La tubería de guadua (*Angustifolia Kunth*) deberá tener unas adecuaciones internas, como la perforación de los tabiques. Estas perforaciones fueron realizadas por Carantón y Molina (2021), esto sucedió debido a que el material que se usó en el presente estudio será utilizado posteriormente en la instalación de su proyecto.

Para el proceso de perforación perimetral, se realizó la marcación de los agujeros mediante el empleo de una banda elástica de tela de 50 mm de ancho con un espesor de 1 mm como se muestra en la figura 6, ésta se ajustó al diámetro exterior de un transportador

con el fin de marcar la abertura angular requerida según los modelos de perforación establecidos. La finalidad de la banda elástica fue proyectar la geometría en cada punto de perforación, cabe mencionar que las condiciones naturales de la guadua no permiten que ésta sea uniforme, por lo que este sistema de marcación se adapta mediante su elasticidad a las diferentes formas de la guadua en cada tramo y admite que la distribución de las perforaciones sea homogénea a lo largo de la sección longitudinal del tubo. En la demarcación longitudinal sobre la tubería, se buscó la cara más plana de la guadua para trazar una línea central sobre ésta como se ve en la figura 7, sobre ella se marcó cada 10 cm para el modelo A y 5 cm para el modelo B con la ayuda de un flexómetro. La banda elástica se trasladó punto a punto a lo largo de la tubería para rotular los puntos que posteriormente se perforaron.



Figura 6. Utilización banda elástica para marcación perimetral. Fuente: Autores.



Figura 7. Marcación longitudinal de los culmos. Fuente: Autores.

6.4 Banco hidráulico

Para efectuar las pruebas hidráulicas se hizo necesario diseñar un banco hidráulico que permitiera determinar el caudal transportado por la tubería de drenaje agrícola, con este caudal se halló el coeficiente de rugosidad (n Manning) explicado posteriormente.

El banco hidráulico está compuesto por: columnas, Viguetas longitudinales, viguetas transversales, tanque de inmersión, calibradores de pendiente, tanque receptor, pantalla de quietamiento, vertedero triangular y bomba hidráulica. La figura 8 muestra el diseño propuesto para la ejecución el banco hidráulico.

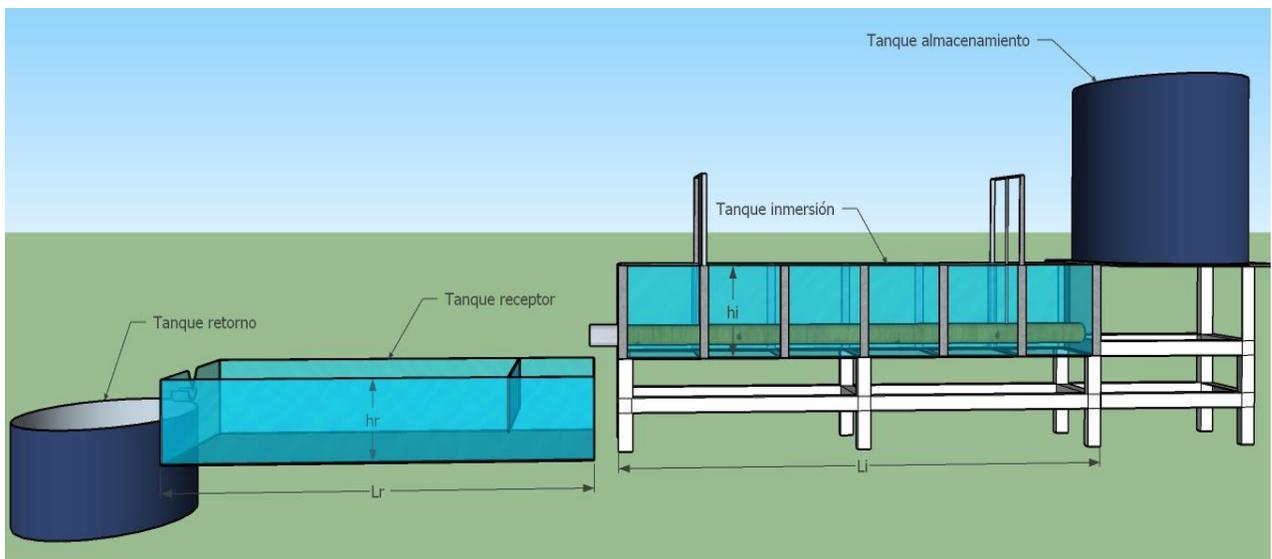


Figura 8. Vista lateral banco hidráulico propuesto. Fuente: Autores.

6.4.1 Tanque de inmersión

Se tuvo en cuenta factores como la longitud y diámetro de la guadua, así como la funcionalidad de éste una vez estuviera lleno de agua, de tal manera que se facilitara la labor de inmersión de las guaduas para su respectivo proceso evaluativo.

La geometría utilizada fue rectangular. Para garantizar un adecuado funcionamiento se emplearon materiales que generen alta residencia y durabilidad.

Para las viguetas longitudinales y transversales se emplearon PTR (perfil tubular rectangular) calibre 18. Las viguetas longitudinales tienen como función principal dar soporte

al tanque de inmersión y articularse a las columnas, así mismo las viguetas transversales sirven para amarrar las vigas longitudinales y articular toda la estructura. Se construyó dispositivos en varilla roscada con un collarín en hierro para sujetar las tuberías a probar y poder calibrar la pendiente, en la figura 9 se observa el bosquejo de tanque de recepción, la distribución de las columnas, viguetas y el regulador de pendiente.

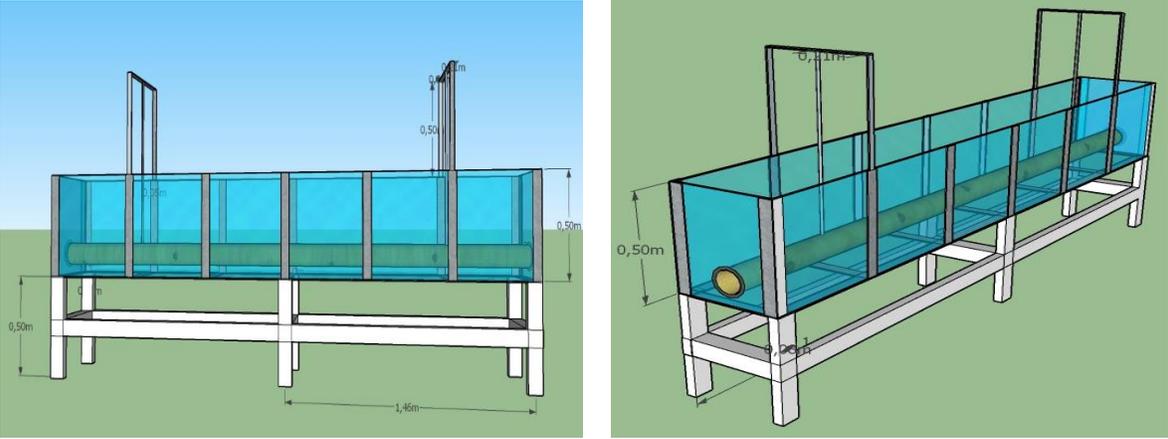


Figura 9. Vista lateral y transversal tanque de inmersión. Fuente: Autores

6.4.2 Tanque receptor

Este tanque está integrado por una pantalla de aquietamiento y un vertedero triangular que se muestra en la figura 10. Para el cálculo del volumen del tanque receptor se hizo un aforo volumétrico correspondiente a la descarga máxima total que podría presentar el tanque de inmersión, para calcular dicha descarga se utilizó la ecuación 3 que relaciona el volumen de agua en un determinado tiempo, de esta manera se aseguró que el agua alcanzará un flujo laminar antes de pasar por el vertedero triangular.

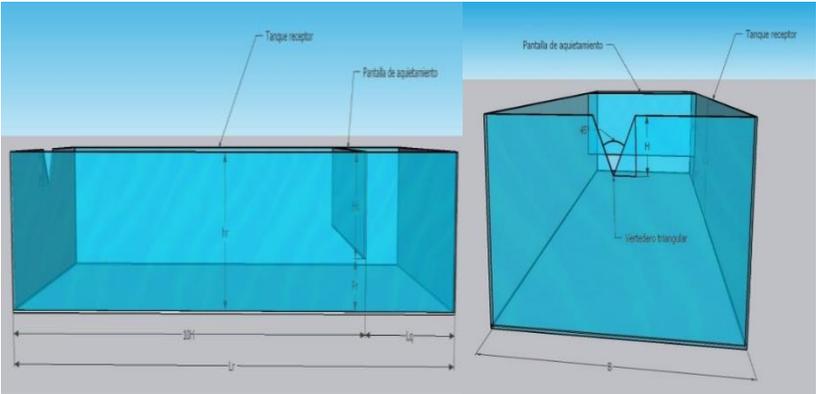


Figura 10. Tanque receptor. Fuente: Autores

$$Q = \frac{v(m^3)}{t(seg)}$$

Ecuación 3. Determinación del caudal

Según Marcillo & Ayala (2015) el tiempo de retención (Tr) se encuentra en un rango de 30 a 60 segundos por tal motivo para el presente caso se tomó un valor promedio correspondiente a 45 segundos y se calculó el volumen del tanque con la ecuación 4 descrita a continuación.

$$v = Q (m^3/seg) * Tr(seg)$$

Ecuación 4. Volumen a partir del tiempo de retención

Una vez conocido el volumen que debería tener el tanque receptor, se distribuyó en lados que facilitaran el trabajo constructivo, así como la movilidad del mismo, se incluyó una salida de agua a 4 cm del fondo en la cara opuesta a la del vertedero de ½ pulgada, esto con el fin de proporcionar limpieza al tanque cuando fuese necesario.

El diseño de la pantalla de aquietamiento y el dimensionamiento del tanque se realizó teniendo en cuenta las siguientes consideraciones expuesta por Quintero (2009) y Marcillo & Ayala (2015):

- Ancho:

$$B = B/3 (m)$$

- Profundidad:

$$Pr = Hs/3 (m)$$

- Largo= adoptable (m)

- Área de aquietamiento:

$$At = \frac{Q \text{ diseño}}{\text{Velocidad}} (m^2)$$

- Tiempo de retención

$$Tr = \frac{\text{Volumen}}{Q \text{ diseño}}, \text{ rango } 30 \text{ seg} < Tr > 60 \text{ seg.}$$

- Volumen:

$$V = Q \text{ diseño} * Tr (m^3)$$

- Área transversal:

$$At = \frac{\text{Volumen}}{Hs} (m^2)$$

- Longitud de aquietamiento:

$$Lq = \sqrt{At} \text{ (m)}$$

- Lámina de agua H1

$$H1 = \left(\frac{Q \text{ diseño}^2}{1.84 \times B} \right)^{\frac{2}{3}} \text{ (m)}$$

En la figura 11 se especifica el pre dimensionamiento de la pantalla de aquietamiento mediante un corte longitudinal, mientras que en la figura 12 se presenta una vista en planta de la misma, respectivamente se muestra en la figura 13 la isometría del tanque de recepción, con la pantalla de aquietamiento y el vertedero triangular.

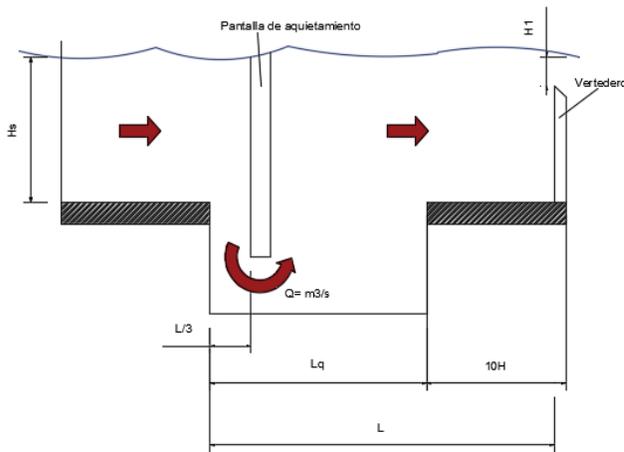


Figura 11. Pre dimensionamiento pantalla de aquietamiento, corte longitudinal.

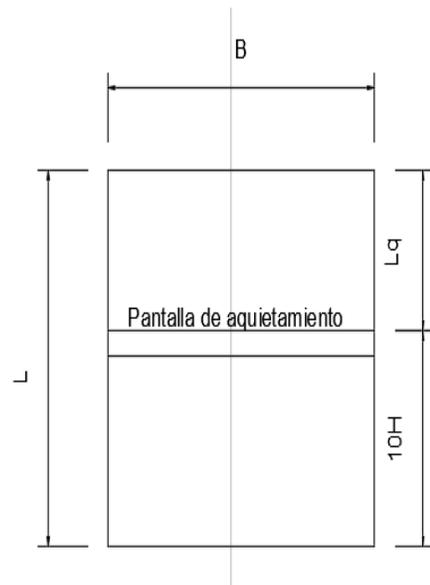


Figura 12. Vista planta. Fuente: Autores

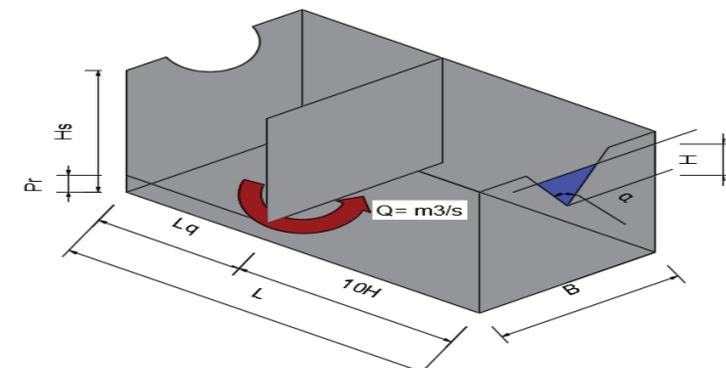


Figura 13. Isometría pantalla de aquietamiento, vertedero triangular.

Para efectos de cálculos del caudal para la tubería de drenaje agrícola a estudiarse se aforará con un vertedero triangular, según lo especifica Rocha (2015), se puede citar varias ventajas cuando se utiliza un vertedero de este tipo para medir el caudal, una de estas ventajas es la precisión que se tiene al medir caudales pequeños esto debido a que la carga sobre el vertedero depende de una potencia de 5/2.

El caudal teórico se puede expresar en la ecuación 5 como:

$$Q_{teórico} = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan \frac{\alpha}{2} H^{\frac{5}{2}}$$

Ecuación 5. Expresión para cálculo de caudal teórico

Para hallar el caudal real se calcula utilizando la ecuación 6:

$$Q_{real} = \frac{8}{15} \sqrt{2g} C_d \tan \frac{\alpha}{2} H^{\frac{5}{2}}$$

Ecuación 6. Expresión para cálculo de caudal real

Donde:

Q= Caudal (m^3/s)

g= Gravedad (m/s^2)

H= Carga del vertedero (m)

α = abertura del vertedero (grados)

C_d = Coeficiente de descarga.

En la figura 14 se observa el corte transversal de un vertedero triangular como el que se utilizó en el banco hidráulico diseñado.

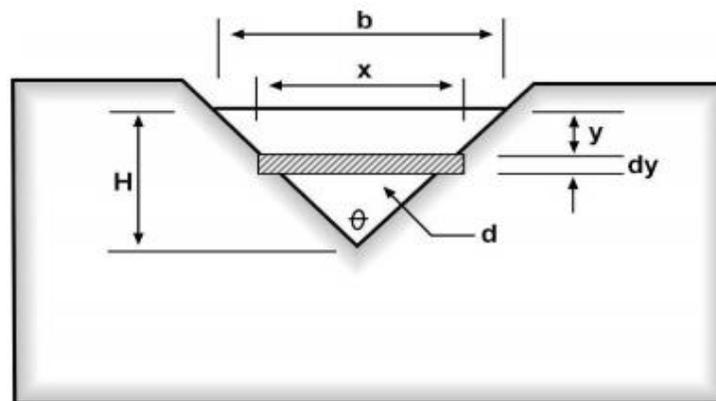


Figura 14. Corte transversal vertedero triangular pared delgada. Fuente: (Lux, 2010)

6.4.3 Calibración del vertedero

La calibración del vertedero diseñado, fue realizada por Duarte & Silva (2021), en esta calibración se halló el coeficiente de descarga (Cd) específico para el vertedero, este coeficiente se utiliza para la corrección del caudal observado, convirtiendo en caudal real como se muestra en la ecuación 6.

6.5 Diseño experimental

El diseño experimental se construyó con la finalidad de realizar pruebas controladas al material vegetal de guadua, con modelos de perforación antes determinadas, para la obtención de datos de caudales que se usaron en los cálculos de coeficiente de rugosidad (n de Manning) mediante la ecuación antes expuesta, bajo distintas variables (Modelo de perforación y pendiente) que permiten la obtención de resultados con baja probabilidad de error.

6.5.1 Arreglo completo al azar

Se estableció un diseño experimental mostrado en las figuras 15 y 16, mediante un arreglo completo al azar para cada pendiente, evaluada de modo independiente entre sí, cada arreglo es representado por los modelos de perforación propuesto (A y B) y a su vez se utilizaron 4 culmos de guadua G1, G2, G3 y G4 para el modelo A y para el modelo B la misma cantidad, estos fueron G5, G6, G7 y G8, para un total de ocho (8) culmos que representan las repeticiones realizadas, cada uno con longitud de 3 metros, pero con diámetros internos distintos entre ellos.

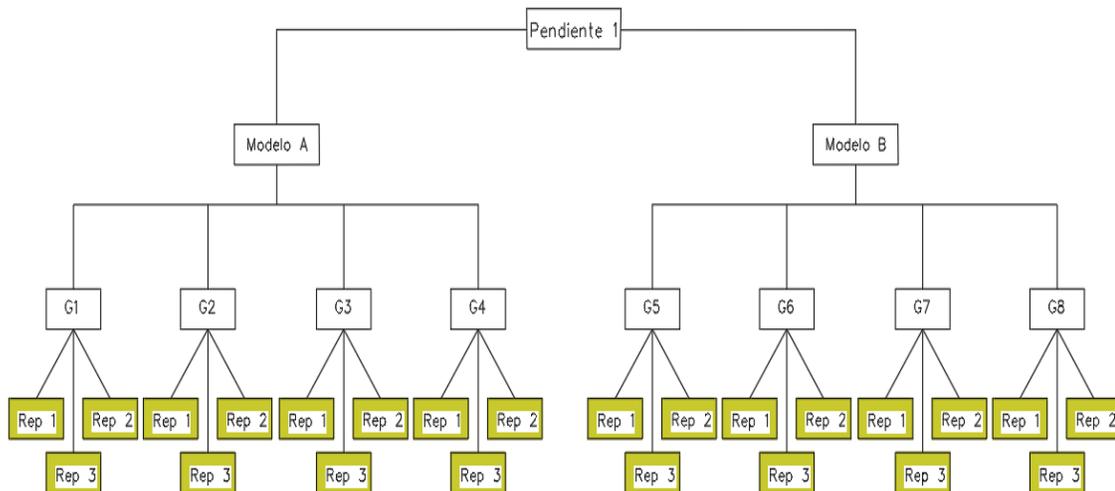


Figura 15. Arreglo completo al azar para pendiente 1%. Fuente: Autores

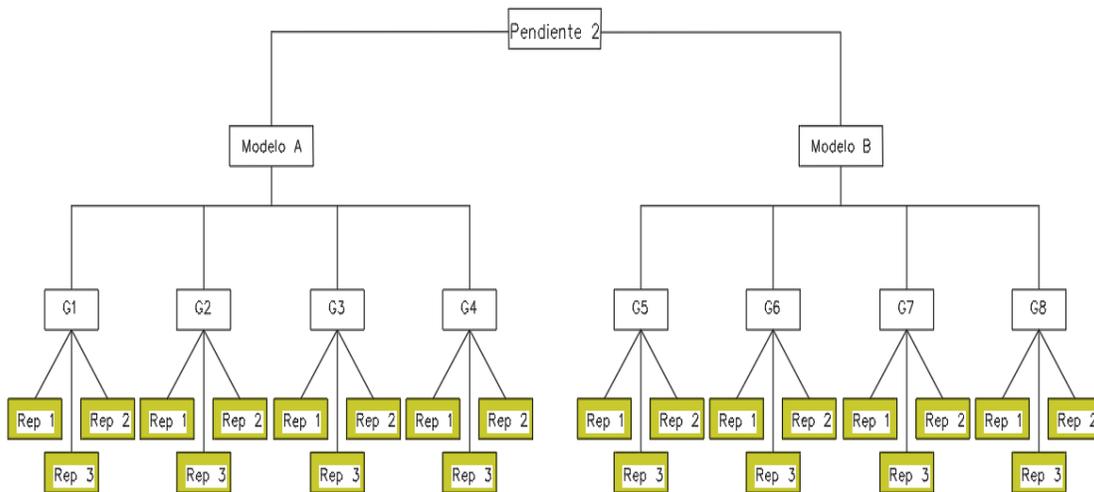


Figura 16. Arreglo completo al azar para pendiente 2%. Fuente: Autores

Debido a que PAVCO (1994) en su manual técnico para sistemas de tubería y accesorios de uso agrícola recomienda pendientes óptimas entre 1% y 3%, se evaluará pendientes de 1% (S1) y 2% (S2) por las limitaciones que se tiene en la altura del tanque de inmersión.

Para corroborar los resultados obtenidos, a cada uno de estos arreglos se les realizó tres réplicas (rep1, rep2, rep3) para lograr que los valores encontrados de n de Manning sean estadísticamente representativos.

6.5.2 Tratamientos del diseño experimental

Los tratamientos que se utilizarán en el diseño experimental serán nombrados con códigos para su identificación y organización como en la figura 17, estos códigos se asignaron de acuerdo a las condiciones de pendiente (S1, S2) al Modelo al que pertenecen (A o B), los culmos a evaluar (G1, G2, G3, G4, G5, G6, G7 y G8) y el número de réplica a la que pertenece (rep1, rep2, rep3).

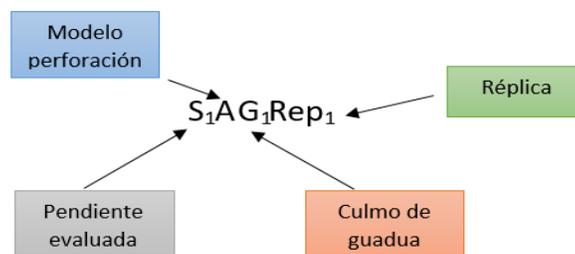


Figura 17. Códigos de las pruebas realizadas

El resumen de los símbolos que se utilizarán están representados en la tabla 1 para la pendiente de 1% y la tabla 2 para la pendiente de 2%, los códigos desde el número 1 a 12 pertenecen al tratamiento A y los códigos desde el número 13 al 24 son pertenecientes al bloque B.

Tabla 1. Código de pruebas diseño experimental para pendiente 1%. Fuente: Autores

Modelo de perforación	# Prueba	Cód. Tratamiento	Modelo de perforación	# Prueba	Cód. Tratamiento
A	1	S ₁ AG ₁ Rep ₁	B	13	S ₁ BG ₅ Rep ₁
	2	S ₁ AG ₁ Rep ₂		14	S ₁ BG ₅ Rep ₂
	3	S ₁ AG ₁ Rep ₃		15	S ₁ BG ₅ Rep ₃
	4	S ₁ AG ₂ Rep ₁		16	S ₁ BG ₆ Rep ₁
	5	S ₁ AG ₂ Rep ₂		17	S ₁ BG ₆ Rep ₂
	6	S ₁ AG ₂ Rep ₃		18	S ₁ BG ₆ Rep ₃
	7	S ₁ AG ₃ Rep ₁		19	S ₁ BG ₇ Rep ₁
	8	S ₁ AG ₃ Rep ₂		20	S ₁ BG ₇ Rep ₂
	9	S ₁ AG ₃ Rep ₃		21	S ₁ BG ₇ Rep ₃
	10	S ₁ AG ₄ Rep ₁		22	S ₁ BG ₈ Rep ₁
	11	S ₁ AG ₄ Rep ₂		23	S ₁ BG ₈ Rep ₂
	12	S ₁ AG ₄ Rep ₃		24	S ₁ BG ₈ Rep ₃

Tabla 2. Código de pruebas diseño experimental para pendiente 2%. Fuente: Autores

Modelo de perforación	# Prueba	Cód. Tratamiento	Modelo de perforación	# Prueba	Cód. Tratamiento
A	1	S ₂ AG ₁ Rep ₁	B	13	S ₂ BG ₅ Rep ₁
	2	S ₂ AG ₁ Rep ₂		14	S ₂ BG ₅ Rep ₂
	3	S ₂ AG ₁ Rep ₃		15	S ₂ BG ₅ Rep ₃
	4	S ₂ AG ₂ Rep ₁		16	S ₂ BG ₆ Rep ₁
	5	S ₂ AG ₂ Rep ₂		17	S ₂ BG ₆ Rep ₂
	6	S ₂ AG ₂ Rep ₃		18	S ₂ BG ₆ Rep ₃
	7	S ₂ AG ₃ Rep ₁		19	S ₂ BG ₇ Rep ₁
	8	S ₂ AG ₃ Rep ₂		20	S ₂ BG ₇ Rep ₂
	9	S ₂ AG ₃ Rep ₃		21	S ₂ BG ₇ Rep ₃
	10	S ₂ AG ₄ Rep ₁		22	S ₂ BG ₈ Rep ₁
	11	S ₂ AG ₄ Rep ₂		23	S ₂ BG ₈ Rep ₂
	12	S ₂ AG ₄ Rep ₃		24	S ₂ BG ₈ Rep ₃

6.6 Cálculo de coeficiente de rugosidad (n de Manning)

En un principio en 1889 el ingeniero irlandés Robert Manning presentó una expresión matemática presentada en la ecuación 7, la cual relacionaba el valor de la velocidad en m/s a partir del radio hidráulico (Rh) en metros, el coeficiente de rugosidad (n) y la pendiente (S).

$$V = \frac{1}{n} * Rh^{2/3} * S^{1/2}$$

Ecuación 7. Ecuación de Manning

Para el desarrollo del proyecto se empleará la misma ecuación, sin embargo, en este caso se necesita conocer el valor del coeficiente de rugosidad (n), por lo que se reescribirá la ecuación en función de éste (ecuación 8).

$$n = \frac{R^{2/3} * S^{1/2}}{V}$$

Ecuación 8. Ecuación de Manning reescrita

El valor de la velocidad se puso en función del caudal (Q) en m³/s y el área (A) en m², en la ecuación 9 de la siguiente forma:

$$Q = V * A$$

Ecuación 9. Ecuación del Caudal

De este modo en la ecuación 10 se obtiene que la velocidad es:

$$V = \frac{Q}{A}$$

Ecuación 10. Ecuación velocidad

Donde al remplazar en la ecuación de Manning queda expresada de la siguiente manera (ecuación 11):

$$n = \frac{R^{2/3} * S^{1/2} * A}{Q}$$

Ecuación 11. Cálculo de n de Manning mediante función matemática.

La velocidad se puso en términos del caudal (Q) y área (A), para facilitar el objetivo, que es encontrar el valor de “n”, debido a que estos datos pueden ser conocidos más fácilmente a la hora de emplear la fórmula.

Para el cálculo del radio hidráulico (R_h) se debe tener en cuenta que éste depende de la forma del conducto, ya sea en canales abiertos o cerrados como tubos este no es más que la relación entre el área mojada y el perímetro mojado.

Los canales o tuberías artificiales por lo general se diseñan con figuras geométricas, por lo que ya se encuentran tablas con ecuaciones establecidas para cada sección que se pueda diseñar, para el presente caso la fibra vegetal que se utilizó se puede asemejar a una geometría circular como en la figura 18, por lo que se empleó la ecuación propuesta por Chow (2004) en la cual se relaciona el diámetro interno de la tubería (D) en metros y un ángulo θ en radianes, se indica en la ecuación 12.

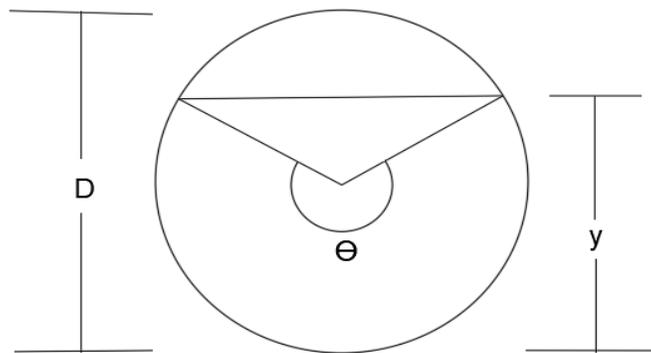


Figura 18. Tipo de sección circular. Fuente Chow (2004).

$$R_h (m) = \left(1 - \frac{\text{sen}(\theta)}{8}\right) * \frac{D}{4}$$

Ecuación 12. Radio Hidráulico para sección circular

Para determinar el ángulo θ requerido, fue necesario emplear las ecuaciones 13 y 14, tomadas de Moot (2006) las cuales permiten ajustarse a las siguientes situaciones:

Para $y < D/2$

$$\theta = \pi - 2 * \sin^{-1}\left(1 - \left(\frac{2 * y}{D}\right)\right)$$

Ecuación 13. Condición 1 para el valor de "y"

Para $y > D/2$

$$\theta = \pi + 2 * \sin^{-1}\left(\left(\frac{2 * y}{D}\right) - 1\right)$$

Ecuación 14. Condición 2 para el valor de "y"

Para medir la profundidad de la lámina de agua “y” se hizo un orificio en la mitad de la sección longitudinal de la tubería con una broca para madera de diámetro 1/8, en este orificio se instaló manguera transparente de 4 mm que funcionó como piezómetro, se colocó sobre un tablero piezométrico debidamente nivelado, que permitió hacer lecturas precisas al milímetro en el momento de la prueba, en la figura 19 se muestra el proceso de instalación. La pendiente (s), será variada de acuerdo a lo planteado anteriormente en el modelo experimental.

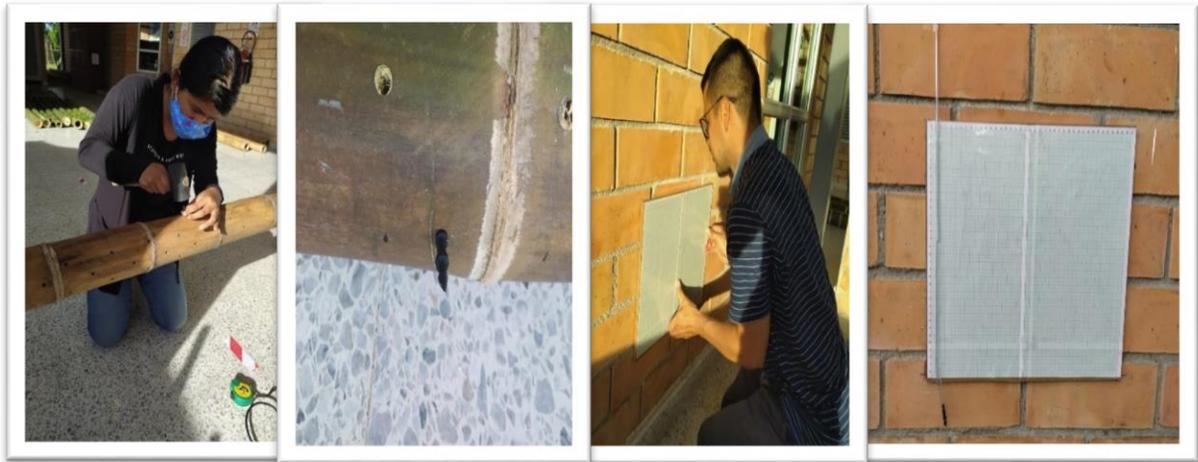


Figura 19. Instalación de piezómetros y tablero piezométrico. Fuente: Autores.

6.7 Procedimiento de toma de datos

Para llevar a cabo el proceso de toma de datos, inicialmente se estabilizó el caudal de ingreso al sistema con la apertura de la válvula 1 (azul) y la válvula 2 (roja) que controla el caudal de salida de la motobomba, con el fin de estabilizar la lámina que estaba en el tanque receptor, en la figura 20 se puede observar la ubicación de cada una de las válvulas.



Figura 20. Válvulas 1 y 2 para control de caudales. Fuente: Autores

Una vez alcanzada una lámina de agua constante, como se observa en la figura 21 se procedió a tomar los valores de la altura del agua sobre el vertedero triangular del tanque receptor medida en la regla limnimétrica, así como también la altura piezométrica.

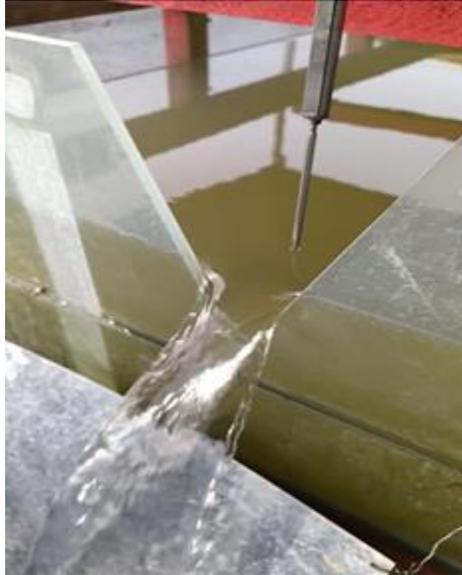


Figura 21. Lecturas con regla limnimétrica. Fuente: Autores

Para asegurar la mayor exactitud, con un nivel de precisión Topcon AT-B4 se realizaron mediciones para calibrar la pendiente de la tubería de guadua dentro del tanque de inmersión como se muestra en la figura 22, así como para el cálculo de la altura de la lámina de agua dentro de la tubería en la mitad de la sección longitudinal.



Figura 22. Calibración de pendientes con nivel de precisión. Fuente: Autores.

6.8 Análisis estadístico

6.8.1 Diseño estadístico

Se realizó un diseño completamente al azar donde, para cada una de las pendientes (1% y 2%) la variable de respuesta fue el n de Manning, se utilizó dos modelos de perforación que correspondieron a los tratamientos, implementando cuatro repeticiones por tratamiento y a su vez se realizaron tres réplicas por cada repetición. El análisis estadístico se realizó en el software SPSS versión 23 con licencia estudiantil.

6.8.2 Modelo estadístico

$$y_{IJ} = M + t_x + E_{ij}$$

y_{IJ} = Variable de respuesta, n de Manning

M = Media poblacional

t_x = Efectos debidos al tratamiento

E_{ij} = Error experimental

Para la evaluación del modelo estadístico se utilizó un análisis de varianza (ANOVA), que permitió evaluar el efecto de los modelos en la alteración de los resultados obtenidos en la variable de respuesta, con un nivel de confianza del 95%.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

7.1 Resultados

7.1.1 Modelos de Perforaciones

Los modelos que se diseñaron para las perforaciones perimetrales fueron indicados en el inciso 6.2, para el diámetro de cada orificio se usó la ecuación 2 dando como resultado un diámetro de perforación de 0,798 cm equivalentes a 0,314 pulgadas, se utilizó una broca 5/16 (0,313 pulgadas) por ser el valor más cercano a una broca comercialmente disponible, en cuanto al proceso de perforación sobre los culmos de guadua que se mostró en el inciso 6.3 se realizó con un taladro manual de marca Work (anexo 1), con el fin de no deformar las fibras vegetales y que se obstaculizara el paso del agua en la tubería. En la figura 23 se observa el resultado de las perforaciones del modelo A, por otro lado, en la figura 24 se muestra el modelo de perforación B.



Figura 23. Modelo de perforación A. Fuente: Autores



Figura 24. Modelo de perforación B. Fuente: Autores

7.1.2 Banco hidráulico

Teniendo en cuenta las dimensiones comerciales de las láminas de acero inoxidable que se adquirieron para la construcción del tanque de inmersión se optó por darle un dimensionamiento como se muestra en la tabla 3, el tanque receptor se diseñó y construyó a partir del aforo volumétrico que fue realizado a la salida del tanque de inmersión para el que se obtuvo un caudal de $0.018 \text{ m}^3/\text{s}$ empleando la ecuación 3 y utilizando 45 segundos como tiempo de retención lo cual es un valor intermedio entre el rango presentado por Marcillo & Ayala (2015), se pudo determinar el volumen del tanque receptor empleando la ecuación 4, una vez conocido el volumen del tanque se dimensionó los elementos que lo conforman, mediante las ecuaciones propuestas por Quintero Betin (2009) y Marcillo & Ayala (2015) que se mostraron en la metodología.

Tabla 3. Dimensiones tanque de inmersión. Fuente: Autores

TANQUE DE INMERSIÓN	
Alto (Hi)	0.36 m
Ancho (Ai)	0.245 m
Largo (Li)	3.07 m

En la tabla 4 se muestran dichas dimensiones que son ubicadas como se mostraron anteriormente en las figuras 11, 12 y 13.

Tabla 4. Dimensiones tanque receptor. Fuente: Autores.

TANQUE RECEPTOR		Pantalla aquietamiento	
Alto (Hr)	0.5 m	Distancia Lq	0.5 m
Ancho (Ar)	0.84 m	Altura Pr	0.07 m
Largo (Li)	2.5 m	Altura Hs	0.43 m

Utilizando los datos obtenidos en el aforo volumétrico y utilizando la ecuación 5 se despejó el valor de H y se obtuvo el valor máximo de la carga sobre el vertedero, esto permitió dimensionar dicho vertedero triangular, utilizando un ángulo de abertura que funcione para caudales medianos y pequeños (45°), en la tabla 5.

Tabla 5. Dimensionamiento del vertedero triangular. Fuente: Autores

VERTEDERO TRIANGULAR	
Alto	0.43 m
Ancho b	0.205 m
Carga H	0.25 m
Angulo θ	45°

El tanque de inmersión se realizó con láminas de acero inoxidable calibre 18. Comercialmente estas laminas son de 1.50 X 1.00 metros, la construcción de éste se indica en la figura 25. Las columnas del tanque de inmersión se elaboraron con ángulos dobles estructurales A36, lados de 1 ½ x 1 ½, espesor de 1/8 de pulgada, cada columna contó con una altura de 0.80 metros como se observa en la figura 26, una vez realizadas las dos estructuras mencionadas, se unificaron y se obtuvo el tanque de inmersión como se indica en la figura 27, fue necesario también la construcción de dos collarines que sujetaron la guadua en el momento de la prueba permitiendo la variación de las pendientes, figura 28.



Figura 25. Tanque de inmersión. Fuente: Autores.



Figura 26. Estructura de soporte del tanque de inmersión. Fuente: Autores.



Figura 27. Tanque de inmersión sobre la estructura metálica. Fuente: Autores.



Figura 28. Collarines para sujetar la guadua. Fuente: Autores.

En cuanto al tanque receptor se elaboró en vidrio liso de 6 mm de espesor, excepto la cara del fondo que tiene un espesor de 12 mm y la cara del vertedero que se instaló en acrílico transparente de 10 mm, al igual que la pantalla de aquietamiento, también es importante resaltar que el tanque receptor contó con una estructura en madera que lo recubrió con el fin de darle rigidez y estabilidad. Los perfiles de madera empleados tienen dos secciones diferentes (6.5 x 4 cm) y de (4 x 4 cm), en la figura 29 se muestra el proceso de construcción del tanque de recepción, por otro lado, en la figura 30 se puede observar el tanque receptor y la estructura de apoyo construida en madera.



Figura 29. Construcción del tanque receptor. Fuente: Autores.



Figura 30. Tanque receptor y estructura en madera. Fuente: Autores.

Se utilizaron 2 tanques en el sistema de recirculación del banco hidráulico, el primero es un tanque de 1000 litros marca Ajoever para almacenamiento que se ubicó al inicio del sistema a una altura de 1 metro medido desde el piso, el segundo fue ubicado al final del sistema con una capacidad de 500 litros marca Europlast a una altura de -1.05 metros medido desde el piso que sirve como tanque de retorno del agua. Se empleó para la recirculación del agua una motobomba marca Hi-Force mostrada en la figura 31 (ver anexo 2).



Figura 31. Motobomba Utilizada en la recirculación del flujo de agua.

El producto final de los diseños y la construcción del banco hidráulico utilizado para las pruebas de caudal y n de Manning se muestran en la figura 32.



Figura 32. Banco hidráulico construido. Fuente: Autores.

7.1.3 Coeficiente de rugosidad n de Manning

Después de realizar la toma de datos, se utilizó una hoja de cálculo de Microsoft Office 365 estudiantil versión 2019 creada por Duarte & Silva (2021) en la cual se adicionó los datos de diámetros internos y espesores de los culmos de guaduas utilizados en las pruebas (ver anexo 3), estos diámetros fueron suministrados por Carantón & Molina (2021), en dicha hoja de Excel se hacen los cálculos de los radios hidráulicos, caudales aforados por el vertedero triangular y el valor de n de Manning de cada repetición y replicas respectivas, en los anexos 4 y 5 se muestra en forma de tabla los cálculos realizados y en el anexo 6 se muestran los resultados obtenidos en cada una de las pruebas para pendientes de 1% y 2%.

Posteriormente los valores obtenidos se corrieron en el programa estadístico SPSS versión 23, con el diseño completamente al azar y el modelo estadístico mostrado anteriormente en la metodología, Los resultados obtenidos del valor estadístico del n de Manning en la tubería de guadua para drenaje agrícola bajo el diseño experimental propuesto se indican en la tabla 6.

Tabla 6. Resultados estadísticos arrojados por software SPSS del n de Manning.

	MODELO	N- MANNING *	DE	EEM	p-value
PENDIENTE 1	M1	0.020308	0.0039908	0.008	0.237 NS
	M2	0.021925	0.0023081		
PENDIENTE 2	M1	0.028889	0.0059650	0.011	0.35 NS
	M2	0.030668	0.0024807		

Leyenda

* Valores medidos

M1; Modelo A

M2; Modelo B

DE; Desviación estándar

EEM; Error estándar de la media

p-value; valor de $p > 0.05$

NS; No significativo

7.1.4 Intervalos de confianza para resultado de n de Manning

Para dar más seguridad en los datos de n de Manning, se estableció los intervalos de confianza para cada modelo en las respectivas pendientes en los que fueron evaluados, dicho intervalo fue determinado por medio del método t-student, debido a la cantidad de datos que se tenían (<30 datos). Los valores de intervalos de confianza se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Intervalos de confianza para modelos y sus pendientes.

	Modelo	Intervalo de Confianza	
Pendiente 1	M1	0,02284363	0,01777237
	M2	0,02289963	0,02095037
Pendiente 2	M1	0,03267898	0,02509902
	M2	0,03171551	0,02962049

7.2 Discusión de resultados

Los valores presentados en la tabla 6, obtenidos de los ensayos realizados a la tubería de guadua (*Angustifolia Kunth*), se comportaron similar ($p > 0,05$) entre los dos modelos de

perforación. Pese a no existir diferencias estadísticas se puede ver como en la pendiente 2 respecto a la pendiente 1 el valor del coeficiente de rugosidad (n de Manning) es numéricamente mayor, mostrando un comportamiento idéntico en los dos modelos de perforación, esto es normal debido a que según Mora & Ávila (2019), hay múltiples factores que pueden afectar el valor del coeficiente de rugosidad, tales como la sección transversal y longitudinal, pendiente y altura de lámina de agua, de igual manera según la ecuación 7 correspondiente a la ecuación de Manning existe una relación directamente proporcional entre la pendiente y el valor del coeficiente de rugosidad.

Para los modelos de perforación propuestos, se desarrolló dos diferentes distribuciones de orificios perimetrales sobre la circunferencia de la tubería de guadua, teniendo como constantes el número y el área de cada perforaciones, la aceleración de la gravedad y la cabeza hidráulica, dando como resultado que no se presentaran diferencias estadísticas entre los modelos, lo cual se debe a que, de acuerdo a Navarro (2019) el caudal captado por una tubería de drenaje es el que ingresa por sus perforaciones, se relaciona directamente proporcional a las constantes mencionadas anteriormente y al coeficiente de descarga de las perforaciones, Navarro utilizó esta relación para determinar el número de orificios que debería tener su tubería y analizó el comparativo entre el dren Francés y el geodren Lamidren L20BD como sistemas de subdrenaje en la infraestructura vial.

Los valores obtenidos para el coeficiente de rugosidad n de Manning bajo los dos tratamientos (modelo A y B) evaluados en las pendientes (1% y 2%) se encuentran dentro de los valores obtenidos por (Almeida, Testezlaf, & Matsura, 2000) en una investigación realizada en tubería de bambú gigante (*Dendrocalamus giganteus*) para determinar los parámetros hidráulicos Manning (η), Hazen-Williams (C), y rugosidad absoluta (ϵ) en dos tipos de perforación interna de entrenudos, los valores experimentales en el coeficiente de Manning (η) de tubos perforados por impacto con una variación de 0.0208 a 0.0347, y un valor promedio de 0.0273, en cuanto a los tubos perforados mecánicamente, los valores variaron de 0.0124 a 0.0250, con un valor promedio de 0.0154.

Se presentan por Chow (2004) intervalos de confianza para canales en madera que se encuentran entre: machihembrada con valores 0.010 y 0.014; laminada 0.015 y 0.020, para nuestros intervalos de confianza presentados en la tabla 7 se obtuvieron valores cercanos a

estos intervalos con comportamientos similares, es importante aclarar que Chow no especifica las pendientes en las que se evaluaron los coeficientes de Manning, además de qué, aunque utilizó materiales en fibras vegetales, estos no presentan las irregularidades que la tubería de guadua (*Angustifolia Kunth*) dentro de sus entrenudos posee, hechos que podrían lograr la diferencia que existen entre los coeficientes encontrados en los dos materiales vegetales.

8. CONCLUSIONES

- Se diseñaron dos modelos de perforación perimetrales, el modelo A está determinado por 10 líneas sobre la circunferencia de la guadua con por 6 agujeros en cada una mientras que el modelo B contó con líneas de 4 y 2 agujeros en forma intercalada sobre la circunferencia de la guadua, con un total de 20 líneas cada 5 cm por metro lineal. El diámetro de cada perforación fue de 0,798 cm equivalentes a 0,314 pulgadas.
- El banco hidráulico está formado por un tanque de inmersión con forma rectangular, construido en láminas de acero inoxidable calibre 18 con dimensiones de alto, ancho y largo de 0,36 0,245 m y 3,07 m respectivamente con un refuerzo con ángulos dobles estructurales A36 y dos collarines para la modificación de las pendientes. El tanque receptor tuvo un volumen de 0,018 m³ construido en vidrio liso de 6 mm con excepción del fondo que tuvo 12mm de espesor, con refuerzo en madera de 6.5 x 4 cm, una pantalla de aquietamiento construido en acrílico de 10 mm y un vertedero triangular construido en el mismo material con abertura de 45°.
- Se utilizó un arreglo completo al azar como diseño experimental que se aplicó a cada pendiente evaluada de modo independiente entre sí, cada arreglo es representado por los modelos de perforación propuesto (A y B) con tres réplicas cada uno. El modelo estadístico utilizado ($y_{IJ} = M + tx + E_{ij}$) contempla como variable de respuesta n de Manning y un error experimental de 5%. Para la evaluación del modelo estadístico se usó un análisis de varianza (ANOVA) que determinó la no existencia de diferencias estadísticas representativas entre los dos modelos propuestos ($p > 0,05$).
- El coeficiente de rugosidad (n de Manning) se presentaron entre 0,020308 y 0,030668 en las variables utilizadas, para facilitar su uso se determinaron intervalos de confianza del coeficiente para cada modelo y pendiente evaluada, en las pendientes evaluadas 1% y 2% con el modelo A (M1) se encontraron los intervalos de confianza de 0,01777237 - 0,02284363 y 0,02509902 – 0,03267898 respectivamente, en cuanto al modelo B (M2) evaluadas en las mismas pendientes se hallaron intervalos de 0,02095037 – 0,02289963 para 1% y de 0,02962049 – 0,03171551 para 2%.

9. RECOMENDACIONES

- ✓ Se recomienda el mejoramiento del banco hidráulico, específicamente lo concerniente al control del caudal utilizado en los ensayos. En la zona del tanque de inmersión se recomienda modificar las dimensiones para poder utilizar diferentes longitudes de tuberías.
- ✓ Se recomienda diseñar otros modelos de distribución de perforaciones que posean diversidad en las áreas, con el fin de validar los resultados de este estudio o ampliar valores de n de Manning.
- ✓ Es recomendable la evaluación de la pérdida de energía que puede existir entre los nudos de la guadua.
- ✓ Se recomienda la construcción de vertederos triangulares con dimensiones (ángulos) distintos que permitan evaluar caudales más pequeños o más grandes según sea el caso y siguiendo la metodología de Duarte & Silva (2021), puedan encontrarse los coeficientes de descarga para cada uno de ellos.
- ✓ La evaluación realizada debe ser respaldada por evaluaciones de campo, Carantón & Molina (2021) implementaron en su diseño de drenaje los culmos evaluados en la presente investigación, es recomendable utilizar las parcelas propuestas por ellos y evaluar el comportamiento del n de Manning con diseños experimentales aplicados en dichas parcelas.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Afshar, N., & Lau, T. (2013). *Encyclopedia of Tribology*. Obtenido de Effect of Roughness on Lubrication. https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5_100361.
- Almeida, J., Testezlaf, R., & Matsura, E. (2000). *Características hidráulicas de los tubos de bambú gigantes*. Campina Grande: Revista brasileña de ingeniería agrícola y ambiental.
- Araya, A., González, V., & Jiménez, M. (2018). *Análisis de la variación del coeficiente de rugosidad de Manning con respecto a la pendiente del canal en tubería de PVC de 315 mm de diámetro*. Carabobo Venezuela: Revista ingeniería UC.
- Arbelaéz, A. (1986). Regeneración natural de la Guadua (*Guadua angustifolia* Kunt) por activación de las yemas del rizoma. *Rev. Fac. Nac. Agron. Medellín, Volume 49, Issue 1 y 2, p. 65-81*.
- Barcenas, G., Mejía, T., & Ordoñez, V. (2002). *Manual para la construcción sustentable*. tomado de: https://www.conafor.gob.mx/biblioteca/documentos/MANUAL_PARA_LA_CONST.
- Bonilla, J., Cruz, M., Gutierrez, M., & Juan, Q. (2017). *Expansión lineal y punto de saturación de las fibras de la guadua Angustifolia Kunt*. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Brand, R., Ruiz, D., & Lozano, N. (2015). *caracterizacion fisica y mecanica de la guadua rolliza de la especie angustifolia kunth mediate procesamiento digital de imagenes*. Bogota.
- Briceño, M., Alvarez, F., & Barahona, U. (2012). *Manual de Riego y Drenaje. Programa de Manejo Integrado de Plagas en América Centra*. El Zamorano, Honduras: Escuela Agrícola Panamericana.
- Briceño, P. (2015). *Determinación experimental del contenido de humedad de equilibrio de la guadua angustifolia kunth para la construccion de isotermas de sorción*. Bogotá: Universidad la Gran Colombia, (9), 1689-1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
- CAM. (2019). *Taller de actores POMCA. Proyecto de actualización del POMCA del rio Guarapas*. Pitalito Colombia.
- Caranton, L. A., & Molina, J. F. (2021). *Implementación de la guadua Angustifolia Kunt como uso alternativo de tubería para el diseño y construcción de drenaje agrícola en la Usco - Pitalito*. Universidad Surcolombiana Sede Pitalito.
- CENICAFÉ. (2018). *Agroclima.cenicafe.org*. Obtenido de <https://agroclima.cenicafe.org/web/guest/registros-historicos>
- Chow, V. T. (2004). *Hidráulica de canales abiertos*. Chicago Illinois: McGraw-hill.
- Colina, S. (1997). *Diseño y manejo de sistemas de drenaje*.
- CONAGUA. (2009). *Alcantarillado sanitario. Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento MAPAS*. México.

- Cornforth, D. (2005). *Landslides in Practice, Investigations, Analisis, and Remedial/Preventative Opciones In Soil*. Jhon Wiley and Sons inc.
- Cruz, C. (2019). *Determinación de características de bambú como tubería temporal a través de modelo de un banco hidráulico*. Tunja Boyacá: Universidad Católica de Colombia.
- Cuellar, C., Figueroa, C., Garavito, S., Hammer, T., Natiello, P., & Silva, P. (2015). *Alcaldía de Pitalito*. Obtenido de Ruta de cambio de Pitalito 2030, Consciente y comprometido con el cambio climatico: Tomado de <https://www.alcaldiapitalito.gov.co/publicaciones/Ruta-Cambio-Pitalito.pdf>
- Davenport, M., & Skaggs, R. (1990). *Effects of drain envelope and slope on performance of a drainage - subirrigation system*. American Society of Agricultural engineers.
- Duarte, M. (1998). *Taponamiento en tubería de drenaje con envolventes en geotextil por precipitación de componentes férricos*. Bogotá Colombia: Universidad de los Andes.
- Duarte, M., & Silva, J. M. (2021). *Tubería de drenaje Agrícola en Guadua Angustifolia: Implicaciones de la rugosidad de Manning en rodales de Pitalito - Huila*. Pitalito: Universidad Surcolombiana.
- Eggelsmann, R. (1970). *Subsurface drainage Instructions*. Hamburgo Alemania: English edition Edited and supported by the ICID National Committee of the Federal republic of Germany. Pág 10-283.
- El Atfy, H., Wahid, O., El Gamaal, H., & Ritzema, H. (1990). *Hydraulic performance of subsurface collector drains in Egypt. En: Symp. on Land Drainage for. Salinity Control in Arid and Semi-Arid Regions*. El Cairo Egipto. Vol. 3, pp. 393-405.
- FAO. (2009). *Materiales para sistemas de drenaje subterráneo*. Roma Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Ford, H. W. (1994). *Iron Ocre and related sludge deposits in subsurface drains lines*.
- Garzon, J. (1996). *Optimización de estructuras en guadua*. Bogota.
- Giraldo, E., & Sabogal, A. (1999). La Guadua: Una alternativa Sostenible. *Corporación Autónoma del Quindío - CRQ*. Pág. 192.
- Hernández, A. (1994). *Drenajes de tierras*. Cali Colombia: Universidad del Valle. Pág 3-17.
- Hidalgo, O. (2003). *Bamboo. The gift of the gods*. Bogotá Colombia: Editado por Oscar Hidalgo López. Pág 553.
- ICONTEC. (2010). *NSR-10: Título G, Norma Sismo Resistente Colombiana*. Bogotá: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificaciones.
- ICONTEC. (2013). *NTC 6028: Tuberías de drenaje de policloruro de vinilo rígido (pvc - u). Dimensiones, requisitos y ensayos*. Bogotá Colombia: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificaciones.

- INIA- Carillanca. (2001). *Drenaje en suelos agrícola*. Santiago de Chile: Instituto de Investigaciones Agropecuarias.
- Liotta, M. (2012). *El drenaje de los suelos agrícolas*. San Juan Argentina: Instituto Nacional de Tecnología agropecuaria. Tomado desde <https://inta.gob.ar/documentos/el-drenaje-de-los-suelos-agricolas>.
- Llerena, F. A. (2009). *Drenaje superficial en terrenos agrícolas*. Madrid España: Editora Agrícola Española S.A.
- Londoño, X. (2011). *El bambú en Colombia*. 11 (3), 143-154.
- Luthin, H. N. (1966). *Drainage Engineering*. New York - EUA: Jhon Willey and Sons inc.
- Marcillo Aguilar, J. C., & Ayala Ibarra, C. C. (2015). *Tratamiento de aguas potables*. Armenia: Universidad del Quindío.
- Monge, M. (2018). *El bambú (guadua Angustifolia Kunt) como alternativa de conducción para un sistema de riego por multicompuerta*. Lima: Universidad Agraria La Molina.
- Montealegre, W. (2014). *Formulación del plan prospectivo y estratégico para la consolidación de la cadena productiva de la cuenca hidrográfica de río Guarapas, departamento del Huila, Colombia*. Pitalito .
- Montoya, J. (2005). *Técnicas de preservación de la Guadua*.
- Montoya, L., Serna, L., & Rios, E. D. (2006). Estudio de las propiedades mecánicas de haces de fibra de Guadua angustifolia. *Ingeniería y desarrollo (20)*, 125-133.
- Moot, R. L. (2006). *Mecánica de fluidos*. México: Pearson Education.
- Mora, D., & Ávila, V. (2019). *Afectación del coeficiente de rugosidad para la ecuación de Manning con el envejecimiento de tuberías de diferentes materiales*. . Bogota Colombia: Universidad Católica de Colombia.
- Murillo, N. (2008). *Diseño y construcción de un sistema de riego discontinuo, utilizando caña guadua (guadua ssp.) como material de conducción, aplicando al cultivo de maíz (zea maiz l.)*. Portoviejo Ecuador: Universidad Técnica de Manabí.
- Navarro, L. (2019). *Análisis comparativo de la capacidad hidráulica entre el dren Francés y el geodrén lamidren L20DB como sistema de subdrenaje en la infraestructura vial*. Medellín, Colombia: Universidad de Antioquia.
- PAVCO. (1994). *Manual técnico: Sistema de tubería y accesorios Uso Agrícola*. Bogotá: Op Gráficas Ltda.
- PAVCO. (1997). *Diseño de subdrenes*. Colombia: Departamento de ingeniería, geotextiles PAVCO.
- Pizarro, F. (1975). *Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos*.
- POT. (1999). *Plan de Ordenamiento Territorial*. Pitalito Huila: Universidad Nacional de Colombia.

- Quintero Betin, K. B. (2009). *Metodologías de diseños de obras hidráulicas en el estudio de pre factibilidad de pequeñas centrales hidroeléctricas*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Rivas, P., Villegas, J., Cerquera, J., & Cortés, M. (1998). *Composición Botánica de la Guadua*.
- Rocha, A. (2015). Formula de vertederos. *Manual de la Construcción- Agenda ICG-*, 1-15.
- Sotelo, G. (1997). *Hidraulica general*. Limusa S.A.
- Soto, M. (1994). *El cultivo de banano, producción y comercialización: Planteamiento de una empresa bananera*. Guayaquil Ecuador. Pág 330-356: Congreso Acorban .
- Suarez, J. (2009). *Deslizamientos: Técnicas de Remediación*. Bucaramanga Colombia. : Universidad Industrial de Santander.
- Teneche, G. (2013). *Partes de la Guadua Angustifolia Kunt*. Obtenido de Guadua Bambú Colombia: <https://guaduabambucolombia.com/2013/03/19/partes-de-la-guadua-angustifolia-kunth/> Publicado 19 de marzo de 2013
- Tenorio, M. (1992). *Curso internacional de drenaje de tierras agrícolas* . Cali Colombia: Universidad Nacional.
- UNAL. (1988). *Curso taller drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos*. Palmira Valle: UNIVERSIDAD NACIONAL. Pág 239-257.
- Velez, S. (2006). *La guadua Angustifolia "El bambu colombiano"*. Manizales. Pág. Pág. 35-81.
- Villada, L. (2015). *La guadua una alternativa para la construccion de viviendas de interes social*. Puerto Boyaca.

11. ANEXOS

TALADRO PERCUTOR DE MANO		
 Imagen de referencia	Marca	Work
	Potencia Máx	650 w
	Voltaje	110 V/ 60 Hz
	Tamaño Mandril	1/2" (13mm)
	Velocidad rotación	500 - 550 rpm
	Peso	1,8 kg

Anexo 1. Especificaciones taladro de perforación.

MOTOBOMBA		
 Imagen de referencia	Marca	Hi - Force
	Potencia Máx	6,5 Hp
	Altura Máx	60 metros
	Cáudal Máx	150 GPM
	Descarga	1 1/2"
	Succión	1 1/2"

Anexo 2. Características motobomba de recirculación

Perimetro 0 m	Perimetro 0,5 m	Perimetro 1 m	Perimetro 1,5 m	Perimetro 2 m	Perimetro 2,5 m	Perimetro 3 m	Perimetro Promedio (cm)	Espesor Promedio (mm)	Espesor Promedio (cm)	Diametro Exterior (cm)	Diametro Interior (cm)	S-(A/B)-Nn-De-Esp- Di	# Culmo
(cm)													
35,8	38,3	39	39,8	41,8	42,2	42	39,8	16,3	1,63	12,7	9,4	S-A-14-12,7-1,6-9,4	G1
38,7	39,5	40,8	41,4	42,3	42,4	43,4	41,2	16,3	1,63	13,12	9,9	S-A-13-13,1-1,6-9,9	G2
35,1	34,6	34,8	34	33,2	33	32,4	33,9	12,1	1,21	10,78	8,4	S-A-13-10,8-1,2-8,4	G3
36,2	36	37,2	36,2	35,4	34,2	34,8	35,7	16,2	1,62	11,37	8,1	S-A-10-11,4-1,6-8,1	G4
35,8	35	36	36,8	37,2	40,6	40	37,3	15,3	1,53	11,89	8,8	S-B-13-11,9-1,5-8,8	G5
39,6	39	38,2	37,2	36,5	35,4	34,6	37,2	17,2	1,72	11,85	8,4	S-B-13-11,8-1,7-8,4	G6
33,4	34,9	36,3	36,4	35,4	35,4	35,8	35,4	13,2	1,32	11,26	8,6	S-B-12-11,3-1,3-8,6	G7
42,6	42,2	40,8	39,8	39,3	40	38,7	40,5	14,6	1,46	12,89	10,0	S-B-12-12,9-1,5-10	G8

Anexo 3. Diámetros y espesores de guaduas. Fuente: Carantón & Molina (2021)

# CULMO	Pte	COTA MITAD	CABEZA (Lectura aguja limnométrica H cm)			Piezómetro m						RADIO HIDRÁULICO						Caudal l/s			n de Manning		
			Rep 1	Rep 2	Rep 3	LECTURAS			Rep 1		Rep 2		Rep 3		Rep 1	Rep 2	Rep 3	Rep 1	Rep 2	Rep 3			
						Rep 1	Rep 2	Rep 3	γ1	γ2	γ3	θ	RH	θ							RH	θ	RH
G1	0,01	0,677	11,520	11,360	11,380	0,165	0,165	0,167	0,086	0,086	0,088	5,123	0,028	5,123	0,028	5,260	0,027	2,947	2,845	2,858	0,021685685	0,02245961	0,022150823
		0,677																					
		0,677																					
G2	0,01	0,684	11,517	11,503	11,563	0,168	0,168	0,168	0,087	0,087	0,087	4,876	0,030	4,876	0,030	4,876	0,030	2,944	2,936	2,974	0,024836116	0,02490824	0,024586387
		0,684																					
		0,684																					
G3	0,01	0,684	10,490	10,483	10,530	0,159	0,159	0,159	0,059	0,058	0,058	3,974	0,025	3,948	0,025	3,957	0,025	2,331	2,328	2,354	0,020017384	0,02001253	0,019803501
		0,684																					
		0,684																					
G4	0,01	0,683	11,647	11,680	11,640	0,169	0,169	0,169	0,072	0,072	0,072	4,865	0,024	4,890	0,024	4,878	0,024	3,028	3,050	3,024	0,014443588	0,01432562	0,014456751
		0,683																					
		0,683																					
G5	0,01	0,678	10,893	10,867	10,843	0,163	0,163	0,163	0,077	0,077	0,077	4,793	0,027	4,793	0,027	4,793	0,027	2,562	2,546	2,533	0,021334473	0,02146565	0,021581217
		0,678																					
		0,678																					
G6	0,01	0,669	10,630	10,633	10,620	0,153	0,152	0,152	0,073	0,073	0,073	4,794	0,025	4,770	0,025	4,770	0,025	2,410	2,412	2,404	0,019915984	0,01991502	0,019977794
		0,669																					
		0,669																					
G7	0,01	0,699	10,600	10,617	10,607	0,167	0,167	0,167	0,055	0,055	0,055	3,720	0,025	3,720	0,025	3,720	0,025	2,393	2,402	2,397	0,020694448	0,02061339	0,020662237
		0,699																					
		0,699																					
G8	0,01	0,680	11,540	11,543	11,523	0,155	0,155	0,155	0,077	0,077	0,077	4,308	0,030	4,308	0,030	4,308	0,030	2,959	2,961	2,949	0,025609026	0,02559068	0,025701885
		0,680																					
		0,680																					

Anexo 4. Representación tabla de cálculos N de Manning. Pendiente 1%.

# Guadua	PTE	COTA MITAD	CABEZA (Lectura aguja limnométrica H cm)			Piezómetro l/s						RADIO HIDRÁULICO						Caudal l/s			n de Manning		
			REP 1	REP 2	REP 3	LECTURAS						REP 1		REP 2		REP 3		REP 1	REP 2	REP 3	REP 1	REP 2	REP 3
						REP 1	REP 2	REP 3	y1	y2	y3	θ	RH	θ	RH	θ	RH						
G1	0,02	0,698	11,633	11,713	11,687	0,172	0,174	0,174	0,073	0,074	0,075	4,281	0,029	4,366	0,029	4,383	0,029	2,947	2,845	2,858	0,03124213	0,0324151	0,03228089
		0,698																					
		0,698																					
G2	0,02	0,699	11,770	11,723	11,707	0,172	0,172	0,172	0,076	0,076	0,076	4,281	0,030	4,281	0,030	4,281	0,030	2,944	2,936	2,974	0,03531608	0,03541864	0,03496098
		0,699																					
		0,699																					
G3	0,02	0,695	11,313	11,253	11,233	0,172	0,172	0,172	0,060	0,061	0,061	4,053	0,025	4,071	0,025	4,071	0,025	2,331	2,328	2,354	0,02845073	0,02852492	0,02820933
		0,695																					
		0,695																					
G4	0,02	0,694	11,607	11,503	11,530	0,172	0,160	0,160	0,064	0,052	0,052	4,335	0,025	3,682	0,023	3,682	0,023	3,028	3,050	3,024	0,02055396	0,01956154	0,01972997
		0,694																					
		0,694																					
G5	0,02	0,693	11,513	11,533	11,513	0,174	0,175	0,175	0,073	0,074	0,073	4,552	0,027	4,602	0,027	4,582	0,027	2,562	2,546	2,533	0,0303195	0,03049101	0,03066227
		0,693																					
		0,693																					
G6	0,02	0,685	10,913	11,297	11,360	0,161	0,161	0,161	0,065	0,065	0,066	4,313	0,026	4,313	0,026	4,332	0,026	2,410	2,412	2,404	0,02825398	0,02823155	0,02833193
		0,685																					
		0,685																					
G7	0,02	0,714	11,633	11,650	11,630	0,183	0,183	0,183	0,056	0,056	0,056	3,769	0,025	3,769	0,025	3,769	0,025	2,393	2,402	2,397	0,02941455	0,02929933	0,02936876
		0,714																					
		0,714																					
G8	0,02	0,70	11,617	11,620	11,610	0,159	0,160	0,160	0,061	0,062	0,062	3,605	0,028	3,633	0,028	3,646	0,028	2,959	2,961	2,949	0,03441552	0,03450889	0,03471677
		0,70																					
		0,70																					

Anexo 5. Representación tabla de cálculos N de Manning. Pendiente 2%

Prueba	Radio Hidraulico	Caudal	N de Manning	Prueba	Radio Hidraulico	Caudal	N de Manning
S ₁ AG ₁ Rep ₁	0,027763777	2,946711224	0,021685685	S ₂ AG ₁ Rep ₁	0,028546796	2,946711224	0,031242134
S ₁ AG ₁ Rep ₂	0,027763777	2,845171768	0,022459611	S ₂ AG ₁ Rep ₂	0,028623564	2,845171768	0,032415098
S ₁ AG ₁ Rep ₃	0,027373267	2,857719337	0,022150823	S ₂ AG ₁ Rep ₃	0,028634368	2,857719337	0,032280891
S ₁ AG ₂ Rep ₁	0,029636978	2,944303978	0,024836116	S ₂ AG ₂ Rep ₁	0,029880968	2,944303978	0,035316081
S ₁ AG ₂ Rep ₂	0,029636978	2,935778466	0,02490824	S ₂ AG ₂ Rep ₂	0,029880968	2,935778466	0,035418639
S ₁ AG ₂ Rep ₃	0,029636978	2,974209891	0,024586387	S ₂ AG ₂ Rep ₃	0,029880968	2,974209891	0,034960975
S ₁ AG ₃ Rep ₁	0,024789535	2,331349442	0,020017384	S ₂ AG ₃ Rep ₁	0,024976129	2,331349442	0,028450734
S ₁ AG ₃ Rep ₂	0,024720975	2,327613642	0,020012527	S ₂ AG ₃ Rep ₂	0,025013633	2,327613642	0,028524917
S ₁ AG ₃ Rep ₃	0,024744177	2,353653180	0,019803501	S ₂ AG ₃ Rep ₃	0,025013633	2,35365318	0,028209332
S ₁ AG ₄ Rep ₁	0,024454406	3,028079619	0,014443588	S ₂ AG ₄ Rep ₁	0,024683989	3,028079619	0,020553963
S ₁ AG ₄ Rep ₂	0,024415639	3,049788668	0,014325616	S ₂ AG ₄ Rep ₂	0,023164886	3,049788668	0,019561538
S ₁ AG ₄ Rep ₃	0,024435375	3,023752880	0,014456751	S ₂ AG ₄ Rep ₃	0,023164886	3,02375288	0,019729971
S ₁ BG ₃ Rep ₁	0,026665839	2,561923790	0,021334473	S ₂ BG ₃ Rep ₁	0,026862289	2,56192379	0,030319504
S ₁ BG ₃ Rep ₂	0,026665839	2,546268384	0,021465645	S ₂ BG ₃ Rep ₂	0,0268426	2,546268384	0,030491011
S ₁ BG ₃ Rep ₃	0,026665839	2,532632568	0,021581217	S ₂ BG ₃ Rep ₃	0,026851917	2,532632568	0,03066227
S ₁ BG ₆ Rep ₁	0,025396573	2,409887918	0,019915984	S ₂ BG ₆ Rep ₁	0,025516405	2,409887918	0,028253984
S ₁ BG ₆ Rep ₂	0,025425000	2,411802463	0,019915021	S ₂ BG ₆ Rep ₂	0,025516405	2,411802463	0,028231555
S ₁ BG ₆ Rep ₃	0,025425000	2,404224274	0,019977794	S ₂ BG ₆ Rep ₃	0,025531795	2,404224274	0,028331928
S ₁ BG ₇ Rep ₁	0,024718604	2,392947591	0,020694448	S ₂ BG ₇ Rep ₁	0,02490657	2,392947591	0,029414547
S ₁ BG ₇ Rep ₂	0,024718604	2,402357698	0,020613387	S ₂ BG ₇ Rep ₂	0,02490657	2,402357698	0,02929933
S ₁ BG ₇ Rep ₃	0,024718604	2,396678080	0,020662237	S ₂ BG ₇ Rep ₃	0,02490657	2,39667808	0,029368763
S ₁ BG ₈ Rep ₁	0,030243964	2,959236109	0,025609026	S ₂ BG ₈ Rep ₁	0,028016134	2,959236109	0,034415523
S ₁ BG ₈ Rep ₂	0,030243964	2,961357756	0,025590678	S ₂ BG ₈ Rep ₂	0,028160473	2,961357756	0,034508886
S ₁ BG ₈ Rep ₃	0,030243964	2,948544522	0,025701885	S ₂ BG ₈ Rep ₃	0,028231096	2,948544522	0,034716772

Anexo 6. Resumen de los resultados de las pruebas para las dos pendientes.