



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 1

Neiva, 19 de Julio de 2021

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s):

MAURICIO DUARTE TORO, con C.C. No. 7692740

JUAN MANUEL SILVA CHAVARRO, con C.C. No. 1083881140

Autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado titulado **TUBERÍA DE DRENAJE AGRÍCOLA EN GUADUA ANGUSTIFOLIA: IMPLICACIONES DE LA RUGOSIDAD DE MANNING EN RODALES DE PITALITO – HUILA**, presentado y aprobado en el año 2021 como requisito para optar al título de Especialista en Estadística,

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.

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

MAURICIO DUARTE TORO

Firma:

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

JUAN MANUEL SILVA CHAVARRO

Firma:

Vigilada Mineducación



**TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: TUBERÍA DE DRENAJE AGRÍCOLA EN GUADUA ANGUSTIFOLIA: IMPLICACIONES DE LA RUGOSIDAD DE MANNING EN RODALES DE PITALITO – HUILA.**

**AUTOR O AUTORES:**

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
DUARTE TORO	MAURICIO
SILVA CHAVARRO	JUAN MANUEL

**DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:**

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
BERNAL CASTRO	EDGAR ANDRES

**ASESOR (ES):**

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
----------------------------	--------------------------

**PARA OPTAR AL TÍTULO DE:** ESPECIALISTA EN ESTADÍSTICA

**FACULTAD:** CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

**PROGRAMA O POSGRADO:** ESPECIALIZACIÓN EN ESTADÍSTICA

**CIUDAD:** Neiva      **AÑO DE PRESENTACIÓN:** 2021      **NÚMERO DE PÁGINAS:** 103

**TIPO DE ILUSTRACIONES** (Marcar con una X):

Diagramas  Fotografías  Grabaciones en discos  Ilustraciones en general  Grabados   
Láminas  Litografías  Mapas  Música impresa  Planos  Retratos  Sin ilustraciones   
Tablas o Cuadros

**SOFTWARE** requerido y/o especializado para la lectura del documento: Visor de archivo pdf.



**MATERIAL ANEXO:** No aplica.

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

**PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:**

**Español**

**inglés**

1. Rugosidad de Manning *Manning's roughness*
2. Guadua angustifolia *Guadua angustifolia*
3. Tubería *Pipe*
4. Drenaje *drainage*

**RESUMEN DEL CONTENIDO:** (Máximo 250 palabras)

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 económica y sustituya materiales convencionales como el PVC, sin ser afectadas las propiedades hidráulicas que éstos poseen. Por tal razón, se analizaron los valores de la rugosidad de Manning en culmos de Guadua angustifolia teniendo en cuenta factores como el caudal, la sección y la zona de ubicación de los rodales. Este estudio se realizó en zona rural del municipio de Pitalito, seleccionando las zonas mediante muestreo no probabilístico por cuotas y por conveniencia, se efectuó la caracterización de culmos basados en las normas técnicas NTC 5726 (2009) y NTC 5727 (2009), el corte y fabricación de las probetas teniendo en cuenta la norma NTC 5525 (2007), la zona de ubicación de los rodales y sección de la Guadua, para finalmente desarrollar las pruebas hidráulicas y obtener la rugosidad "n" de Manning. Los valores encontrados de rugosidad para el caudal oscilan entre 0,108911 y 0,0337272, la sección entre 0,100418 y 0,03560970 y la Zona entre 0,0909607 y 0,0533122.

El diseño estadístico experimental mediante la técnica análisis de varianza ANOVA multifactorial estableció, que para el caudal y sección existe una relación significativa en su influencia sobre la rugosidad n de Manning, mientras, la zona no resultó estadísticamente significativa.

**ABSTRACT:** (Máximo 250 palabras)

Drainage systems represent an increase in land adaptation costs for farmers, for this reason it is important to look for new pipe options that can be more economical and replace conventional materials such as PVC, without affecting the hydraulic properties they have. Therefore, the values of manning roughness in the culmos of Guadua angustifolia were analyzed taking into account such factors as the flow, the section and the area of location of the stands. This study was carried out in the rural area of the municipality of Pitalito, selecting the areas by means of a non-probabilistic sampling by quotas and for convenience, subsequently, the characterization of the sampling culmos was carried out based on the Colombian technical standards



NTC 5726 (2009) and NTC 5727 (2009), the cutting and manufacture of the specimens was carried out considering the NTC 5525 (2007) standard, the location area of the stands and section of the Guadua. The roughness values found for the flow oscillate between 0.108911 and 0.0337272, the section between 0.100418 and 0.03560970 and the Zone between 0.0909607 and 0.0533122.

The experimental statistical design using the multifactorial ANOVA analysis of variance technique established that for the flow and section factors there is a significant relationship in their influence on manning's roughness  $n$ , while the zone factor was not statistically significant.

### APROBACION DE LA TESIS

Nombre Jurado: JAIME POLANIA PERDOMO

Firma:

Nombre Jurado: JUAN FELIPE VARGAS CALDERÓN

Firma:

**TUBERÍA DE DRENAJE AGRÍCOLA EN *GUADUA ANGUSTIFOLIA*: IMPLICACIONES  
DE LA RUGOSIDAD DE MANNING EN RODALES DE PITALITO – HUILA.**

**MAURICIO DUARTE TORO Cód. 20202191031**

**JUAN MANUEL SILVA CHAVARRO Cód. 20202191033**

**Director:**

**Mg. EDGAR ANDRES BERNAL**

**Trabajo de grado presentado para obtener el título:**

**ESPECIALISTA EN ESTADÍSTICA**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA**

**FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES**

**ESPECIALIZACIÓN EN ESTADÍSTICA**

**2021**

**FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES**  
**ESPECIALIZACIÓN EN ESTADÍSTICA**

*CARTA DE ACEPTACIÓN*

En calidad de Coordinador del Posgrado Especialización en Estadística, programa reconocido por el Ministerio de Educación Nacional mediante Resolución de Registro Calificado No. 3683 del 2 de marzo de 2018 y adscrito a la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad Surcolombiana, me permito informar que el trabajo de investigación titulado: **“TUBERÍA DE DRENAJE AGRÍCOLA EN GUADUA ANGUSTIFOLIA: IMPLICACIONES DE LA RUGOSIDAD DE MANNING EN RODALES DE PITALITO - HUILA”** presentado por los estudiantes Mauricio Duarte Toro y Juan Manuel Silva Chavarro; es **ACEPTADO** como trabajo de grado para optar el título de Especialista en Estadística.

Para constancia se firma en la Ciudad de Neiva, a los doce (12) días del mes de julio del año 2021.



**JAIME POLANÍA PERDOMO**  
Coordinador

## AGRADECIMIENTOS

*Agradecemos infinitamente a Dios por permitirnos ser lo que somos, por ser nuestro apoyo en los momentos más difíciles y por no desampararnos.*

*A nuestras familias, amigos, compañeros y docentes por todas las experiencias vividas, por hacer parte de este proyecto.*

*Nuestros sinceros agradecimientos al director del proyecto EDGAR ANDRES BERNAL por su apoyo profesional e incondicional, por su mirada ética al impulso de éste trabajo.*

*A los docentes JAIME POLANÍA PERDOMO y LEONARDO FABIO MEDINA CRUZ, por sus asesorías prestadas en los cursos Investigación I y II.*

*A los integrantes del semillero de investigación SIINACRUS adscrito a grupo de investigación CONSTRU-USCO, Julián Fernando Molina Gordillo, Liliana Andrea Carantón García, Jesús Erney Carrillo y Seidy Yadira Vidal, y a los estudiantes Luís Miguel Burbano Ibarra y Anyi Vanesa Claros Ortiz, por su colaboración en el desarrollo de este proyecto.*

*A los profesores de la sede regional Pitalito de la Universidad Surcolombiana Jhon Jairo Beltrán y Édison Mujica Rodríguez por su acompañamiento durante el proyecto.*

## RESUMEN

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 económica y sustituya materiales convencionales como el PVC, sin ser afectadas las propiedades hidráulicas que éstos poseen. Por tal razón, se analizaron los valores de la rugosidad de Manning en culmos de *Guadua angustifolia* teniendo en cuenta factores como el caudal, la sección y la zona de ubicación de los rodales. Se validó la alternativa de tubería de drenaje agrícola y, por consiguiente, poder desarrollar diseños de sistemas drenajes eficientes hidráulica, económica y ambientalmente. Este estudio se realizó en zona rural del municipio de Pitalito, valle de Laboyos, seleccionando las zonas mediante un muestreo no probabilístico por cuotas y por conveniencia, posteriormente, se efectuó la caracterización de los culmos de muestreo basados en las normas técnicas colombianas NTC 5726 (2009) y NTC 5727 (2009). Luego se efectuó el corte y fabricación de las probetas teniendo en cuenta la norma NTC 5525 (2007), la zona de ubicación de los rodales y sección de la *Guadua*. Posteriormente, se desarrollaron las pruebas hidráulicas y así, se obtuvo la rugosidad “n” de Manning utilizando un modelo físico denominado banco hidráulico y estableciendo el caudal transportado por la tubería de drenaje agrícola. Los valores encontrados de rugosidad para el factor caudal oscilan entre 0,108911 y 0,0337272, el factor sección entre 0,100418 y 0,03560970 y el factor Zona entre 0,0909607y 0,0533122. Con base a lo anterior, la rugosidad de Manning para tubería de drenaje agrícola en *Guadua angustifolia* arrojó un valor promedio de 0,07192, con un máximo de 0,21970 y mínimo de 0,0116.

El diseño estadístico experimental mediante la técnica análisis de varianza ANOVA multifactorial estableció, que para los factores caudal y sección existe una relación significativa en su influencia sobre la rugosidad n de Manning, mientras, el factor zona no resultó estadísticamente significativo. En este sentido, la investigación desarrollada permite referenciar

valores de la rugosidad  $n$  de Manning teniendo en cuenta la sección de la *Guadua angustifolia* y el caudal máximo indispensables para el diseño de sistemas de drenaje agrícola.

*Palabras claves: Rugosidad de Manning, Guadua angustifolia, tubería, drenaje.*

## ABSTRACT

Drainage systems represent an increase in land adaptation costs for farmers, for this reason it is important to look for new pipe options that can be more economical and replace conventional materials such as PVC, without affecting the hydraulic properties they have. Therefore, the values of Manning roughness in the culmos of *Guadua angustifolia* were analyzed taking into account such factors as the flow, the section and the area of location of the stands. The agricultural drainage pipe alternative was validated and, consequently, being able to develop hydraulically, economically and environmentally efficient drainage system designs. This study was carried out in the rural area of the municipality of Pitalito, Laboyos Valley, selecting the areas by means of a non-probabilistic sampling by quotas and for convenience, subsequently, the characterization of the sampling culmos was carried out based on the Colombian technical standards NTC 5726 (2009) and NTC 5727 (2009). Then the cutting and manufacture of the specimens was carried out considering the NTC 5525 (2007) standard, the location area of the stands and section of the *Guadua*. Subsequently, hydraulic tests were developed and thus, Manning's "n" roughness was obtained using a physical model called hydraulic bench and establishing the flow carried by the agricultural drainage pipe. The roughness values found for the flow factor oscillate between 0.108911 and 0.0337272, the section factor between 0.100418 and 0.03560970 and the Zone factor between 0.0909607 and 0.0533122. Based on the above, Manning roughness for agricultural drainage pipe in *Guadua angustifolia* yielded an average value of 0.07192, with a maximum of 0.21970 and minimum of 0.0116.

The experimental statistical design using the multifactorial ANOVA analysis of variance technique established that for the flow and section factors there is a significant relationship in their influence on Manning's roughness n, while the zone factor was not statistically significant. In this sense, the research developed allows to reference values of the roughness n of Manning taking

into account the section of the *Guadua angustifolia* and the maximum flow indispensable for the design of agricultural drainage systems.

*Keywords: Manning's roughness, Guadua angustifolia, pipe, drainage.*

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN .....	4
ABSTRACT .....	6
INTRODUCCIÓN .....	14
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	16
2. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO .....	19
2.1 Antecedentes .....	19
2.1.1 Reseña Histórica.....	21
2.2 Drenaje .....	23
2.2.1 Sistema de drenaje .....	23
2.2.2 Tipos de drenaje .....	24
2.3 Drenaje Agrícola .....	25
2.3.1 Factores importantes en los Drenajes Agrícolas .....	25
2.3.2 Tubería para Drenaje Agrícola .....	27
2.4 El Coeficiente de Manning “n” .....	29
2.5 <i>Guadua angustifolia</i> .....	30
2.5.1 Taxonomía y Anatomía.....	30
2.5.2 Morfología.....	31
2.6 Diseño Estadístico de Experimentos .....	34
2.6.1 Estadística Inferencial .....	36
2.6.2 Diseño Factorial Multinivel .....	36

2.6.3	Contraste de Hipótesis.....	36
3.	Objetivos.....	38
3.1	Objetivo General .....	38
3.2	Objetivos Específicos .....	38
4.	Justificación .....	39
5.	Hipótesis y variables .....	41
5.1	Hipótesis .....	41
5.2	Variables .....	41
6.	Glosario .....	42
7.	Alcances y limitaciones.....	44
7.1	Alcances .....	44
7.2	Limitaciones: .....	44
8.	Diseño Metodológico .....	45
8.1	Enfoque de investigación .....	45
8.2	Población de estudio.....	45
8.3	Muestra .....	46
8.4	Instrumentos y materiales .....	53
8.5	Proceso de recolección de los datos .....	54
8.5.1	Caracterización física de las probetas.....	55
8.5.2	Estadística descriptiva caracterización de probetas .....	56
8.5.3	Cálculo de n de Manning .....	61

9.	Resultados.....	65
9.1	Estimación de la rugosidad de Manning respecto al Caudal.....	65
9.2	Estimación de la rugosidad de Manning respecto a la sección.....	67
9.3	Estimación de la rugosidad de Manning respecto a la Zona.....	68
9.4	Interacción entre factores: caudal, sección del culmo y zona de ubicación .....	71
9.4.1	Prueba de múltiples rangos para el caudal .....	73
9.4.2	Prueba de múltiples rangos para el factor sección .....	73
9.4.3	Prueba de múltiples rangos para la zona .....	74
9.5	Discusión sobre Rugosidad de Manning respecto a los factores .....	74
9.6	Comparación de medias entre los factores Caudal y Sección .....	76
10.	Conclusiones .....	77
11.	Recomendaciones .....	78
12.	Referencias bibliográficas .....	79

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Valores del Coeficiente $n$ de Manning en diferentes materiales. ....	20
Tabla 2. Factores del suelo y capacidad de drenaje. ....	26
Tabla 3. Rodales seleccionados por zona. ....	47
Tabla 4. Caracterización de culmos. ....	49
Tabla 5. Rotulado de probetas. ....	51
Tabla 6. Caracterización de las probetas con base a la Norma "NTC 5525" (2013). ....	55
Tabla 7. Diámetro exterior. ....	57
Tabla 8. Distancia entre nudos por sección y total. ....	59
Tabla 9. Espesor de la pared de la <i>Guadua</i> por sección y total. ....	60
Tabla 10. Cálculo de la Rugosidad de Manning. ....	63
Tabla 11. Clasificación de $n$ de Manning según los factores zona, sección y caudal con niveles correspondientes. ....	64
Tabla 12. Rugosidad $n$ de Manning según el caudal. ....	65
Tabla 13. Intervalos de confianza de la rugosidad $n$ de Manning para el Caudal. ....	66
Tabla 14. Rugosidad $n$ de Manning según la sección. ....	67
Tabla 15. Intervalos de confianza para la media rugosidad $n$ de Manning según la sección. ....	68
Tabla 16. Rugosidad $n$ de Manning según la Zona. ....	69
Tabla 17. Intervalos de confianza para la media rugosidad $n$ de Manning según la zona. ....	70
Tabla 18. Análisis de Varianza para $\log n$ -Manning - Suma de Cuadrados Tipo II. ....	72
Tabla 19. Comparaciones por par entre medias estimadas para el caudal. ....	73
Tabla 20. Comparaciones por par entre medias estimadas para la sección. ....	74
Tabla 21. Comparaciones por par entre medias estimadas para la Zona. ....	74

Tabla 22. Estadístico de prueba HSD tukey para los niveles de factores caudal y sección.

.....76

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Taxonomía de la <i>Guadua angustifolia</i> .....	32
Figura 2. Partes de la <i>Guadua angustifolia</i> .....	33
Figura 3. Referenciación de la zona de estudio mediante Google Earth.....	46
Figura 4. Selección de rodales teniendo en cuenta la zona de ubicación. ....	47
Figura 5. Corte de culmos en rodales y avinagrado.....	50
Figura 6. Secciones cortadas de los culmos.....	50
Figura 7. Lavado de culmos y corte de probetas de acuerdo a la sección.....	51
Figura 8. Perforación de tabique transversal y banco de perforación. ....	52
Figura 9. Diagrama de orificios en probetas. ....	53
Figura 10. Marcación y perforación de orificios en probetas. ....	53
Figura 11. Banco hidráulico para la medición de caudales. ....	54
Figura 12. Diagrama de cajas y bigotes para Diámetro exterior respecto a la sección ..	57
Figura 13. Diagrama de cajas y bigotes para distancia entre nudos respecto a la sección .....	59
Figura 14. Diagrama de cajas y bigotes para Espesor respecto a la sección .....	61
Figura 15. Radio hidráulico “R” y Tirante “y” .....	62
Figura 16. Gráfico de caja y bigotes de la variable Caudal .....	66
Figura 17. Gráfico de caja y bigotes de la variable Sección.....	68
Figura 18. Gráfico de caja y bigotes de la variable Zona .....	70

## INTRODUCCIÓN

La adecuación de tierras juega un papel importante en la transformación del suelo, con el propósito de obtener condiciones favorables para los cultivos. En la actualidad se propende por encontrar materiales amigables con el medio ambiente, que sean sostenibles y posean características técnicas similares o mejores a los materiales convencionales (Yannopoulos et al., 2020).

En zonas con altas precipitaciones durante el año y terrenos con alta resistencia al movimiento del agua, tanto externa como internamente en el perfil del suelo, es necesario implementar acciones que permitan corregir los problemas de drenaje. De acuerdo con el documento, “*Ruta de cambio Pitalito 2030: consistente y comprometido con el cambio climático*” (Alcaldía de Pitalito et al., 2015), se estima que el municipio de Pitalito en su valle presenta una precipitación entre los 1200 y 1600 mm al año, por lo tanto, la precipitación es considerada significativa, incluso durante el mes más seco. Además, el valle del municipio posee dificultades de drenaje por tener suelos con poca capacidad de evacuar el agua proveniente de riegos y precipitaciones, lo que hace necesario la implementación de sistemas de drenaje agrícola.

Las propiedades hidráulicas de la tubería son un factor determinante para elegir el material de diseño en un sistema de drenaje, además, permiten conocer las características y el comportamiento del material al paso de un fluido (Pizarro, 1975). La *Guadua angustifolia* es una especie vegetal nativa que se desarrolla muy bien en la zona sur en el departamento del Huila por las condiciones agroecológicas (Duarte T et al., 2015), en este sentido, lo que se pretende con este material vegetal es que pueda ser aplicado como alternativa económica, con propiedades hidráulicas estimadas y con gran disponibilidad en la zona para la transformación en tubería de drenaje agrícola, gracias a su morfología, tallo hueco y circular, adquiriendo forma de tubo.

Para que este material pueda cumplir condiciones de tubería de drenaje hay que determinar características hidráulicas, una de ellas es el factor de rugosidad  $n$  de Manning. Por consiguiente, se planteó el estudio para determinar las implicaciones en la variación de la rugosidad con respecto a factores: caudal, sección de la *Guadua angustifolia* y la zona de ubicación de los rodales.

Se seleccionó las zonas mediante un muestreo no probabilístico por cuotas y por conveniencia; posteriormente, se efectuó la caracterización física de los culmos, se efectuó el corte y fabricación de las probetas teniendo en cuenta la zona de ubicación de los rodales y sección de la *Guadua*. Por último, se desarrollaron las pruebas hidráulicas, obteniendo la rugosidad “ $n$ ” de Manning, con valores para el factor caudal entre 0,108911 y 0,0337272; para el factor sección entre 0,100418 y 0,03560970 y respecto al factor zona entre 0,0909607 y 0,0533122.

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la Agricultura tradicional es fundamental contar con suelos aptos para el desarrollo de las plantaciones. La adecuación de tierras juega un papel importante en la transformación del suelo, con el propósito de obtener condiciones favorables para los cultivos (FAO & GTIS, 2016). El mundo actual propende por encontrar materiales amigables con el medio ambiente, que sean sostenibles y posean características técnicas similares o mejores a los materiales convencionales (Yannopoulos et al., 2020).

En zonas con altas precipitaciones durante el año y terrenos con alta resistencia al movimiento del agua, tanto externa como internamente en el perfil del suelo, es necesario implementar acciones que permitan corregir los problemas de drenaje (Pizarro, 1975). En este sentido, se hace necesario mitigar los niveles freáticos someros, los altos niveles de salinidad en el suelo, atacar la formación de enfermedades fungosas, impedir la disminución en la actividad biológica, frenar la degradación de la estructura del suelo, la poca fertilidad y la baja relación aire-agua, mantener el acceso a las parcelas para realizar las labores y la recolección de la cosecha, entre otras (Polón Pérez et al., 2011). De acuerdo con el documento, *Ruta de cambio Pitalito 2030: consistente y comprometido con el cambio climático* (Alcaldía de Pitalito et al., 2015), se estima que el municipio de Pitalito en su valle presenta una precipitación entre los 1200 y 1600 mm al año, por lo tanto, la precipitación es considerada significativa, incluso durante el mes más seco. Además, el valle del municipio posee dificultades de drenaje por tener suelos con poca capacidad de evacuar el agua proveniente de riegos y precipitaciones, lo que hace 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.

La implementación de sistemas de drenaje representa un incremento en los costos de adecuación de tierras para los cultivadores, modifica las condiciones agroecológicas y requiere

la aplicación de técnicas y materiales científicamente validados (Cortez et al., 2016). Dichos sistemas para mitigar los problemas de drenaje se han venido desarrollando con materiales convencionales, sin embargo, es importante la búsqueda de nuevas opciones de tubería que posea propiedades hidráulicas favorables, sustituya materiales convencionales como el PVC, sea amigable con el medio ambiente, que pueda ser más económica y a la vez, se convierta en un ingreso adicional para los empresarios del campo que poseen rodales.

Las propiedades hidráulicas de la tubería son un factor determinante para elegir el material de diseño en un sistema de drenaje, además, permiten conocer las características y el comportamiento del material al paso de un fluido. Sin embargo, los estudios de nuevos materiales se han concentrado en materiales como el polietileno de alta densidad, el concreto y la combinación entre los mismos con el fin de mejorar las propiedades hidráulicas, y por el contrario no han contemplado el uso de materiales vegetales para la construcción y diseño de tuberías de drenaje (García J, 2019).

Para que la *Guadua angustifolia* pueda cumplir condiciones de tubería de drenaje hay que determinar características hidráulicas, una de ellas es el factor de rugosidad  $n$  de Manning. Dentro de los estudios adelantados en esta área, Monge et al (2019) desarrolló una investigación entorno a determinar el coeficiente rugosidad de Manning en tubería de Bambú a flujo lleno obteniendo el coeficiente de rugosidad de Manning de 0,0232 y Cruz (2019) indagó sobre los accesorios que podrían diseñarse para adaptar el bambú a un sistema presurizado.

Actualmente no existe ningún tipo de estudio donde se determine la rugosidad de Manning utilizando la *Guadua* como tubería de drenaje. Por otra parte, la *Guadua* al ser una especie vegetal que se desarrolla naturalmente, presenta variaciones en su morfología (sección y zona de ubicación) que podrían afectar los valores de la rugosidad  $n$  de Manning.

Por lo tanto, surge la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo afectaría el caudal, la sección y la zona de la ubicación geográfica del rodal la rugosidad de Manning y que implicaciones hidráulicas tiene en tubería de drenaje de *Guadua angustifolia* en la zona rural del municipio de Pitalito?

## 2. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO

### 2.1 Antecedentes

El Concrete Pipe Association of Australasia (1997), describe la importancia de los coeficientes de rugosidad en el cálculo de la capacidad hidráulica y el cálculo del diámetro de las tuberías. Actualmente, las ecuaciones más utilizadas para el cálculo del coeficiente de rugosidad se encuentran Hazen-Williams, Manning y Colebrook-White.

En la reseña realizada por la Cátedra de ingeniería Sanitaria y Ambiental del Departamento de Ingeniería Hidráulica de la Universidad Politécnica de Valencia (Ferrer y Jiménez,1998), se determinó el coeficiente de rugosidad aplicable a tuberías de hormigón prefabricadas en la Asociación de Fabricantes de Tubos de Hormigón Armado (ATHA), para la aplicación, diseño, cálculo y ejecución de las obras de redes de saneamiento en cualquier punto de la geografía española. En el informe concluyen y recomiendan la utilización como coeficiente de rugosidad “n” de Manning, el valor de 0,012. Sin embargo, sugieren que este valor debería someterse a consideración en casos puntuales en función de las características de diseño del colector y utilizar un factor de seguridad adicional.

La Asociación Nacional de la Industria del Prefabricado de Hormigón (ANDECE), en el *“informe técnico acerca del Cálculo hidráulico en sistemas de saneamiento Coeficiente de rugosidad”*, plasman que para el cálculo real de las pérdidas de energía en la tubería, además de tener en cuenta la rugosidad, hay que observar otras tales como las uniones, las válvulas, cambios de sección de la tubería y lo relacionado con los establecimientos de sedimentos que con el tiempo se pueden producir en el interior de la tubería y que en últimas terminarían afectando la vida útil de la tubería de drenaje (ANDECE, s.f.). Además, presentan valores recomendados del coeficiente de Manning planteados por la ACPA (American Concrete Pipe Association), para distintos materiales, donde se muestran las diferencias entre los valores obtenidos a nivel de laboratorio y los valores recomendados para el diseño y proyecto. (Ver tabla 1).

**Tabla 1. Valores del Coeficiente n de Manning en diferentes materiales.**

Tubería	"n" laboratorio	"n" diseño recomendado
Hormigón	0,009-0,011	Red de alcantarillado: 0,011 - 0,012 Red A. residual: 0,012-0,013
HDPE (High Density Polyethylene)	0,009-0,015	Red de alcantarillado: 0,012-0,020
PVC	0,009-0,011	Red de alcantarillado/Red A. residual: 0,011-0,013
Corrugada	0,012-0,030	0,021-0,029

Fuente: Elaboración propia con base en ANDECE (s.f.).

Cortez et al. (2016) en el informe final PROYECTO "ESTUDIO DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE TUBERÍAS ETAPA II" y cuyo objetivo era continuar con los estudios experimentales acerca de los coeficientes de rugosidad de tuberías, ya sea a presión y a superficie libre, en especial para tuberías de PVC y PEAD (tubería de polietileno de alta densidad) para alcantarillado, concluyeron lo siguiente:

a. La n de Manning no se debe tomar como constante que es lo que realmente se hace en la práctica, sino que depende de variables propias del flujo como son el Número de Reynolds.

b. La n de Manning a tubo lleno (sin presión) depende del diámetro, aumentando para los diámetros mayores.

Araya et al. (2018), planteron el análisis de variación del coeficiente de rugosidad de Manning del canal cerrado de tubería de PVC con respecto a la pendiente, en el cual, se obtuvo variación del número de Manning en relación al perímetro mojado, y por ende a la profundidad del flujo, Asimismo, demostraron que la pendiente no es una variable que afecte al coeficiente de rugosidad de Manning de la tubería en PVC de 315 mm de diámetro.

García (2019) plantea considerar las capacidades propias del Tubo de Hormigón Armado, entre ellas, la alta resistencia mecánica y el trabajo en suelos con altos niveles freáticos, con un revestimiento interno de polietileno de alta densidad PEAD, producto de alta calidad y amigable con el medio ambiente, para uso en drenaje urbano que permite proteger al hormigón de los ataques corrosivos y optimizará en un 30% las características mecánicas e hidráulicas de la tubería.

Una vez revisado los estudios concernientes a tuberías para drenaje (sanitario y/o agrícola) en materiales como el concreto y el plástico, se procede a mostrar los muy pocos estudios que se han hecho a la *Guadua angustifolia* como tubería a presión, especialmente para tubería en sistemas de acueducto y riego.

Monge et al. (2019) encontró que el valor en el bambú del coeficiente de rugosidad de Manning, es de  $n = 0.0232$ .

### **2.1.1 Reseña Histórica**

De acuerdo con Cisneros (2003), el término drenaje no fue concebido sino hasta el siglo XIX, a pesar de esto, existían trabajos relevantes sobre evacuación de aguas en el Medio Oriente y Asia muchos siglos atrás. Ejemplo de ello, es el control del agua en los ríos Éufrates (Mesopotamia) y Nilo (Egipto), ríos Amarillo y Azul en China.

Yannopoulos et al. (2020), presentan una recopilación de la evolución de los materiales básicos de drenaje subsuperficial (tubería y envolventes), como también lo relacionado con las técnicas de instalación que a través de la historia de la humanidad se ha venido desarrollando. Además, muestran como desde la época del imperio romano, varios escritores ya habían plasmado epístolas relacionados con el drenaje de tierras, citan a Marco Porcius Cato (234 a.C.-149 a.C.) y su escrito "De Agricultura" y a Marcus Terentius Varo (116 a.C.-28 a.C.) con su escrito "Rerum Rusticarum Libri Tres".

Van Schilfgaarde (1971) ilustra que el drenaje agrícola tuvo su aparición por primera vez en la Mesopotamia, hace unos 9000 años, donde las tuberías eran aun inexistentes. Stuyt et al. (2005) describen que probablemente los primeros drenajes estaban constituidos por materiales como la grava, piedra, sustancias permeables como pequeños árboles o arbustos.

Nijland et al. (2005) expresaron que alrededor del año 400 a.C. fueron utilizados listones de bambú con agujeros como desagües en la antigua China, evidenciando desde hace mucho tiempo, como el uso del bambú y su morfología era tomada en cuenta como tubería, y en el caso particular como tubería de desagüe o drenaje.

Durante muchos años se pudieron haber utilizado muchos materiales, pero como tubería, sólo hasta el siglo XIX se empezó a implementar en la mayoría de los drenajes, tuberías de arcilla cocida, hormigón y madera.

Dentro de las formas más antigua de tuberías en arcilla utilizadas para el drenaje, era la teja en forma de herradura, su lado abierto se colocaba hacia abajo quedando una forma de túnel, no se utilizaba nada en el fondo, lo cual facilitaba que el agua corriera libremente en contacto directo con el suelo. No obstante, esta forma trajo muchos inconvenientes por el arrastre de partículas que se producía en el suelo, presentado socavación en el terreno y por ende al sistema de drenaje. Para solucionar este inconveniente, se colocaron sobre el piso de la teja una pieza plana de arcilla cocida, con un ancho un poco mayor a la teja, esto con el fin de poder estabilizar el suelo del fondo y simular un conducto cerrado, mejorando el transporte del agua y evitando el arrastre de partículas. Los tubos de arcilla cilíndricos, fueron fabricados por John Reade en Inglaterra en 1810; hechos a mano representando una mejora considerable respecto a los tubos en forma de herradura (Beauchamp, 1987).

En 1845 es la fecha considerada como el punto de inflexión en la construcción de tuberías de drenaje, cuando el Inglés Thomas Scragg inventó una máquina de extrusión que producía tubos redondos de arcilla rápidamente, reduciendo significativamente los costos de fabricación (Beauchamp, 1987). Lo anterior popularizó el uso de la tubería en arcilla en todo el mundo.

A partir de la invención del cemento y a su industrialización a finales del siglo XIX se popularizó el uso de tuberías de hormigón, con la implementación de máquinas que se encargaban de fabricar tubos con diámetros que oscilaban entre 2" a 24" (Davidson, 1913).

A mediados del siglo XX, con la aparición del plástico y fibras bituminosas, surgieron las tuberías de plástico (Nijland et al., 2005); en especial en 1963 con la aparición de la tubería de plástico corrugado, reemplazando las tuberías de hormigón y de arcilla (Stuyt et al., 2005). En la actualidad las tuberías de plástico están hechas de PVC (Policloruro de Vinilo), HDPE (Polietileno de alta densidad) y PP (Polipropileno) (Vlotman et al., 2000) (Nijland et al., 2005).

En Colombia la empresa PAVCO, es un referente en la fabricación de tuberías corrugadas para drenaje agrícola, teniendo como ventajas su bajo peso (facilitando su transporte e instalación), irrompibles y resistentes a la corrosión, y a los ataques de los agroquímicos, permitiendo su uso en cualquier tipo de suelo, desde arcillas pesadas como en suelos con alto contenido de materia orgánica. Comercialmente se cuentan con diámetros de 65mm (2<sup>1/2</sup>"), 100 mm (4"), 160 mm (6") y 200 mm (8") (PAVCO, 2005).

## **2.2 Drenaje**

El drenaje usualmente significa eliminar o remover de los excesos de un líquido (Villón Béjar, 2006). Dichos excesos se presentan en muchos campos como por ejemplo el drenaje urbano, de vías, de campos deportivos, drenaje quirúrgico, drenajes naturales, entre otros (Valipour et al., 2020). En relación con lo planteado, Pérez y Gardey (2009) establecen que el término *drenaje* hace referencia a la acción y efecto de drenar, es decir asegurar la salida de la excesiva humedad por medio de ductos, cañerías o zanjas. Sin embargo, para este trabajo se enfoca en el drenaje agrícola.

### **2.2.1 Sistema de drenaje**

El drenaje de tierras y en especial a nivel agrícola, se encuentra enmarcado en varios objetivos, en primer lugar, la eliminación del exceso de agua en la tierra, ya sea por niveles freáticos altos que hacen que el agua aflore a la superficie o por excesiva precipitación, sumadas a condiciones de suelo con elevado contenido de arcillas conllevando a que se produzcan encharcamientos; en segundo lugar, mantener la parte del suelo importante para el crecimiento radicular libre del exceso de agua, facilitando la aireación y por ende mejorando los procesos fisiológicos de los cultivos y en tercer lugar, facilitar la eliminación de altos contenidos de sales en suelos mediante la aplicación de riego, entre otros (Pizarro, 1975) (FAO, 2020).

La consecución de dichos objetivos conlleva a construir una infraestructura robusta y diseñada acorde a las necesidades, por consiguiente, es importante contar con varios tipos de drenes que realizan las acciones de recolectar, transportar y evacuar los excesos de humedad

que se convierten en dificultades a la hora de desarrollar proyectos agrícolas, de infraestructura y demás (Pizarro, 1975) (FAO, 2020) (Jaramillo, 2010).

Actualmente, existen tres tipos de drenes, los laterales, los colectores y el dren principal. Este conjunto tiene la misión de garantizar el balance óptimo de humedad en el suelo y eliminar el exceso de agua perjudicial para el desarrollo de las plantas (Ortega y Sagaldo, 2001).

### **2.2.2 Tipos de drenaje**

**Drenajes Superficiales o Abiertos:** El drenaje superficial se le conoce como escurrimiento y se caracteriza por el movimiento del agua en la superficie del suelo. El drenaje superficial tiene como finalidad la remoción del exceso de agua sobre la superficie del terreno y consiste en un sistema de canales a una profundidad establecida que recoge la escorrentía y la descarga a drenes colectores hasta la disposición establecida (Leitón, 1985).

**Drenajes Subsuperficiales o Cerrados:** Cuando se habla del drenaje de tierras a nivel subsuperficial, hay que definir tres elementos esenciales que son: la tubería, el envolvente (filtro) y el diseño del sistema. El drenaje subsuperficial está determinado por el movimiento del agua al interior del suelo e influenciado por las características físicas del perfil, entre ellas la textura y estructura.

El drenaje subsuperficial es eficaz no solo para controlar la profundidad del nivel freático sino también para aliviar la salinización del suelo (Qian et al., 2020). Un suelo no tiene drenaje subsuperficial cuando el agua no penetra el suelo y permanece inundado un largo período. Las precipitaciones con lámina diaria mayor a cien milímetros origina dichas inundaciones de la capa superficial del suelo en los meses de mayor lluvia (Aguirre, 2009), no obstante, el agua en el suelo y la formación de freáticas superficiales, también, pueden tener otros orígenes, entre los cuales se pueden mencionar, la generada directamente en el lugar, la procedente 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 (Liota, 2012).

Drenes Mixtos: Un sistema de drenaje subsuperficial contempla los principios adelantados tanto por un drenaje superficial como por uno subterráneo, por lo tanto, tiene como objetivo controlar la elevación del nivel freático, permitiendo que las condiciones agrológicas sean óptimas para el desarrollo del cultivo. Para lo anterior, se deben realizar la construcción de canales y/o 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). Es decir, que la infraestructura de adecuación puede tener los dos tipos de drenaje combinados. Esto depende del diseño de drenaje, las condiciones topográficas, las propiedades físicas y químicas del suelo, los costos de adecuación y mantenimiento, entre otros.

### **2.3 Drenaje Agrícola**

El Departamento de Agricultura de los Estados Unidos U.S.D.A., en español, define el drenaje agrícola como la eliminación y disposición del exceso de agua de las tierras (U.S.D.A., 1971).

El drenaje agrícola tiene como objetivo, desalojar o retirar los excedentes de agua en un tiempo adecuado. Con el propósito de asegurar un contenido de humedad apropiado en la zona radicular de las plantas, conseguir su óptimo desarrollo, mantener las condiciones de aireación, conservar la actividad biológica y el permitir el acceso de nutrientes que garanticen una adecuada producción (Llerana et al., 2017), (Jaramillo, 2010) (Liota, 2012). Igualmente, al eliminar las condiciones deficientes de drenaje, se contribuye a minimizar en gran medida las posibilidades de ataques a las plantas por enfermedades y plagas (Polón Pérez et al., 2011).

#### **2.3.1 Factores importantes en los Drenajes Agrícolas**

En el drenaje agrícola se deben tener en cuenta diferentes factores que son importantes para el suelo, los cultivos, el ambiente y los productores. Ortega y Sagaldo (2001) en la Tabla 2, plantean algunos factores a tener en cuenta en suelos bien o mal drenados.

**Tabla 2. Factores del suelo y capacidad de drenaje.**

<b>Factor</b>	<b>Suelo bien drenado</b>	<b>Suelo mal drenado</b>
<b>Aireación del suelo</b>	15 – 10 % oxígeno	Menos del 5 % de oxígeno
<b>Temperatura del suelo</b>	Normal	1 a 5 °C más baja
<b>Disponibilidad de nutrientes</b>	Normal	Escasa a nula
<b>Trabajabilidad y capacidad de soporte del suelo</b>	Soporta peso sin destrucción de su estructura, ni compactación.	Se destruye la estructura del suelo y este se compacta fácilmente
<b>Mecanización</b>	Preparación de suelos optima en calidad y oportunidad	Deficiente preparación del suelo y con retraso
<b>Problemas sanitarios</b>	Normales	Se acentúan problemas en plantas, animales y humanos.
<b>Daños a infraestructura</b>	Mejor mantención	Mayor daño y menor vida útil (Ej.: caminos)

Adaptado y tomado de Ortega y Salgado, 2001 (p.9).

De igual manera, el buen drenaje es básico en la agricultura, praderas y cultivos, puesto que mejoran las condiciones del suelo y aumentan sus rendimientos cuando existe el control del nivel freático (PAVCO, 2005).

Pizarro (1975) principalmente destaca la influencia del mal drenaje sobre las propiedades físicas del suelo (aireación, estructura, permeabilidad, textura y temperatura) y en el índice de salinidad en el suelo. Simultáneamente, en concordancia con Ortega y Salgado (2001) y Tenorio (1992) menciona que el deficiente drenaje en los suelos contribuye a la disminución de la aireación en la zona de raíces, el nivel de oxígeno se reduce y aumenta el CO<sub>2</sub>. 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. El mal drenaje interno y la conductividad hidráulica extremadamente lenta llevan a condiciones de encharcamiento y a su vez retardo en la plantación (FAO, 2020). Los anteriores factores son importantes como conjunto. El mitigar los efectos que impactan negativamente el terreno, el medio ambiente, la infraestructura agrícola y el desarrollo de los cultivos es fundamental para el uso potencial del suelo, evitando que por problemas de drenaje se opte 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.

### **2.3.2 Tubería para Drenaje Agrícola**

Las tuberías de drenaje se encuentran disponibles en diversos materiales, como la arcilla, el hormigón y el plástico (corrugado o liso).

#### **2.3.2.1 Tubería de arcilla**

La tubería de cerámica o arcilla puede ser porosa o vidriada. Los diámetros internos de tubería de drenaje comercialmente se encuentran entre 5 y 20 cm. El espesor de la pared del tubo varía entre 1,2 y 2,4 mm. Los tubos de cerámica estándar tienen una longitud de 3 o 3,3 m, sin embargo, existen tubos de mayor longitud dependiendo del lugar de fabricación. Entre las ventajas que presenta la tubería de cerámica es la durabilidad y resistencia a alterarse, y deteriorarse en suelos agresivos, además, es más liviana que las de concreto, no obstante, es bastante frágil, por tanto, se debe manipular con mucho cuidado (FAO, 2009)

#### **2.3.2.2 Tubería de hormigón**

La fabricación del tubo de hormigón o concreto es más sencilla que el de cerámica. Los materiales utilizados en las tuberías de hormigón son cemento, agua, áridos, aditivos, adiciones, hormigón y armadura (Ministerio de Fomento et al., 2005). Los materiales usados para deben cumplir con las especificaciones establecidas en la normatividad de cada país.

Los tubos de concreto se clasifican en tubos sin armadura y tubos con armadura. La armadura hace referencia al refuerzo en hierro que se la incluye o no al tubo de concreto que depende el diámetro, longitud y propiedades físicas.

La tubería de hormigón o concreto especialmente se usan en tamaños medianos o grandes. En el mercado se encuentran tubos de diámetro de 0,3; 1,00; 1,50 y 2,00 metros y longitudes de 0,60; 0,91; 1,22 y 2,40 metros (Yannopoulos et al., 2020).

#### **2.3.2.3 Tubería de plástico**

Inicialmente, las tuberías de plástico liso se fabricaban de cloruro de polivinilo rígido (PVC) con ranuras longitudinales para la entrada de agua, no obstante, fueron reemplazadas rápidamente por la tubería de plástico corrugada (FAO, 2009). Las tuberías de plástico de PVC

o PV, PVC rígido, PVC termo-fusionado y Polietileno de Alta Densidad (PEAD) son las más utilizadas en la actualidad, en sus versiones lisa y corrugada (Velez, 2006).

En la actualidad y a nivel mundial las tuberías en plástico y de forma corrugada son las más usadas. PAVCO fabrica en Colombia estas tuberías (con filtro o sin filtro) de diámetros 65, 100, 160 y 200 mm; además, también produce tubos de 5 m sin filtro, con sus respectivas uniones y con los mismos diámetros usados para los rollos. Las perforaciones en la tubería oscilan entre 5 a 8 mm de largo y 1,3 mm de ancho (dependiendo del diámetro), con espesores de la pared del tubo o rollo de 0,5 mm (PAVCO, 2005).

Las perforaciones en las tuberías pueden ser de forma circular en tuberías lisas o de ranuras en las tuberías corrugadas. La cantidad de agujeros y el tamaño de las mismas van a depender de la densidad de área perforada por metro de longitud de la tubería. Con esto se puede concluir que entre mayor sea el tamaño de la perforación, más cantidad de agua puede ser drenada, pero con el problema que va transportar o arrastrar más cantidad de arena y limo (Suarez, 2009).

El Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación 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<sup>2</sup>. 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 ancho mínimo en los orificios puede ser de 0.01 pulgadas, pero con el inconveniente que va a ser factible a taponamientos, requiriendo limpieza de manera habitual y por ende elevando los costos en el mantenimiento en el sistema de drenaje (Cornforth, 2005). Las especificaciones de

las materias primas con que estén fabricados los distintos tubos de drenaje (cerámica, hormigón y plástico) vienen descritas en las normas para tuberías de drenaje (FAO, 2009).

Las tuberías de drenaje contemplan múltiples propiedades físicas que permiten valorar las bondades de los diferentes materiales y tomar decisiones en el área de la ingeniería. En este sentido, la Rugosidad de Manning es una propiedad fundamental para decidir el tipo de material y obras necesarias para un proyecto de adecuación de tierras.

## 2.4 El Coeficiente de Manning “n”

El ingeniero irlandés Robert Manning en 1889 desarrolló una alternativa de la ecuación de Chézy<sup>1</sup>, que se volvió común utilizar para el cálculo de la velocidad de los fluidos en canales y tuberías. En el Sistema Internacional de medidas ecuación de Manning se describe:

$$v = \frac{1.00}{n} * R^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}}$$

Donde:

v = velocidad promedio del flujo (m/s)

n = Coeficiente de rugosidad de Manning (adm).

R = Radio hidráulico (m)

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

“n” hace referencia a un coeficiente de resistencia que ocasionalmente se le denomina n de Manning. En canales de conducción, el estado de la superficie de dicho canal influye directamente en el valor de n. Por lo tanto, se puede asemejar a la rugosidad de la pared de un tubo (Mott, 2006).

Sin embargo, al aplicar la ecuación de Manning se presenta la dificultad de determinar el coeficiente de rugosidad n en canales abiertos (quebradas y ríos), debido a que no existe una manera exacta para encontrar este coeficiente (TeChow, 2004). Dicho esto, es necesario analizar

---

<sup>1</sup> La fórmula de Chézy desarrollada por el ingeniero francés Antoine de Chézy  $V = C\sqrt{RS}$ , Donde V es la Velocidad, C es el coeficiente de Chézy, R el Radio hidráulico y S la pendiente.

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 quedarán dentro del conducto (TeChow, 2004).

Por otra parte, en los drenajes subsuperficiales también se producen dificultades 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 ducto (Hernández, 1994). Con el fin de evitar lo anterior, se tiene la necesidad de colocar un material alrededor de los tubos, esto con el fin de filtrar ese material de arrastre disminuyendo la entrada de este al dren y evitar futuras sedimentaciones que ocasionarían taponamientos (Yannopoulos et al., 2020). Actualmente existen una gran variedad de materiales filtrantes (envolventes), como materiales minerales (gravas), sintéticos (tejidos y no tejidos) y orgánicos como fibras vegetales (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. 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 ya 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 angustifolia* puede pensarse como una opción viable para este fin (Velez, 2006).

## **2.5 *Guadua angustifolia***

### **2.5.1 *Taxonomía y Anatomía.***

Las propiedades de los culmos de bambú están determinados por su estructura anatómica, puesto que de ella se definen las propiedades mecánicas y por tanto el uso que se le quiere dar al material (Liese, 1998).

Anatómicamente, el bambú es muy diferente de la madera proveniente de gimnospermas y angiospermas dicotiledóneas, esto debido a que su crecimiento ocurre solo de forma longitudinal, mientras que en los árboles se da de forma radial y longitudinal (Kumar et al., 1994).

La *Guadua*, “no es un árbol, es un bambú leñoso que pertenece a la familia de las gramíneas (pasto gigante) y por lo tanto de la familia del arroz, el trigo, el maíz, etc.”(Teneche, 2007).

También hay que anotar que la *Guadua angustifolia* al carecer de tejido de cambium como otras especies vegetales, no va a crecer en su grosor o diámetro, o sea que solo va a crecer verticalmente (Londoño, 2002).

Internamente los bambúes se encuentran conformada por células de parénquima de forma elongada verticalmente en su mayoría e intercaladas con algunas de forma cúbica, y los haces vasculares se componen de Xilema con uno o más elementos protoxilémicos más pequeños y el Floema con tubos cribosos de paredes delgadas y no lignificados (Giraldo y Sabogal, 2007).

Londoño et al. (2002) determinaron que la *Guadua angustifolia* Kunth cuenta en promedio con un 40% de fibras, un 51% de tejido de parénquima y un 9% de tejido conductivo.

En cuanto a la taxonomía, se puede apreciar en la Figura 1, la posición donde se encuentra el Genero *Guadua* y la Especie *angustifolia*.

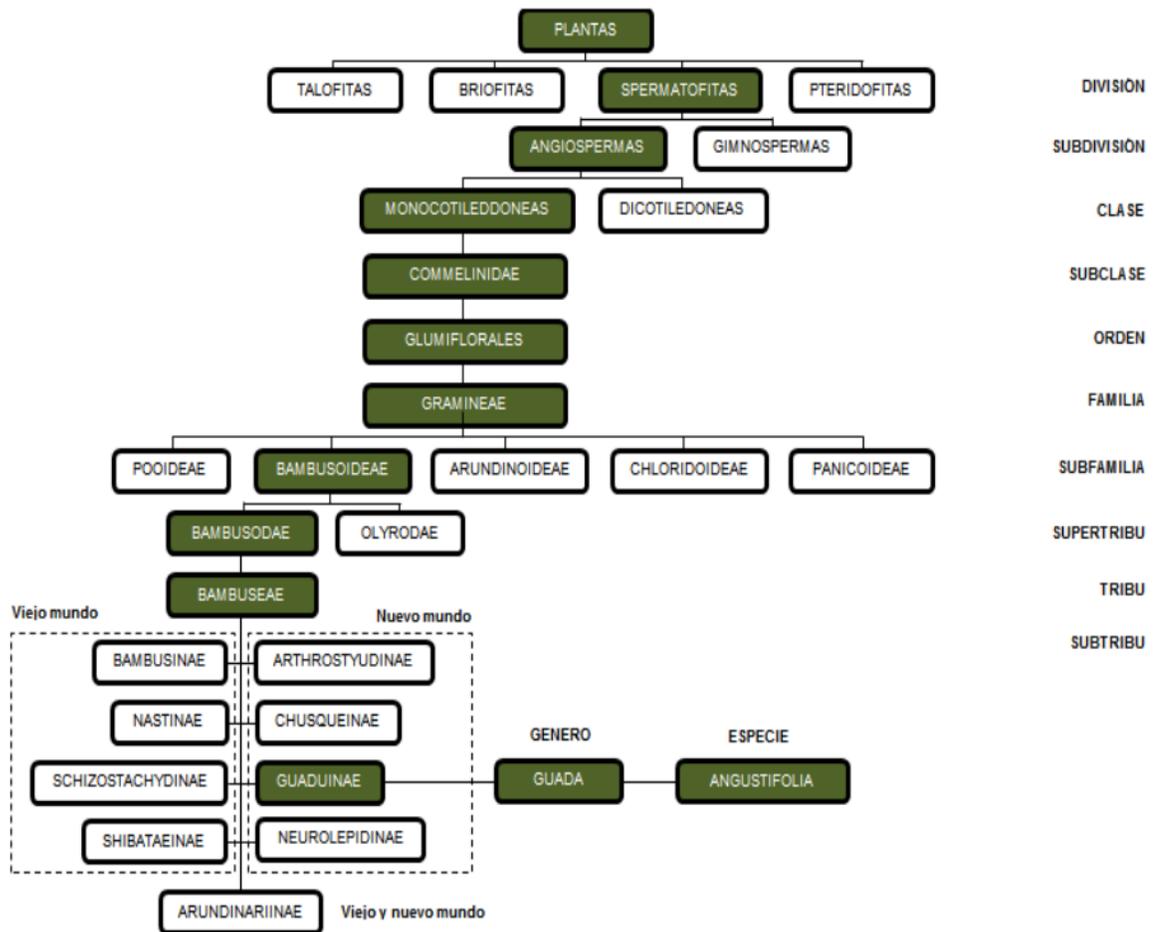
### **2.5.2 Morfología**

El bambú es una especie vegetal que cuenta con una amplia diversidad morfológica, por eso es que alrededor del mundo es posible encontrar algunas especies con grandes diámetros y con alturas de hasta 30 m. Dentro de sus partes que han adquirido más importancia son el rizoma, el culmo, la yema, las ramas, las hojas caulinares y el follaje (Londoño, 2002) (Ver Figura 2).

Rizomas: Son las raíces de la planta y como en toda raíz sirve de sostén dándole firmeza a la *Guadua*, al mismo tiempo sirve de fuente de reserva de nutrientes constituyendo una parte

estructural de la planta; igualmente es usada como “fruto” para el tipo de reproducción asexual (Montiel, 1998).

**Figura 1. Taxonomía de la *Guadua angustifolia***



Fuente: Tomado de Taxonomía de la *Guadua* de Londoño (2002) referenciado por Capera y Erazo (2012).

**Culmo:** Es la parte aérea de la *Guadua angustifolia*, de forma segmentada y que sale directamente después del rizoma. Está constituida a su vez por el cuello, los nudos y los entrenudos. El cuello es la unión existente entre el rizoma y el culmo; los nudos son aquellas intersecciones que van a servir de unión de los entrenudos; y el entrenudo es la sección del tallo o culmo que abarca la distancia entre un nudo y el siguiente (Londoño, 2002).

Figura 2. Partes de la *Guadua angustifolia*.

	DESCRIPCIÓN		UTILIZACIÓN
<b>COPA</b>	Parte apical de la guadua con una longitud de 1,20 a 2,00 m.	20 m.	Se replica en el suelo del guadual como aporte de materia orgánica.
<b>VARILLON</b>	Sección de menor diámetro. Su longitud tiene aproximadamente 3 metros.	18 m.	Se utiliza en la construcción como correa de techos con tejas de barro o de paja. Se emplea como tutor en cultivos transitorios.
<b>SOBREBASA</b>	Es un tramo de guadua con buen comercio debido a su diámetro, que permite un uso variado. Posee una longitud aproximada de 4 metros.	15 m.	Utilizada como elemento de soporte en estructuras de concreto de edificios en construcción. También se emplea como viguetas para formaletear planchas y como postes de espalderas en cultivos.
<b>BASA</b>	Parte de la guadua que mayores usos tiene, debido a su diámetro intermedio. Es la sección más comercial de la guadua. La longitud es de 8 metros aproximadamente.	11 m.	De esta sección se elabora generalmente la esterilla, la cual tiene múltiples usos: en construcción de paredes, casetones y formaletas de planchas. Esta parte se utiliza como vigas y columnas en construcciones nuevas de guadua.
<b>CEPA</b>	Sección basal del culmo de mayor diámetro, debido a sus entrenudos más cortos proporciona una mayor resistencia y tiene una longitud de 3 metros.	3 m.	Se utiliza como columnas en construcción y para cercos.
<b>RIZOMA</b>	Es un tallo modificado, subterráneo, que se conoce popularmente como "caimán"	0 m.	En decoración, muebles y juegos infantiles.

Fuente: (Cely, 2011).

**Yema:** En la *Guadua angustifolia* y en especial en el tallo o culmo, las yemas se encuentran localizadas elevadas sobre la parte nodal; y dejan de ser inactivas cuando el culmo llega a su máximo crecimiento (Londoño, 2002).

**Ramas:** Tienen como base y soporte el tallo y se originan a partir de la yema nodal. Sirven de soporte a las hojas que son las encargadas de los procesos fisiológicos en la planta. Se

clasifican entre ramas basales o bajas y ramas apicales o superiores (Giraldo y Sabogal, 2007). Las ramas de los bambúes cambian de acuerdo a los estados de crecimiento de la especie, pero la manera más común es la que se mira en la mitad de las especies ya adultas. En algunas especies las ramas se transforman en puntas o espinas (Londoño, 2002).

Hoja caulinar: Lo especial de esta hoja es que tiene su origen en cada nudo presente del culmo, su función es el resguardar la yema que posteriormente dará el origen a las ramas y a las hojas. (Londoño, 2002).

Follaje: Como en toda especie vegetal, allí se elabora la mayor parte del alimento de la planta. El bambú por ser una gramínea, su follaje está compuesto por vaina, lámina y apéndices (Londoño, 2002).

## **2.6 Diseño Estadístico de Experimentos**

En lo relacionado con los diseños estadísticos de experimentos, primero hay que conocer que estos son una rama importante de la estadística matemática y que actualmente son muy utilizados en la investigación y en especial en la ingeniería. Los diseños estadísticos de experimentos se fundamentan en los estudios explicativos, con enfoque cuantitativo y paradigma deductivo, puesto que, estos analizan las relaciones entre uno o más factores y una o más variables respuestas, asimismo, los efectos causales de las primeras sobre las segundas. De esta manera, los estudios explicativos se realizan para la determinación de correlaciones, estableciendo hipótesis, midiendo variables y se debe realizar estrictamente de acuerdo al diseño concebido con antelación; por lo tanto, el investigador estará centrado en la validez, el rigor y el control de la situación investigativa (Hernández Sampieri et al., 2014).

Dentro del diseño estadístico de experimentos, se incluye una serie de técnicas de análisis y modelos estadísticos, con el fin de poder planear un experimento y así obtener datos apropiados que se puedan estudiar con la estadística y obtener conclusiones ajustadas, aproximadas a la verdad y de carácter objetivo. Hay experimentos que buscan comprobar si un factor o una variable impactan su resultado sobre un proceso. En estos experimentos siempre

hay una variable que nos representa el mayor interés y que normalmente se le llama variable de respuesta. Existen otras variables llamadas variables controladas o Factores, que pueden adquirir varios niveles y que en últimas influyen o no sobre la variable de respuesta. (Lara, 2001).

Para poner en práctica un experimento, se aplican distintas combinaciones de niveles, siempre que haya más de un factor; con el fin de observar el comportamiento de la variable de respuesta. Para definir el tamaño del experimento se basa en el número de observaciones obtenidas.

Es importante tener en cuenta que en el desarrollo de cualquier experimento donde ya se encuentren establecidos los factores, pueden estar presente otras variables que el diseñador no puede controlar; estas variables están enmarcadas en el término de “error experimental o perturbación” (Lara, 2001).

Con base a lo anterior, uno de los principales objetivos del diseño estadístico de experimentos es el de minimizar ese error experimental. Esto origina los principios básicos de diseño de experimentos que son la aleatorización, replicación y homogeneidad del material a experimentar.

El muestreo juega un papel importante para la obtención de las conclusiones acerca de una población, de ahí su rol primordial en el diseño estadístico de experimentos. Las conclusiones que se produzcan en un análisis estadístico están basadas en una muestra de una población y van a depender de cómo se selección dicha muestra (Rius Díaz et al., 1995).

Para Rius et al. (1995) el muestreo aleatorio es el más relevante, ya que se tienen en cuenta todos los elementos de la población finita y que todos ellos van a tener similar ocasión de ser elegidos, siempre que se tenga en cuenta el propósito del experimento. Sin embargo, no siempre es fácil obtener una muestra aleatoria, algunas veces se basa en tablas, en otras el investigador es incapaz de usar procedimientos formales de aleatorización y así elige confiar en otro método (Hines et al., 2011).

### **2.6.1 Estadística Inferencial**

También es conocida como inferencia estadística, la cual comprende los métodos y técnicas estadísticas apropiadas que permiten deducir o concluir la distribución de una población en estudio a partir de información proporcionada por una muestra representativa, obtenida de la misma población (Nolberto y Ponce, 2008). Es decir, se encarga de estudiar cómo obtener conclusiones generales para toda una población a partir de una muestra representativa, además, permite conocer el grado de confiabilidad de dichos resultados.

### **2.6.2 Diseño Factorial Multinivel**

En la realización de muchos experimentos, se consideran varios factores, y estos van a producir un efecto sobre la variable de respuesta. Cuando se esté trabajando sobre este tipo de situaciones, es conveniente utilizar el diseño factorial. En este diseño se investiga las posibles combinaciones que los diferentes niveles existentes afecten la variable de respuesta.

Se pueden tener diseño factoriales con dos factores, tres y con más de tres factores. Los de dos factores son los más simples porque solo van a intervenir dos factores. Se puede suponer que hay  $a$  niveles para el factor A y  $b$  niveles para el factor B, cada réplica del experimento contiene todas las posibles combinaciones de tratamientos, es decir tiene  $ab$  tratamiento posibles. Para el de tres factores, se tendría  $a$  niveles para el factor A,  $b$  niveles para el factor B y  $c$  niveles para el factor C y cada réplica del experimento contiene todas las posibles combinaciones de tratamientos, es decir contiene  $abc$  tratamientos posibles. Para más de tres factores, las interacciones superiores a tres suelen suponerse nulas, lo que permite obtener una estimación del error experimental (Lara, 2001).

### **2.6.3 Contraste de Hipótesis**

En el diseño de experimentos es importante el planteamiento de hipótesis para la correcta ejecución y validación de resultados basados en los datos obtenidos mediante observación y/o experimentación. El contraste de hipótesis es un criterio que determina para qué valores de la

muestra y/o población se rechaza o no se rechaza la hipótesis nula, de acuerdo con cierto nivel de significación " $\alpha$ ".

Romero y Zúnica (2005) describen la importancia de las hipótesis de independencia, homocedasticidad y normalidad. Las hipótesis de independencia se refieren a que el número  $n$  observaciones para cada composición corresponden a unidades experimentales extraídas independientemente de la población y/o muestra considerada, es decir, que componen una muestra aleatoria de la población en estudio, en consecuencia, las observaciones de los distintos tratamientos también son independientes. Las hipótesis de homocedasticidad plantean para determinar si las  $I \times J$  poblaciones poseen la misma varianza, en otras palabras, se usa para considerar si la varianza no varía entre diferentes grupos o niveles de un factor. Por otra parte, el supuesto de normalidad valida sí la variable estudiada en las  $I \times J$  poblaciones son consideradas distribuciones normales, siendo necesaria para que el resultado de algunos análisis sea confiable. Vale la pena aclarar, que los valores de  $I$  y  $J$  corresponden a variantes o niveles en un diseño factorial con  $n$  replicaciones con un número de combinaciones posibles igual a  $I \times J$ .

### **3. Objetivos**

#### **3.1 Objetivo General**

Determinar la variación de la rugosidad  $n$  de Manning en tubería de drenaje de *Guadua angustifolia* de la zona rural del municipio de Pitalito.

#### **3.2 Objetivos Específicos**

Estimar la rugosidad de Manning de la tubería de *Guadua angustifolia* respecto al caudal (Q1: bajo, Q2: medio y Q3: alto).

Estimar la rugosidad de Manning de la tubería de *Guadua angustifolia* respecto a sección del culmo (inferior, media y superior).

Estimar la rugosidad de Manning de la tubería de *Guadua angustifolia* respecto a cuatro zonas de ubicación de los rodales (Z1, Z2, Z3 y Z4).

Realizar la interacción entre los factores: caudal, sección del culmo y zonas de ubicación por medio de un ANOVA multifactorial.

#### 4. Justificación

Los sistemas de drenaje restablecen las condiciones adecuadas para el desarrollo de los cultivos, controlan los niveles freáticos someros, mantienen un balance de salinidad en el suelo, evitan la formación de enfermedades fungosas, propician la actividad biológica, favorecen la estructura y mayor fertilidad del suelo, controlan la relación aire-agua, facilitan el acceso a las parcelas para realizar las labores y la recolección de la cosecha, entre otras (Pizarro, 1975) (FAO, 2020).

Actualmente, existen en el mercado diferentes materiales para los sistemas de drenaje, entre los cuales se encuentran la tubería y sus accesorios, envolturas y estructuras auxiliares (FAO, 2009), no obstante, los materiales son convencionales, poco amigables con el medio ambiente, de lenta degradación después de su vida útil y con elevados costo de accesibilidad. Valipour et al., (2020) concuerda que es indispensable la ejecución de investigaciones en el área de drenaje, las cuales, abarquen técnicas alternativas de bajo costo para controlar el encharcamiento, sean asequibles, socialmente aceptables y respetuosas del medio ambiente, y no causar degradación de los recursos naturales.

Teniendo en cuenta lo anterior, el bambú leñoso "*Guadua angustifolia*" es la especie vegetal que brinda una alternativa ambiental, sociocultural y en especial económica, presentando para esta última un potencial de alto crecimiento en el país, esto debido a los múltiples usos que se le puede dar en la industria de la construcción, ebanistería, entre otras, reduciendo los precios cuando se implementa como componente primario. Es una especie vegetal que se encuentra a lo largo y ancho del territorio nacional, que ha estado beneficiando a tanto a dueños de rodales como a población en general que requiere de los múltiples usos de la *Guadua*. Además, dentro de las principales ventajas, se tiene su buen comportamiento físico-mecánico iguales o superiores a muchas especies maderables, la resistencia al ataque de insectos, su forma y color que la hace muy atractiva visualmente y sus múltiples usos, representando una opción

económica para la gente que vive en el campo (Giraldo y Sabogal, 2007) (Takeuchi T et al., 2012).

En este sentido, lo que se pretende con este material vegetal es que pueda ser aplicado como alternativa para la transformación en tubería de drenaje agrícola, gracias a su morfología, tallo hueco y circular, adquiriendo forma de tubo.

Para poder calcular el caudal de descarga en las tuberías de drenaje es importante conocer los coeficientes de fricción o rugosidad, que son determinados a nivel experimental para los diferentes tipos de materiales usados como tubería de drenaje, teniendo en cuenta si esta tubería está con perforación o sin perforación y si está total o parcialmente llena.

Actualmente, en la Universidad Surcolombiana se viene desarrollando un proyecto de grado titulado “Determinación de coeficiente de rugosidad (n de Manning) en tubería de *Guadua angustifolia* Kunth para drenaje agrícola”. No obstante, en el proyecto no se contempló variables que podrían afectar el valor de la rugosidad n de Manning como lo son el caudal, la sección y la zona de ubicación de los rodales. Por tal razón, se plantea este proyecto de investigación con el propósito de determinar valores más exactos de la rugosidad de Manning, que validen la alternativa de tubería de drenaje agrícola en *Guadua angustifolia* y, por consiguiente, poder desarrollar diseños de sistemas drenaje eficientes hidráulica, económica y ambientalmente.

## 5. Hipótesis y variables

### 5.1 Hipótesis

Como hipótesis se plantean las siguientes:

H<sub>1</sub>: El caudal no influye significativamente en la rugosidad de la tubería de drenaje de *Guadua angustifolia*.

H<sub>2</sub>: La sección no afecta significativamente la rugosidad de la tubería de drenaje de *Guadua angustifolia*.

H<sub>3</sub>: La zona de ubicación de los rodales no influyen significativamente en la rugosidad de la tubería de drenaje de *Guadua angustifolia*.

H<sub>4</sub>: No existe interacciones entre los factores caudal, sección y ubicación de los rodales con respecto a la rugosidad de la tubería de *Guadua angustifolia*.

### 5.2 Variables

Como variables se tienen:

Variable dependiente: Rugosidad  $n$  de Manning, la cual es adimensional.

Como variables independientes: Factor caudal con tres niveles, que hacen referencia a Q1: caudales bajos, Q2: caudales medios y Q3: caudales altos. El factor Sección, con niveles teniendo en cuenta las partes del culmo de *Guadua*, Inferior (Cepa), media (basa) y superior (sobrebasa). Por último, el factor zona de ubicación de los rodales en el municipio de Pitalito, con los niveles Z1, Z2, Z3 y Z4, los cuales representan cuatro sitios diferentes.

## 6. Glosario

**Aguja limnimétrica:** Instrumento de medición utilizado para medir la altura de la carga de aguas arriba del vertedero referida al nivel de resalto y obtener un caudal con mayor precisión.

**Avinagrado:** Proceso de fermentación inducido por el hombre que consiste en cortar la *Guadua* y dejarla en el sitio de corte (bajo sombra) durante al menos 2 semanas. (NTC5727).

**Banco de perforación:** Dispositivo mecánico, diseñado para la extracción de los tabiques transversales de la parte interna del nudo de la *Guadua*.

**Banco hidráulico:** Dispositivo necesario para la medición de caudales.

**Basa:** Segundo segmento del culmo, a continuación de la cepa, con longitud entre 4,0 m y 8,0 m.

**Caudal:** Volumen de agua que atraviesa un área en un determinado tiempo.

**Cepa:** Primer segmento basal del culmo con longitudes que fluctúan entre 2,5 m a 3,0 m y con los mayores diámetros y espesor de pared de todo el culmo (NTC5727).

**Copa:** Segmento superior del culmo que alberga el follaje de la *Guadua*.

**Culmo:** Eje aéreo segmentado de los bambúes, formado por nudos y entrenudos, que emergen del rizoma (raíz de la *Guadua*). Es equivalente al tallo de un árbol.

**DAP:** Diámetro externo de la *Guadua* a la altura del pecho.

**Diámetro externo:** Diámetro de una sección transversal de un culmo de *Guadua* medido entre dos puntos opuestos en la superficie externa (NTC5727).

**Entrenudos:** Porción del culmo comprendida entre dos nudos (NTC5727).

**Espesor:** Grosor de la pared de un culmo de *Guadua* (NTC5727).

***Guadua* madura o hecha:** *Guadua* mayor a 5 años, presenta tallo verde - blanquecino, con presencia abundante de manchas de líquenes y musgos en los entrenudos y sobre los nudos, sin pubescencia sobre el culmo ni presencia de hojas caulinares (NTC5727).

***Guadual:*** Rodal de *Guadua* (NTC5727).

**Nivel freático:** Cantidad de agua acumulada a una profundidad relativamente pequeña bajo el nivel del suelo.

**Nudo:** Parte del culmo donde externamente se ubica la yema y se originan las ramas e internamente se localiza el tabique o diafragma (NTC5727).

**Probeta:** Es una pieza fabricada con el fin de realizar diferentes tipos de estudios o análisis.

**Rodal:** Conjunto de individuos de una misma especie que pueblan un terreno diferenciándolo de los colindantes (NTC5727).

**Sobrebasa:** Tercer segmento del culmo, localizado a continuación de la basa con longitudes de hasta 4 m (NTC5727).

**Tabique transversal:** También llamado diafragma, se localiza en la parte interna del nudo.

**Varillón:** Segmento terminal del culmo, localizado a continuación de la sobrebasa con longitudes hasta de 4,0 m. Se utiliza tradicionalmente como soporte de cubiertas y en actividades agropecuarias (NTC5727).

**Vertedero hidráulico:** Estructura hidráulica usada para controlar el pase del agua y facilitar la medición del caudal.

## 7. Alcances y limitaciones

### 7.1 Alcances

Estimar los valores de rugosidad  $n$  de Manning para los factores caudal, sección y zonas de ubicación de los rodales en el municipio de Pitalito.

Determinar la influencia en la rugosidad  $n$  de Manning con respecto al caudal, sección y la zona de ubicación del rodal en tubería drenaje de *Guadua angustifolia* y la mejor combinación entre los factores.

Será un punto de partida para desarrollar investigaciones que sirvan para lograr implementar este material vegetal como tubería de drenaje agrícola.

Generar una alternativa económica y ambientalmente viable a los productores de *Guadua*.

### 7.2 Limitaciones:

La *Guadua* al tener una forma de cono truncado, presenta variación en el diámetro de entrada y salida en el ducto, lo que posiblemente afectaría los valores de la rugosidad  $n$  de Manning.

Se creería que la *Guadua* es totalmente recta, sin embargo, en la realidad presenta variaciones (curvas y zig zags) que afectan la transformación y los ensayos.

Al igual que la variación en el diámetro, la *Guadua* presenta variaciones en el espesor, lo que modifica el área interna del ducto.

Dificultades en el diseño y construcción del banco hidráulico, tales como la ubicación del modelo, selección y consecución de los materiales (estructura de soporte, motobomba, vertedero, aguja limnimétrica).

## **8. Diseño Metodológico**

### **8.1 Enfoque de investigación**

El presente proyecto se enmarca en el enfoque cuantitativo y paradigma deductivo, por cuanto se determinó la variación de la rugosidad de Manning en tubería de *Guadua angustifolia* teniendo en cuenta los factores: caudal, sección y zona de ubicación geográfica de los rodales. El componente cuantitativo se basó en el desarrollo de un diseño experimental multivariado, utilizado en la investigación y en especial la Ingeniería, para estimar la rugosidad de Manning.

En este sentido, se analizó las relaciones entre los tres factores mencionados y una variable respuesta, rugosidad de Manning. Asimismo, se estableció el efecto causal de las primeras sobre la segunda. El estudio se realizó en un modelo físico y unas muestras preparadas de *Guadua angustifolia* teniendo en cuenta la normatividad, modificando los factores y cuantificando la variable respuesta.

### **8.2 Población de estudio**

El estudio se realizó con *Guadua angustifolia* que se encuentra en el municipio de Pitalito, abarcando el Valle Laboyos en un rango de altitud de 1250-1350 m.s.n.m. Lo anterior, debido a estudios de propiedades físico-mecánicas de la *Guadua angustifolia* realizados por la Universidad Surcolombiana en el rango de altitud (Takeuchi T et al., 2012) (Takeuchi T et al., 2014) (Sapuyes et al., 2018).

No existe estimación real de la cantidad de *Guadua angustifolia* vegetativa y normativamente aprovechable en el municipio de Pitalito, debido a que no se ha realizado un inventario general de la especie. No obstante, se identificó el proyecto “Caracterización de servicios ecosistémicos de la *Guadua angustifolia* Kunth en la cuenca baja del río Guarapas en (Noriega, 2018), el cual se tomó como población de referencia (ver Figura 3).

**Figura 3. Referenciación de la zona de estudio mediante Google Earth.**



Fuente: Elaboración propia apoyado de Google Earth y de Noriega (2018).

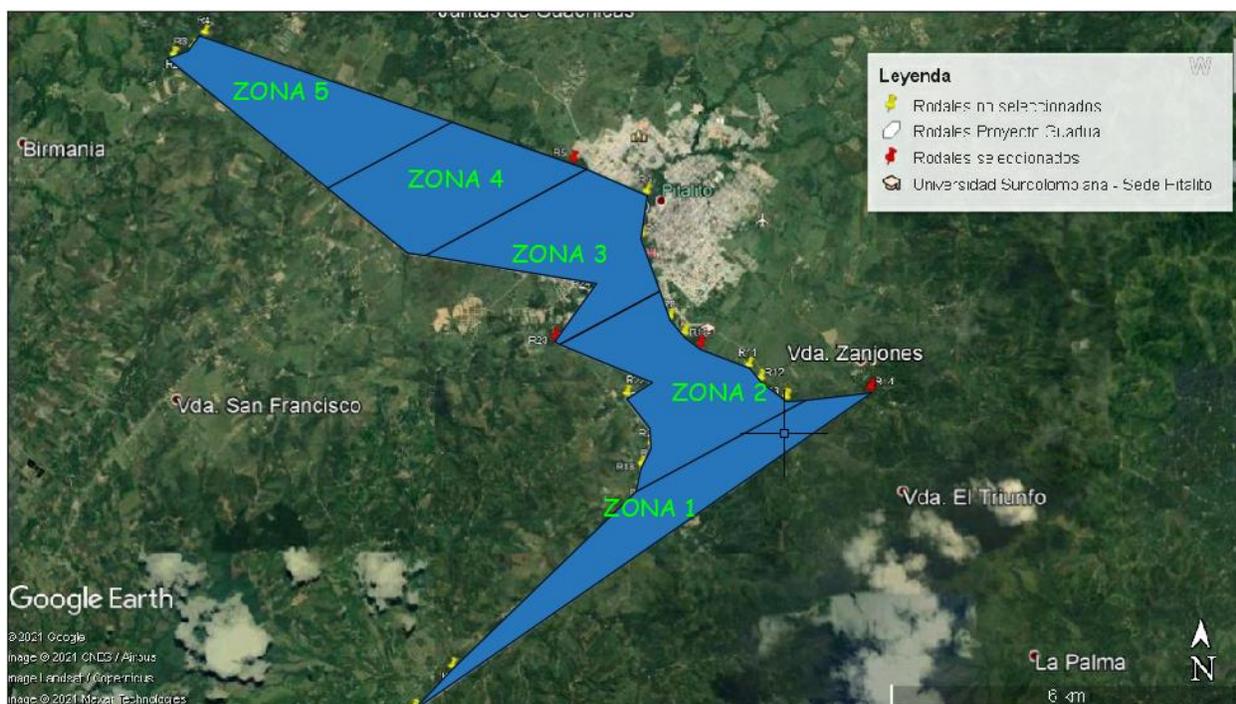
### **8.3 Muestra**

Para la selección de las zonas de muestreo se realizó mediante el tipo de muestreo no probabilístico intencional, con base a los 24 rodales inventariados. De igual manera, se tuvo a consideración dos aspectos, la ubicación sobre el nivel del mar y la localización geográfica en el valle del municipio de Pitalito.

Teniendo en cuenta el perímetro referenciado en la figura 3, se estableció un área para la zona de muestreo de 25'296.782,4 m<sup>2</sup>. Esta área fue subdividida en 5 zonas iguales con un área de 5'059.356,4 m<sup>2</sup>; la razón de la subdivisión fue poder seleccionar un rodal por cada área debido a limitaciones de tiempo para el desarrollo del proyecto, como también por costos.

En la revisión de altura sobre el nivel del mar se evidenció que los rodales pertenecientes a la zona 5, están por debajo del rango previamente establecido, por lo tanto, esta área no fue seleccionada (Ver Figura 4 y Tabla 3).

**Figura 4. Selección de rodales teniendo en cuenta la zona de ubicación.**



Fuente: Elaboración propia apoyado de Google Earth, 2021.

**Tabla 3. Rodales seleccionados por zona.**

Zona	RODAL	Área m <sup>2</sup>	Elevación m.s.n.m.
Zona 1	Vereda Zanjones	9496	1287
Zona 2	Universidad Surcolombiana	3580	1277
Zona 3	Santa Rosa	5524	1284
Zona 4	Villa Fátima	6015	1263
Zona 5	--	--	--

Fuente: Modificado de Noriega (2018). Adaptación propia.

### Acceso a rodales

**Rodal Vereda Zanjones:** localizado en la Vereda Zanjones, a 2 km de la vía que conduce del municipio de Pitalito al municipio de Acevedo. Posteriormente, se recorre 2 Km por la vía veredal (Zanjones) y finalmente mano derecha a unos 400 metros de esta vía. Este rodal se ubica en las coordenadas latitud 694348,2487 Norte y longitud 1112605,5261 Este.

**Rodal Universidad Surcolombiana:** Se encuentra ubicado en el Kilómetro 1 vía vereda El Macal; en inmediaciones de la sede regional de la Universidad Surcolombiana, en las coordenadas latitud 693808,0038 Norte y longitud 1115918,878 Este.

**Rodal Santa Rosa:** Se encuentra ubicado en la vereda Santa Rosa en el municipio de Pitalito, a 200 m de la vía que conduce del municipio de Pitalito al municipio de Palestina, en las coordenadas latitud 693429,2588 Norte y longitud 1117990,3929 Este.

**Rodal Villa Fátima:** Se encuentra localizado en la vereda Cálamo colindante con la zona urbana del municipio de Pitalito. Para llegar al rodal se ingresa por la vía que conduce al Tecnoparque Yamboró en las coordenadas latitud 692485,4707 Norte y longitud 1114237,6276 Este.

### **Visita de campo**

Se realizó la visita de campo a cada rodal, permitiendo identificar y establecer rutas de acceso para la recolección de información y a su vez la extracción del material vegetal objeto de investigación, haciendo uso de caminos reales, caminos de herradura y carreteables.

Por otra parte, una vez referenciado los rodales, se escogió tres culmos por rodal. Dichos culmos se caracterizaron con base a la norma NTC 5726 “Inventario de rodales de *Guadua angustifolia* Kunth para aprovechamiento con fines comerciales” (ICONTEC, 2009).

Para la selección de los culmos se tuvo en cuenta diámetros a la altura del pecho entre 60 y 100 mm (diámetros comerciales de tubería de drenaje agrícola), estado de madurez (*Guadua* “Hecha” o madura, entre 4 y 6 años), estado sanitario y calidad del tallo (ver Anexo A).

En la tabla 4 se caracterizó los culmos utilizados para la elaboración de las probetas, en donde se referencia el lugar de extracción, además, el Diámetro a la altura del pecho DAP y la longitud total del culmo.

**Aprovechamiento de rodales:** En la obtención de los culmos para la fabricación de las probetas, se solicitó ante la autoridad ambiental el permiso de aprovechamiento en cada uno de los rodales. En el anexo B se muestra el formato LISTA DE CHEQUEO REVISIÓN DE

REQUISITOS MÍNIMOS PARA SOLICITUD DE REGISTRO Y/O APROVECHAMIENTO FLORA SILVESTRE NO MADERABLE CON FINES COMERCIALES (*GUADUA*, CAÑA BRAVA, BAMBÚ, OTROS).

**Tabla 4. Caracterización de culmos.**

Rodal	Culmo	* DAP cm	Longitud Total m
Vereda Zanjones	1	14,32	24,75
	2	14,32	24,75
	3	13,53	23,64
Universidad Surcolombiana	1	14,32	24,75
	2	12,73	22,43
	3	13,05	22,88
Santa Rosa	1	12,73	22,43
	2	13,05	22,88
	3	12,73	22,43
Villa Fátima	1	14,32	24,75
	2	12,73	22,43
	3	12,73	22,43

Fuente: Modificada de la norma NTC 5726 ICONTEC (2009). \*DAP: Diámetro altura del pecho.

En la cantidad de culmos por rodal se usó los mismos criterios de la selección de rodales, para un total de tres culmos por rodal.

Para el corte de los culmos en los rodales, se efectuó según las tradiciones y recomendaciones de los propietarios de las fincas. El corte del tallo se realizó al segundo nudo por encima del cuello de la *Guadua* (Ver figura 5a). Posterior al corte, se sometieron los culmos al proceso de sangrado o vinagrado en el *Guadual* (pérdida de humedad), durante aproximadamente 2 semanas (Ver Figura 5b). Una vez finalizado este proceso, los tallos fueron cortados en 3 secciones longitudinales: inferior (2,5 m), media (3,0 m) y superior (3,0m) (Ver Figura 6).

**Elaboración de probetas a partir de culmos:** Una vez se seleccionados los culmos, se procedió al lavado (ver Figura 7a) y elaboración de las probetas teniendo en cuenta la ubicación del rodal y la sección del culmo, dando como resultado 3 probetas por culmo y 36 en total.

**Corte:** El corte en los culmos se realizó de 2 metros de longitud en cada sección (ver Figura 7b).

**Figura 5. Corte de culmos en rodales y avinagrado.**



a)



b)

Fuente: propia

**Figura 6. Secciones cortadas de los culmos.**



Fuente: propia.

**Figura 7. Lavado de culmos y corte de probetas de acuerdo a la sección.**



a)



b)

Fuente: propia

En la fabricación de probetas se realizó de acuerdo a los siguientes criterios:

**Rotulado:** El rotulado de las probetas se basó en la norma NTC 5525 ( ICONTEC, 2007)

(ver Tabla 5), sin embargo se tuvo cuatro (4) aspectos\* relacionados a continuación:

**Tabla 5. Rotulado de probetas.**

Z1	N	1	I
a	b	c	d

Fuente: Aspectos\*: a. Zona de ubicación del rodal (Z1, Z2, Z3, Z4); b. Propiedad a ensayar n de Manning (N) c. Número de la probeta (1, 2, 3); d. Sección de la *Guadua* (I: Inferior, M: Medio; S: Superior).

**Perforación:** La perforación de las probetas de *Guadua* se realizó en dos etapas:

Perforación del tabique transversal: Morfológicamente en el interior de la *Guadua* especialmente en el nudo, se desarrolla un tabique transversal (Membrana) que interrumpe la cavidad llamada entrenudo, que es necesario romperla para darle continuidad al ducto. Para esto se usó el banco de perforación (Ver figura 8) diseñado y construido por Carantón y Molina (2021).

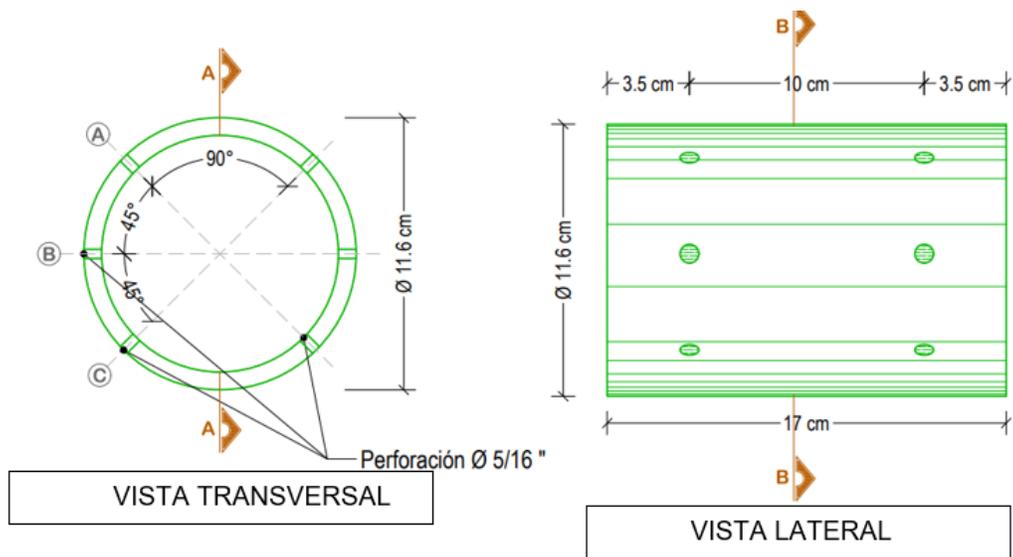
**Figura 8. Perforación de tabique transversal y banco de perforación.**



Fuente: propia.

Perforación lateral del tubo: En la perforación lateral del tubo se consideró la distribución de orificios de las tuberías para drenaje agrícola de PAVCO, en donde se establece, seis (6) líneas en total, tres por el lado izquierdo y tres por el lado derecho, a 45° verticalmente entre líneas y el espacio horizontal entre orificios por línea cada 10 cm. Se dejó un espacio libre perforaciones de 90° en las superficies inferior y superior (Ver Figura 9). Para los orificios de entrada de agua se usó un diámetro de perforación de 5/16 pulgadas, lo anterior da como resultado un área total por metro lineal de 26,72 cm<sup>2</sup>, lo cual es un área de entrada de agua por metro lineal superior al área mínima exigida por la NTC 6028 (ICONTEC, 2013), que indica que el área mínima de entrada de agua para drenaje de 8 cm<sup>2</sup> por metro lineal. En la Figura 10, se muestra la marcación y perforación de los orificios de drenaje sobre el cuerpo de la probeta.

**Figura 9. Diagrama de orificios en probetas.**



Fuente: Tomado de Claros y Burbano (2021).

**Figura 10. Marcación y perforación de orificios en probetas.**



Fuente: propia.

#### 8.4 Instrumentos y materiales

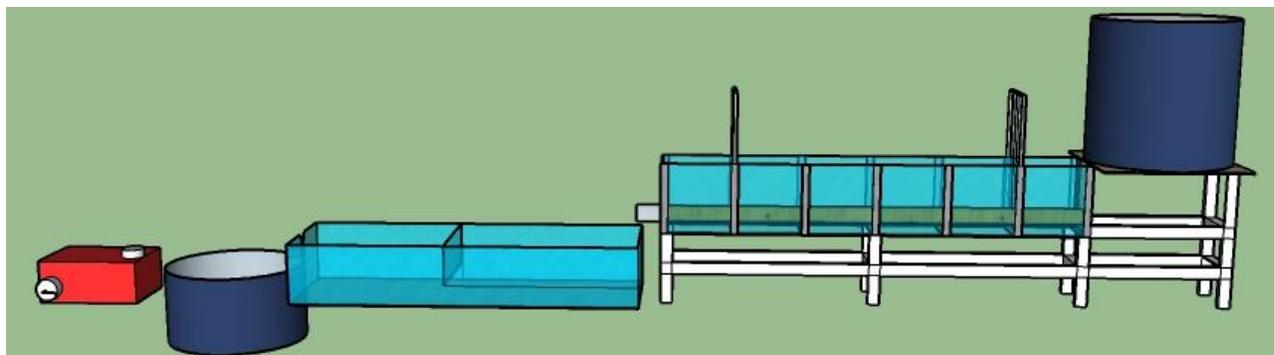
**Calibrador Vernier:** utilizado para determinar las medidas del diámetro externo y espesor en mm, con un límite instrumental de error LIE 0,05 mm. Fue adquirido para el laboratorio de física de la sede regional Pitalito de la Universidad Surcolombiana hace aproximadamente 9 meses.

**Cinta métrica:** para determinar la longitud de las probetas y longitud de los nudos.

**Banco hidráulico:** El instrumento de medición que se usará para determinar la variabilidad de la rugosidad de Manning de tubería de *Guadua angustifolia* es un modelo físico denominado banco hidráulico de pruebas. El equipo cuenta con un canal horizontal rectangular en lámina galvanizada y estructura metálica, una sección de aquietamiento en vidrio de 6 mm de espesor y vertedero en acrílico con Aguja limnimétrica (precisión de 0.1 mm), además, de un tanque de suministro plástico de 1000 litros, tubería de conducción de polietileno de 1.5 pulgadas y válvula de paso, un tanque de recepción plástico de 500 litros y una motobomba Power Master con diámetro de salida y entrada de 1.5 pulgadas, a gasolina, modelo MG168R-KBPM15H, caudal máximo 300 l/min y potencia de 6.5 HP (ver figura 11).

**Calibración del vertedero:** El vertedero del banco hidráulico se calibró con base al método planteado por Portillo (2012), relacionado en el ANEXO C.

**Figura 11. Banco hidráulico para la medición de caudales.**



Fuente: Diagrama inicial en 3D del modelo Hidráulico. Carrillo y Vidal (2021).

En el ANEXO D se muestra el registro fotográfico de los pasos realizados para la elaboración y determinación de la rugosidad  $n$  de Manning en campo.

## 8.5 Proceso de recolección de los datos

Una vez elaboradas las probetas, se efectuó la caracterización con base en la norma NTC 5525 “Métodos de ensayo para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la *Guadua angustifolia* Kunth” (ICONTEC, 2007), además, se le realizó estadística descriptiva al diámetro

exterior, espesor y distancia entre nudos, con el fin de corroborar que el comportamiento de estas variables físicas sean acordes a los resultados de otros estudios realizados a la *Guadua angustifolia* (Takeuchi T et al., 2012), (Takeuchi T et al., 2014), (Sapuyes et al., 2018).

### 8.5.1 Caracterización física de las probetas

En la tabla 6, se especifica el rotulo de las probetas y el promedio: diámetro externo en mm, espesor en mm, diámetro interno en mm, número de nudos y distancia entre nudos en cm.

**Tabla 6. Caracterización de las probetas con base a la Norma “NTC 5525” (2013).**

ROTULADO PROBETA	DÍAMETRO_EXT PROMEDIO mm	ESPEJOR_PROMEDIO mm	DÍAMETRO_INT PROMEDIO mm	No. NUDOS	DISTANCIA ENTRENUDOS cm
Z1N1I	129,47	16,17	113,3	7	25,9
Z1N1M	113,72	13,87	99,85	6	30,5
Z1N1S	88,79	11,27	77,53	6	32,1
Z1N2I	134,03	21,42	112,61	10	19
Z1N2M	124,77	15,04	109,73	6	29,2
Z1N2S	95,63	12,76	82,88	5	36,6
Z1N3I	139,49	23,34	116,15	10	20,2
Z1N3M	117,92	14,3	103,62	6	31
Z1N3S	108,89	13,21	95,68	5	37,5
Z2N1I	130,99	15,49	115,5	8	24,5
Z2N1M	121,71	11,53	110,18	6	30,8
Z2N1S	108,93	12,51	96,43	5	33,8
Z2N2I	129,56	15,47	114,09	8	24,4
Z2N2M	116,19	11,79	104,4	5	35,1
Z2N2S	101,28	11,08	90,2	5	35,3
Z2N3I	143,25	17,25	126	7	25,4
Z2N3M	135,69	14,8	120,89	6	33,2
Z2N3S	123,7	14,32	109,38	6	38,5
Z3N1I	125,09	16,09	109	10	20,4
Z3N1M	119,13	12,27	106,87	6	29,5
Z3N1S	95,00	10,54	84,46	7	26,8
Z3N2I	138,02	16,83	121,19	9	21
Z3N2M	131,77	13,28	118,49	6	31,4
Z3N2S	109,43	10,02	99,41	5	35,6
Z3N3I	126,57	16,08	110,49	10	19,6
Z3N3M	118,33	13,13	105,19	6	29,8
Z3N3S	111,34	11,42	99,93	5	36,1
Z4N1I	129,38	16,89	95,59	11	17,0
Z4N1M	106,70	10,64	85,42	7	26,5
Z4N1S	93,18	8,86	75,46	6	33,1
Z4N2I	113,40	15,32	82,77	12	16,9
Z4N2M	104,61	11,78	81,04	6	30,1
Z4N2S	99,55	11,99	75,57	6	34,1
Z4N3I	116,25	15,98	84,30	11	17,1
Z4N3M	99,25	10,03	79,20	9	22,6
Z4N3S	87,00	8,77	69,47	7	29,3

Fuente: Elaboración propia.

Dichos valores oscilan entre 88, 79 y 143,25 mm para el diámetro externo, en el espesor fluctúa entre 10,02 y 23,34 mm, el diámetro interno entre 77,53 y 126,00 mm, el número de nudos oscila entre 5 y 10, y la distancia entre nudos varía de 19,0 a 38,5 cm.

### **8.5.2 Estadística descriptiva caracterización de probetas**

A continuación, se referencian las estadísticas descriptivas de las variables diámetro exterior, distancia entre nudos y espesor, relevantes para el análisis del factor sección de la *Guadua*.

#### **Diámetro exterior:**

En la tabla 7, se muestra los estimadores del diámetro externo de los culmos, en la cual, se puede confirmar como el diámetro exterior va disminuyendo a medida que el culmo va ganando altura, es decir, como se presenta en su forma natural en culmos de *Guadua* y se aprecia durante su crecimiento y desarrollo. El diámetro externo en la sección inferior fluctúa entre 0,14325 y 0,10000 m, en la sección media 0,13569 y 0,09925 m, y en la sección superior 0,12370 y 0,08700 m (Ver Figura 12).

De igual manera, se observa diferencias muy pequeñas entre la media y la mediana, siendo esta última ligeramente superior. En cuanto a la moda no se presentaron valores repetidos, mostrando la variabilidad del diámetro en la especie.

Al revisar la desviación estándar de 0,01519 refleja una baja dispersión de los datos, y por tanto nos lleva a pensar que los datos tienen una distribución normal. Por otra parte, el coeficiente de varianza del 0,00023 reafirma una mínima dispersión de los datos con respecto a la media.

Al examinar la asimetría menor que cero (-0,08085), indica que la media es menor que la mediana, dando como resultado una asimetría negativa, lo cual nos dice que la distribución se alarga a la izquierda para valores inferiores a la media y se concentran a la derecha mínimamente, indicando mayoría de valores por encima del promedio. La curtosis es negativa (-

0,90941), mostrando un ligero aplastamiento de datos, lo cual indica una distribución platicúrtica, es decir, se observa una heterogeneidad de los datos, aunque no significativa.

Con la prueba de Shapiro – Wilk para un nivel de significancia del 0,05, arrojó un p-value de 0,6311 para los 36 datos, es decir que se aprueba la hipótesis nula, demostrando normalidad en la distribución de los datos.

Shapiro-Wilk normality test: H0= Distribución normal y H1: Distribución no normal.

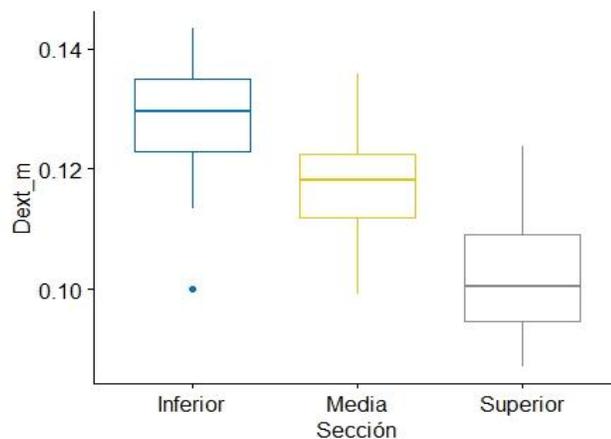
Data: DATOS \$ Diámetro exterior  
W = 0.97663, p-value = 0.6311

**Tabla 7. Diámetro exterior**

Estimadores	Inferior	Media	Superior	Completa
Mean (m)	0,12717	0,11748	0,10189	0,11551
Standard Error	0,00354	0,00307	0,00312	0,00253
Median (m)	0,12947	0,11812	0,10042	0,11622
Mode	-	-	-	-
Standard Deviation (m)	0,01225	0,01062	0,01080	0,01519
Sample Variance (m <sup>2</sup> )	0,00015	0,00011	0,00012	0,00023
Kurtosis	0,86612	-0,23637	-0,20065	-0,90941
Skewness	-0,96401	-0,00728	0,47937	-0,08085
Maximum (m)	0,14325	0,13569	0,12370	0,14325
Minimum (m)	0,10000	0,09925	0,08700	0,08700
Count	12,00000	12,00000	12,00000	36,00000

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 12. Diagrama de cajas y bigotes para Diámetro exterior respecto a la sección**



Fuente: Elaboración propia (R-Studio).

### **Distancia entre nudos:**

En la tabla 8, se muestra los estimadores de la distancia entre nudos de las probetas, en la cual, se puede confirmar como la distancia va aumentando a medida que el culmo va ganando altura, es decir, como se presenta en su forma natural. La distancia entre nudos en la sección inferior fluctúa entre 25,90 y 16,89 m, en la sección media 35,05 y 22,56 m, y en la sección superior 38,54 y 26,84 m (ver Figura 13).

De igual manera, se observa diferencias muy pequeñas entre la media y la mediana, siendo esta última ligeramente superior. En cuanto a la moda no se presentaron valores repetidos, mostrando la variabilidad de la distancia entre los nudos que tiene la especie.

Al revisar la desviación estándar de 6,40569 cm, reflejando una moderada dispersión de los datos, lo anterior se debe a que en la zona inferior la distancia entre los nudos es menor que las secciones media y superior. Por otra parte, el coeficiente de varianza del 41,03283 cm<sup>2</sup>, es decir una dispersión moderada de los datos respecto a la media.

Al examinar la asimetría menor que cero (-0,34788), indica que la media es menor que la mediana, dando como resultado una asimetría negativa, lo cual nos dice que la distribución se alarga a la izquierda para valores inferiores a la media y se concentran a la derecha mínimamente. La curtosis es negativa (-1,00934), mostrando aplastamiento de datos, indican una distribución platicúrtica.

Con la prueba de Shapiro – Wilk para un nivel de significancia del 0,05, arrojó un p-value de 0,07639 para los 36 datos, es decir, que se aprueba la hipótesis nula, demostrando normalidad en la distribución.

Shapiro-Wilk normality test: H0= Distribución normal y H1: Distribución no normal.

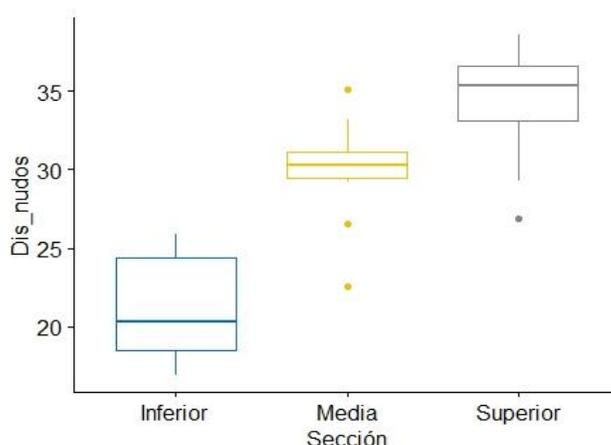
Data: DATOS \$ Distancia entre nudos  
W = 0.94566, p-value = 0.07639

**Tabla 8. Distancia entre nudos por sección y total.**

Estimadores	Inferior	Media	Superior	Completa
Mean (cm)	20,94765	29,96271	34,06264	28,32433
Standard Error	0,96245	0,90319	0,97648	1,06761
Median (cm)	20,28333	30,29000	34,72250	29,65000
Mode	-	-	-	-
Standard Deviation (cm)	3,33401	3,12873	3,38262	6,40569
Sample Variance (cm)	11,11564	9,78897	11,44215	41,03283
Kurtosis	-1,41790	2,41361	0,61716	-1,00934
Skewness	0,29230	-0,98795	-0,95231	-0,34788
Maximum (cm)	25,90000	35,05000	38,54000	38,54000
Minimum (cm)	16,89091	22,56250	26,84000	16,89091
Count	12	12	12	36

Fuente: Elaboración propia

**Figura 13. Diagrama de cajas y bigotes para distancia entre nudos respecto a la sección**



Fuente: Elaboración propia (R-Studio).

### **Espesor:**

En la tabla 9, se muestra los estimadores del espesor de la pared de las probetas, en la cual, tiene un comportamiento similar a lo ocurrido en el diámetro exterior, a medida que el culmo va ganando altura, el espesor va disminuyendo. El espesor en la sección inferior fluctúa entre 0,023342 y 0,010000 m, en la sección media 0,015042 y 0,010025 m, y en la sección superior 0,014317 y 0,008767 m (Ver figura 14).

De igual manera, se observa diferencias muy pequeñas entre la media y la mediana, siendo esta última ligeramente superior (0,43 mm). En cuanto a la moda no se presentaron

valores repetidos. En la desviación estándar (0,00320 m), se refleja una pequeña dispersión de los datos. Por otra parte, el coeficiente de varianza del 0,00001 m<sup>2</sup>, es decir una dispersión leve de los datos respecto a la media.

Al examinar la asimetría mayor que cero (1,02572), indica que la media es mayor que la mediana, dando como resultado una asimetría positiva, indicando que la distribución se alarga a la derecha para valores superiores a la media y se concentran a la izquierda mínimamente. La curtosis es negativa (1,61917), mostrando apuntamiento de datos e indica una distribución leptocúrtica.

Con la prueba de Shapiro – Wilk para un nivel de significancia del 0,05, arrojó un p-value de 0,02805 para los 36 datos, es decir que se rechaza la hipótesis nula, demostrando no normalidad en la distribución de los datos.

Shapiro-Wilk normality test: H0= Distribución normal y H1: Distribución no normal.

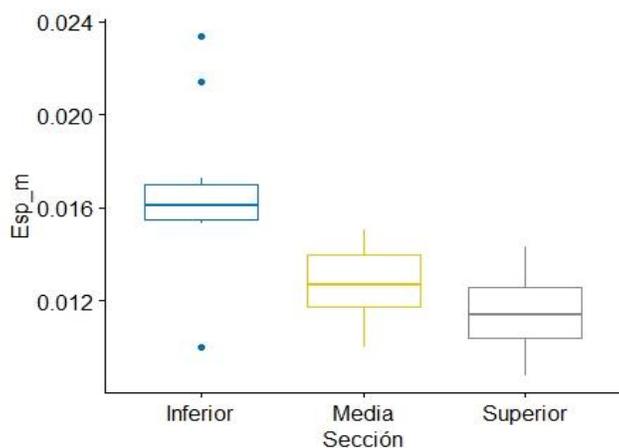
Data: DATOS\$Esp\_m  
W = 0.93163, p-value = 0.02805

**Tabla 9. Espesor de la pared de la *Guadua* por sección y total.**

Estimador	Inferior	Media	Superior	Completa
Mean (m)	0,016678	0,012705	0,011418	0,01360
Standard Error	0,000945	0,000468	0,000487	0,00053
Median (m)	0,016083	0,012700	0,011392	0,01317
Mode	-	-	-	-
Standard Deviation (m)	0,003272	0,001622	0,001686	0,00320
Sample Variance (m <sup>2</sup> )	0,000011	0,000003	0,000003	0,00001
Kurtosis	2,114362	-1,060987	-0,474328	1,61719
Skewness	0,304482	-0,087336	-0,110558	1,02572
Maximum (m)	0,023342	0,015042	0,014317	0,02334
Minimum (m)	0,010000	0,010025	0,008767	0,00877
Count	12	12	12	36,00000

Fuente: Elaboración propia

**Figura 14. Diagrama de cajas y bigotes para Espesor respecto a la sección**



Fuente: Elaboración propia (R-Studio).

### 8.5.3 Cálculo de $n$ de Manning

En la tabla 10 se muestra las variables necesarias para determinar la  $n$  de Manning en las probetas de *Guadua*. La primera columna representa el rótulo para cada probeta del proyecto. El área “A” hace referencia a la sección transversal interna del culmo, fue obtenida a partir de los promedios del diámetro exterior y el espesor la probeta en la sección inicial y final. La pendiente “S” utilizada para el proyecto fue del 1 por ciento para todos los ensayos. Las columnas “Cabeza (Lect. Aguja limnimétrica H cm)” representa las lecturas de la aguja limnimétrica sobre el vertedero, indispensable para el cálculo de los caudales 1, 2 y 3. Las columnas Tirante “y”, hace referencia a la lámina de agua existente en el interior de la probeta, medida obtenida mediante piezómetros y necesario para la determinación del Radio Hidráulico (Mott, 2006). La columna Radio Hidráulico “R” es calcula mediante las siguientes expresiones:

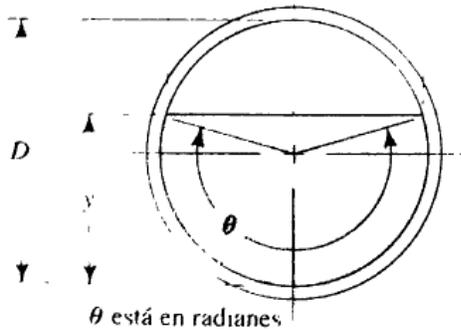
$$R = \left[ \frac{\theta - \text{sen } \theta}{\theta} \right] \left[ \frac{D}{4} \right]$$

Donde, R es el radio hidráulico,  $\theta$  es el ángulo formado en la sección transversal desde el origen de la circunferencia hasta la lámina de agua (Tirante) (ver figura 15) y se haya mediante:

$$\text{Para } y < \frac{D}{2}, \theta = \pi - 2 \text{sen}^{-1} \left[ 1 - \left( \frac{2y}{D} \right) \right]; \text{ Para } y > \frac{D}{2}, \theta = \pi + 2 \text{sen}^{-1} \left[ \left( \frac{2y}{D} \right) - 1 \right]$$

Donde,  $\Theta$  en radianes, Tirante “y” en m, Diámetro interior D en m. El Diámetro interior se obtiene de la diferencia del diámetro exterior y dos veces el espesor de la probeta.

**Figura 15. Radio hidráulico “R” y Tirante “y”**



Fuente: Tomado de Mott (2006).

Las columnas de caudal se hayan mediante las lecturas de la aguja limnimétrica y la ecuación calibrada para vertederos triangulares de cresta delgada (Ver anexo C). Además, las columnas representan tres caudales (Q1: bajo, Q2: medio y Q3: alto).

Los  $n_1$ ,  $n_2$  y  $n_3$  representan  $n$  de Manning para cada caudal y radio hidráulico.

Las columnas de  $n$  de Manning, se obtienen mediante la siguiente expresión:

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

En la tabla 11 se muestran los resultados de  $n$  de Manning teniendo en cuenta los factores: caudal, sección y zona. Además, se aprecia tres datos omitidos en la sección superior con caudal Q3, uno para la zona Z2 y dos para la zona Z4, lo anterior, debido a que los caudales fueron muy altos, y por tanto, la tubería trabajó a presión, lo cual no está contemplado para este tipo de ensayo.

**Tabla 10. Cálculo de la Rugosidad de Manning**

RESULTADOS DE EXPERIMENTO																	
Rot. Prob	Área "A" (m <sup>2</sup> )	Pend. "S"	Cabeza (Lect. aguja limnimétrica H cm)			Tirante "y" (m)			Radio hidráulico "R" (m)			Caudal "Q" l/s			n de Manning		
			1	2	3	y1	y2	y3	1	2	3	Q1	Q2	Q3	n1	n2	n3
Z1N1I	0,00750	0,01	5,70	5,14	7,29	0,021	0,026	0,041	0,01276	0,01529	0,02179	0,50666	0,39244	0,93753	0,09115	0,10430	0,06238
Z1N1M	0,00614	0,01	4,74	6,71	5,19	0,030	0,048	0,035	0,01639	0,02284	0,01873	0,31941	0,76196	0,40205	0,12396	0,06484	0,10766
Z1N1S	0,00365	0,01	5,51	7,10	10,40	0,047	0,054	0,061	0,01965	0,02016	0,01959	0,46546	0,87863	2,28163	0,05703	0,03074	0,01161
Z1N2I	0,00623	0,01	4,23	6,23	7,92	0,052	0,072	0,087	0,02472	0,02772	0,02613	0,24073	0,63457	1,15352	0,21970	0,08997	0,04758
Z1N2M	0,00726	0,01	5,99	6,64	8,61	0,041	0,052	0,066	0,02138	0,02498	0,02797	0,57362	0,74317	1,42289	0,09748	0,08347	0,04701
Z1N2S	0,00391	0,01	5,20	7,63	8,43	0,026	0,047	0,054	0,01414	0,02043	0,02124	0,40334	1,05190	1,35109	0,05664	0,02776	0,02218
Z1N3I	0,00652	0,01	8,15	9,28	4,56	0,011	0,049	0,062	0,00681	0,02404	0,02701	1,24039	1,71454	0,28996	0,04729	0,03166	0,08077
Z1N3M	0,00638	0,01	4,91	5,54	7,76	0,028	0,035	0,052	0,01565	0,01869	0,02432	0,35004	0,47255	1,09610	0,11402	0,09506	0,04885
Z1N3S	0,00543	0,01	7,47	6,38	9,66	0,037	0,048	0,072	0,01907	0,02246	0,02489	0,99873	0,67167	1,89717	0,04327	0,05769	0,02440
Z2N1I	0,00756	0,01	4,58	5,87	7,49	0,036	0,046	0,057	0,01957	0,02372	0,02707	0,29419	0,54686	1,00431	0,18651	0,11408	0,06784
Z2N1M	0,00770	0,01	5,20	5,92	8,44	0,026	0,034	0,050	0,01522	0,01893	0,02493	0,40269	0,55858	1,35503	0,11748	0,09797	0,04852
Z2N1S	0,00569	0,01	6,43	10,49	9,10	0,052	0,059	0,076	0,02376	0,02495	0,02486	0,68490	3,07972	1,63555	0,06870	0,01578	0,02965
Z2N2I	0,00779	0,01	6,02	7,34	6,62	0,031	0,041	0,046	0,01740	0,02177	0,02359	0,58805	0,95481	0,73665	0,08892	0,06707	0,08240
Z2N2M	0,00678	0,01	6,10	7,95	8,94	0,039	0,053	0,064	0,02075	0,02518	0,02737	0,60116	1,16568	1,56463	0,08511	0,04994	0,03933
Z2N2S	0,00493	0,01	9,40	8,02	7,45	0,056	0,072	0,094	0,02319	0,02339	-	1,77207	1,19028	-	0,02265	0,03390	-
Z2N3I	0,00916	0,01	6,65	7,70	4,87	0,031	0,046	0,055	0,01798	0,02439	0,02738	0,74690	1,07736	0,34236	0,10319	0,07728	0,18370
Z2N3M	0,00904	0,01	5,57	6,13	12,83	0,047	0,053	0,068	0,02442	0,02647	0,03037	0,47826	0,60776	3,86059	0,15903	0,13206	0,02278
Z2N3S	0,00725	0,01	5,58	6,56	7,89	0,037	0,049	0,057	0,01998	0,02414	0,02647	0,48040	0,72007	1,14502	0,11117	0,08414	0,05628
Z3N1I	0,00656	0,01	6,40	7,97	9,61	0,035	0,052	0,066	0,01903	0,02477	0,02765	0,67783	1,17304	1,87435	0,06893	0,04748	0,03198
Z3N1M	0,00707	0,01	3,94	5,31	8,18	0,018	0,031	0,053	0,01084	0,01731	0,02529	0,20199	0,42502	1,25311	0,17135	0,11128	0,04859
Z3N1S	0,00463	0,01	7,03	7,90	9,50	0,044	0,049	0,067	0,02055	0,02155	0,02187	0,85714	1,14744	1,81958	0,04056	0,03127	0,01991
Z3N2I	0,00818	0,01	8,22	6,91	4,99	0,035	0,064	0,054	0,01961	0,02933	0,02656	1,26604	0,82104	0,36454	0,06146	0,08871	0,16319
Z3N2M	0,00884	0,01	5,94	7,69	9,87	0,027	0,047	0,065	0,01602	0,02458	0,02974	0,56331	1,07271	2,00028	0,09971	0,06964	0,04241
Z3N2S	0,00651	0,01	5,15	7,35	9,47	0,034	0,048	0,068	0,01861	0,02347	0,02707	0,39309	0,95695	1,80525	0,11632	0,05577	0,03252
Z3N3I	0,00682	0,01	6,03	6,78	8,04	0,034	0,048	0,058	0,01889	0,02401	0,02663	0,58326	0,78392	1,20020	0,08288	0,07236	0,05064
Z3N3M	0,00659	0,01	7,18	8,71	9,90	0,046	0,061	0,073	0,02307	0,02677	0,02799	0,90464	1,46456	2,01721	0,05907	0,04029	0,03014
Z3N3S	0,00615	0,01	5,60	6,51	8,06	0,037	0,047	0,061	0,01955	0,02294	0,02607	0,48471	0,70822	1,20768	0,09210	0,07013	0,04478
Z4N1I	0,00703	0,01	6,94	6,22	4,91	0,022	0,033	0,042	0,01851	0,02209	0,01330	0,82897	0,63205	0,34886	0,06677	0,07784	0,11312
Z4N1M	0,00601	0,01	6,11	7,15	8,24	0,045	0,055	0,065	0,02208	0,02453	0,02584	0,60445	0,89314	1,27491	0,07826	0,05681	0,04121
Z4N1S	0,00480	0,01	6,56	7,70	9,40	0,048	0,058	0,080	0,02160	0,02288	-	0,72098	1,07736	1,77365	0,05162	0,03589	-
Z4N2I	0,00553	0,01	3,55	3,97	6,42	0,011	0,023	0,042	0,00692	0,01332	0,02091	0,15534	0,20499	0,68402	0,12918	0,15145	0,06132
Z4N2M	0,00516	0,01	5,03	6,24	7,31	0,025	0,036	0,044	0,01409	0,01866	0,02126	0,37180	0,63709	0,94505	0,08095	0,05696	0,04189
Z4N2S	0,00470	0,01	6,16	8,45	8,60	0,043	0,062	0,067	0,02029	0,02272	0,02300	0,61605	1,41876	1,35770	0,05674	0,02657	0,02799
Z4N3I	0,00532	0,01	5,55	4,88	3,82	0,014	0,024	0,029	0,00875	0,01393	0,01621	0,47397	0,34355	0,18697	0,07192	0,08968	0,12086
Z4N3M	0,00524	0,01	6,42	7,00	7,64	0,058	0,058	0,067	0,02379	0,02379	0,02402	0,68224	0,84903	1,05420	0,06355	0,05107	0,04140
Z4N3S	0,00397	0,01	6,25	6,90	7,75	0,041	0,048	0,081	0,01918	0,02052	-	0,63795	0,81806	1,09375	0,04456	0,03635	-

Fuente: Elaboración propia (ver anexo E).

**Tabla 11. Clasificación de n de Manning según los factores zona, sección y caudal con niveles correspondientes.**

SECCIÓN	CAUDAL	ZONA				
		Z1	Z2	Z3	Z4	
INFERIOR	Q1	0,1043020	0,1865116	0,0689280	0,1131218	
		0,2196976	0,0889175	0,1631889	0,1514538	
		0,0807699	0,1837015	0,0828790	0,1208606	
	Q2	0,0911495	0,1140845	0,0474806	0,0778357	
		0,0899655	0,0824024	0,0887060	0,1291850	
		0,0472921	0,1031944	0,0723556	0,0896837	
	Q3	0,0623785	0,0678354	0,0319787	0,0667746	
		0,0475753	0,0670721	0,0614589	0,0613238	
		0,0316604	0,0772812	0,0506407	0,0719222	
	MEDIA	Q1	0,1239578	0,1174798	0,1713487	0,0782555
			0,0974805	0,0851054	0,0997066	0,0809528
			0,1140177	0,1590345	0,0590663	0,0635516
Q2		0,1076621	0,0979748	0,1112838	0,0568087	
		0,0834696	0,0499395	0,0696420	0,0569611	
		0,0950629	0,1320638	0,0402918	0,0510667	
Q3		0,0648373	0,0485161	0,0485867	0,0412105	
		0,0470074	0,0393326	0,0424104	0,0418885	
		0,0488478	0,0227809	0,0301388	0,0413994	
SUPERIOR		Q1	0,0570264	0,0687025	0,0405565	0,0516166
			0,0566366	0,0339044	0,1163197	0,0567430
			0,0576908	0,1111677	0,0921021	0,0445561
	Q2	0,0307351	0,0296488	0,0312723	0,0358908	
		0,0277650	0,0226457	0,0557718	0,0279902	
		0,0432731	0,0841401	0,0701263	0,0363484	
	Q3	0,0116116	0,0157847	0,0199146	-	
		0,0221831	-	0,0325152	0,0265702	
		0,0243972	0,0562757	0,0447822	-	

Fuente: Elaboración propia.

## 9. Resultados

### 9.1 Estimación de la rugosidad de Manning respecto al Caudal

#### Estadística descriptiva

En la tabla 12 se muestran las estadísticas descriptivas de  $n$  de Manning para caudales Q1 (bajos), Q2 (medios) y Q3 (altos), se puede evidenciar que al aumentar el caudal el  $n$  de Manning disminuye, por ejemplo, la media para Q1 (caudal bajo) el  $n$  de Manning es 0,0975328, para Q2 (caudal medio) de 0,0689214 y para Q3 (Caudal alto) es 0,0472431 (Ver figura 16). En cuanto a la mediana en Q1 y Q3 es menor que la media, sin embargo, en Q2 la mediana es mayor a la media. Respecto las medidas de dispersión, la desviación estándar y varianza es mayor en Q1 y existe menor variabilidad en Q3. En la curtosis, para Q1 y Q3 son leptocúrticas, refleja una concentración alta alrededor de los valores centrales, mientras que Q2 es platicúrtica, es decir, la no concentración de los datos en los valores centrales. La asimetría en los caudales es positiva, indicando que la mediana es menor que la media. En Q1 se presenta una asimetría positiva moderada, en Q2 la asimetría es positiva leve y para Q3 la asimetría es positiva elevada, indicando sesgo en la distribución.

**Tabla 12. Rugosidad  $n$  de Manning según el caudal.**

Estimador	Q1	Q2	Q3
Mean	0,0975328	0,0689214	0,0472431
Standard Error	0,0075762	0,0051763	0,0044347
Median	0,0870115	0,0698841	0,0447822
Mode	-	-	-
Standard Deviation	0,0454572	0,0310580	0,0254756
Sample Variance	0,0020664	0,0009646	0,0006490
Kurtosis	0,3895932	-0,9742179	7,8322677
Skewness	0,9581074	0,2727799	2,1040485
Maximum	0,2196976	0,1320638	0,1514538
Minimum	0,0339044	0,0226457	0,0116116
Count	36,0	36,0	33,0

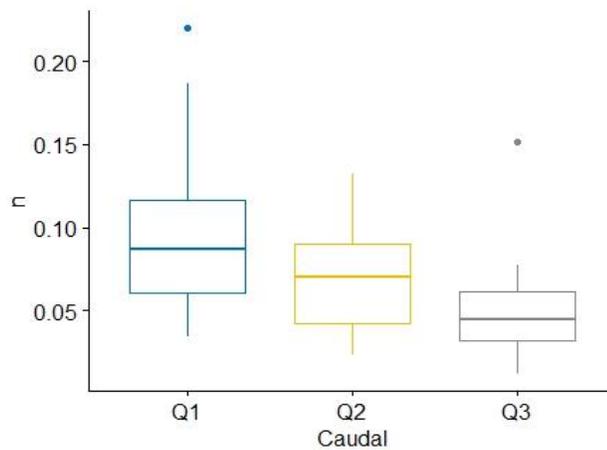
Fuente: Elaboración propia (R-Studio).

La prueba de Shapiro – Wilk con un nivel de significancia del 0,05 arrojó un p-value de 0,0114 (Q1), 0,1104 (Q2) y 0,0001 (Q3), es decir que se rechaza la hipótesis nula para Q1 y Q3 demostrando no normalidad en la distribución de los datos, y aceptando normalidad solo para Q2.

Shapiro-Wilk normality test: H0= Distribución normal y H1: Distribución no normal.

Data: DATOS\$Q1                      DATOS\$Q2                      DATOS\$Q3  
W= 0.91854, p-value= 0.0114    W= 0.95075, p-value = 0.1104    W= 0.83249, p-value = 0.0001435

**Figura 16. Gráfico de caja y bigotes de la variable Caudal**



Fuente: Elaboración propia (R-Studio).

**Intervalos de confianza:** en la tabla 13 se muestra los intervalos de confianza con un 95 por ciento de confianza para cada una de las medias del factor caudal. Se puede deducir que la rugosidad n de Manning oscila entre 0,108911 y 0,0337272 respecto al factor caudal.

**Tabla 13. Intervalos de confianza de la rugosidad n de Manning para el Caudal**

Nivel	Inferior	Superior
Q1	0,0911618	0,108911
Q2	0,0600467	0,077796
Q3	0,0337272	0,0527294

Fuente: Elaboración propia (R-Studio).

## 9.2 Estimación de la rugosidad de Manning respecto a la sección.

### Estadística descriptiva

En la tabla 14 se muestran las estadísticas descriptivas de  $n$  de Manning para las secciones inferior, media y superior. Observando la media, el mayor  $n$  de Manning se da en la parte inferior (0,0915436) y el menor en la superior (0,0465656) (ver figura 17). Lo anterior, se puede explicar debido a que la sección inferior presenta mayores diámetros exteriores, menores distancias entre nudos y por tanto mayor número de nudos, lo cual, originaría mayores pérdidas. En cuanto a la mediana presenta valores ligeramente inferiores respecto a la media en todas las secciones. La curtosis presentó valores positivos, una alta concentración en los valores centrales (leptocúrticas) en las secciones inferior y superior, mientras en la sección media concentración en menor grado. En la asimetría, los valores para las tres secciones son positivas, indicando que la distribución se alarga a la derecha para valores superiores a la media y se concentran a la izquierda mínimamente.

**Tabla 14. Rugosidad  $n$  de Manning según la sección.**

Estimador	Inferior	Media	Superior
Mean	0,0915436	0,0755317	0,0465656
Standard Error	0,0073052	0,0060978	0,0044858
Median	0,0815862	0,0641944	0,0405565
Mode	-	-	-
Standard Deviation	0,0438313	0,0365866	0,0257690
Sample Variance	0,0019212	0,0013386	0,0006640
Kurtosis	1,4055509	0,1593221	1,1863468
Skewness	1,2651238	0,8594137	1,1978770
Maximum	0,2196976	0,1713487	0,1163197
Minimum	0,0316604	0,0227809	0,0116116
Count	36	36	33

Fuente: Elaboración propia (R-Studio).

La prueba de Shapiro – Wilk con un nivel de significancia del 0,05, arrojó un p-value de 0,0018025 (inferior), 0,014838023 (media) y 0,004063704 (superior), es decir, se rechaza la hipótesis nula para las secciones mostrando no normalidad en la distribución, aunque los

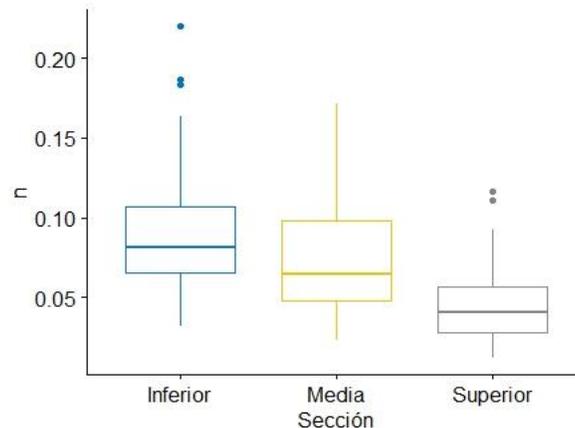
resultados no tienen una distribución normal, se usan para estimar la rugosidad de Manning según la sección.

Shapiro-Wilk normality test: H0= Distribución normal y H1: Distribución no normal.

Data: DATOS\$Inferior DATOS\$Media DATOS\$Superior

W=0.88967, p-value= 0.001802 W=0.92242, p-value= 0.01484 W=0.89543, p-value = 0.004064

**Figura 17. Gráfico de caja y bigotes de la variable Sección**



Fuente: Elaboración propia (R-Studio).

### Intervalos de confianza

Los intervalos de confianza al 95 por ciento para la media rugosidad  $n$  de Manning respecto al factor sección se relaciona en la tabla 15. Se evidencia que la rugosidad  $n$  de Manning oscila entre 0,100418 y 0,03560970 respecto al factor sección.

**Tabla 15. Intervalos de confianza para la media rugosidad  $n$  de Manning según la sección.**

Nivel	Inferior	Superior
I	0,0826689	0,100418
M	0,0666571	0,0844063
S	0,0356097	0,054612

Fuente. Elaboración propia (R-Studio).

## 9.3 Estimación de la rugosidad de Manning respecto a la Zona

### Estadística descriptiva

En la tabla 16 se muestran las estadísticas descriptivas de  $n$  de Manning para las zonas Z1, Z2, Z3 y Z4. Con respecto a la media el mayor coeficiente  $n$  de Manning se da en la zona Z2

(0,08251915) y el menor en la zona Z4 (0,06695886), en las zonas Z1 y Z3 la rugosidad es muy similar (Ver figura 18). En cuanto a la mediana presenta valores ligeramente inferiores respecto a la media en todas las zonas. La curtosis, presentó valores positivos mostrando apuntamiento en los datos (leptocúrticas), con mayor valor en Z1 (presenta colas muy gruesas) y menor valor en Z2. En la asimetría, los valores para las cuatro zonas son positivas, que la mediana es menor a la media y evidenciando alargamiento de la distribución a la derecha.

La prueba de Shapiro – Wilk con un nivel de significancia de 0,05 arrojó un p-value de 0,168307149 en la zona Z2, por tanto, se acepta la hipótesis nula, es decir normalidad en la distribución. Para las demás zonas el p-value es menor a 0,05, por tanto, se rechaza la hipótesis nula, y evidencia la no normalidad en la distribución de los datos.

Teniendo en cuenta la estadística descriptiva, se puede inferir que en la zona Z2 presenta diferencias notorias para rugosidad n de Manning respecto a las demás zonas.

Shapiro-Wilk normality test: H0= Distribución normal y H1: Distribución no normal.

Data: DATOS\$Z1 data: DATOS\$Z2

W = 0.87705, p-value = 0.004152 W = 0.94411, p-value = 0.1683

Data: DATOS\$Z3 data: DATOS\$Z4

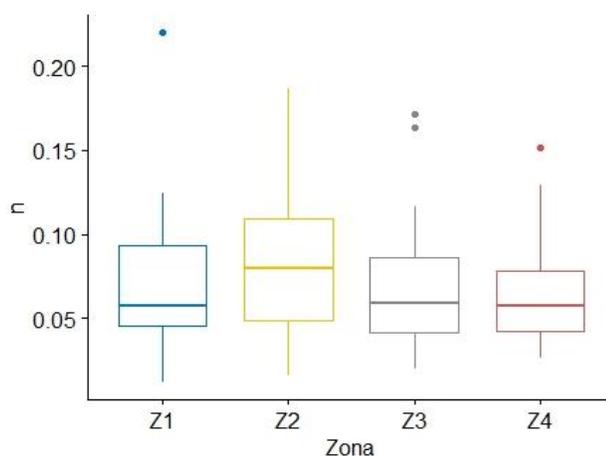
W = 0.87923, p-value = 0.004623 W = 0.89745, p-value = 0.01615

**Tabla 16. Rugosidad n de Manning según la Zona.**

Estimador	Z1	Z2	Z3	Z4
Mean	0,0699427	0,0825192	0,0682760	0,0669589
Standard Error	0,0082899	0,0092260	0,0073524	0,0065023
Median	0,0576908	0,0798418	0,0590663	0,0569611
Mode	-	-	-	-
Standard Deviation	0,0430754	0,0470435	0,038204	0,0325116
Sample Variance	0,0018555	0,0022131	0,0014596	0,001057
Kurtosis	4,3670685	0,039521	1,6141878	0,7875872
Skewness	1,6061772	0,6954007	1,3299445	1,1347776
Maximum	0,2196976	0,1865116	0,1713487	0,1514539
Minimum	0,0116116	0,0157847	0,0199146	0,0265702
Count	27	26	27	25

Fuente: Elaboración propia (R-Studio).

**Figura 18. Gráfico de caja y bigotes de la variable Zona**



Fuente: Elaboración propia (R-Studio).

**Intervalos de confianza**

Los intervalos de confianza al 95 por ciento para la media rugosidad n de Manning respecto al factor zona se relaciona en la tabla 17. Se evidencia que la rugosidad n de Manning oscila entre 0,0909607y 0,0533122 respecto al factor zona.

**Tabla 17. Intervalos de confianza para la media rugosidad n de Manning según la zona.**

Nivel	Inferior	Superior
Z1	0,0596951	0,0801902
Z2	0,0699803	0,0909607
Z3	0,0580285	0,0785236
Z4	0,0533122	0,0751391

Fuente: Elaboración propia (R-Studio).

**Datos atípicos**

Al revisar las figuras 16, 17 y 18, se puede apreciar atípicos de rugosidad n de Manning para cada uno de los factores, se tiene lo siguiente: la variable Caudal presenta los datos 2 y 83, en la variable sección se obtuvo los datos 2, 4, 6, 30 y 32, y en la variable zona los datos 2, 8, 19 y 83. Se verificó en campo las mediciones físicas e hidráulicas realizadas en la toma de datos y se corrobora que estos datos no pueden ser excluidos debido a que son datos propios del proceso.

#### 9.4 Interacción entre factores: caudal, sección del culmo y zona de ubicación

Se utilizó el análisis de varianza multifactorial ANOVA en los factores caudal, sección del culmo y zonas de ubicación, para ello se verificó el supuesto de normalidad de los datos de la rugosidad. Con base a lo hallado en la estimación  $n$  de Manning por factor, se puede concluir que esta no se comporta como una distribución normal de acuerdo con la prueba de Shapiro-Wilk con un nivel de significancia del 0,05 ( $p$ -value = 0,00000486), por lo tanto, se plantea la transformación de la variable respuesta  $n$  de Manning mediante la función logaritmo.

Shapiro-Wilk normality test:  $H_0$ = Distribución normal y  $H_1$ : Distribución no normal.

Data: DATOS\$ $n$   
 $W = 0.91506$ ,  $p$ -value = 4.863e-06

Una vez transformada la variable respuesta  $n$  de Manning y obteniendo la normalidad con un nivel de significancia de 0,05 con la prueba de Shapiro-Wilk ( $p$ -value = 0,880), se realizó el análisis de varianza multifactorial en el software R, con la interfaz gráfica RStudio (Versión 1.3.1073, © 2009-2020 RStudio, PBC) (ver tabla 18). Se utilizó la suma de cuadrados tipo II, para probar hipótesis, en la cual se escogen únicamente las hipótesis asociadas con medias ponderadas ajustadas. No se encontró diferencias estadísticas en la interacción de tres vías (Zona: Sección: Caudal).

Se evidencia que los factores sección y caudal con un nivel de significancia de 0,05 son estadísticamente significativos para la rugosidad  $n$  de Manning presentando  $p$ -value de 5,98e-08 y 1,81e-09 respectivamente, en cambio, la zona de ubicación no presentó significancia con  $p$ -value > 0,05.

De igual manera, al revisar el efecto de las combinaciones de dos vías entre factores son mayores al nivel de significancia (0,05) las iteraciones zona: caudal y sección: caudal, en consecuencia, no son estadísticamente significativos para la rugosidad  $n$  de Manning. Sin embargo, para la iteración zona: sección existe diferencias estadísticamente significativas con un  $p$ -value (0,028) menor al nivel de significancia de 0,05.

**Tabla 18. Análisis de Varianza para log n-Manning - Suma de Cuadrados Tipo II**

Effect	DFn	DFd	F	p	p<.05	ges
Zona	3	69	0,936	0,428		0,039
Sección	2	69	34,706	<b>3,71e-11</b>	*	0,501
Caudal	2	69	37,85	<b>8,02e-12</b>	*	0,523
Zona: Sección	6	69	2,537	<b>0,028</b>	*	0,181
Zona: Caudal	6	69	0,944	0,47		0,076
Sección: Caudal	4	69	0,654	0,626		0,037
Zona: Sección: Caudal	12	69	0,326	0,982		0,054

Fuente: Elaboración propia (R-Studio).

De lo anterior, se puede confirmar que en el factor sección, las variables físicas de la *Guadua* como el diámetro exterior, la distancia entrenudos, por consiguiente, el número de nudos, afectan directamente la variable de respuesta, reflejando que a menor diámetro y mayor distancia entre nudos (sección superior) el n de Manning va disminuyendo. Para el factor caudal, como ya se había dicho en el análisis de la estadística descriptiva, se evidencia que a medida que se aumenta el caudal, a su vez, la rugosidad n de Manning va disminuyendo. En el Anexo F se encuentra relacionado las pruebas de verificación de supuestos del modelo, en el cual se cumplieron en su totalidad.

Debido a las cuatro interacciones presentes en el Anova con los factores y con el fin de disminuir los errores tipo I, se realiza el ajuste de Bonferroni ( $\alpha$  corregido) asegurando que la probabilidad de obtener al menos un falso positivo entre todas las comparaciones es  $\leq \alpha$  (Joaquín Amat, 2016).

$$\alpha_{\text{corregido}} = \frac{\alpha}{\text{número de grupos}} = \frac{0,05}{4} = 0,0125$$

Con el  $\alpha$  corregido, se comparó los p-value de la Anova de la tabla 18, estableciendo que las interacciones de los factores no son estadísticamente significativas con un nivel de significancia de  $p=0,0125$ .

Para confirmar que la interacción Zona: Sección no es estadísticamente significativas, se realizó el análisis de correlación de Pearson arrojando un R<sup>2</sup> de -0,009 y un p-value 0,7834 y de Sperman un R<sup>2</sup> de -0,009 y un p-value 0,7858.

#### 9.4.1 Prueba de múltiples rangos para el caudal

En tabla 19 se aplicó la comparación múltiple con ajuste de Bonferroni para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. El asterisco indica las combinaciones que son estadísticamente significativas.

Al examinar se encontró un efecto significativo de los niveles de caudal sobre la rugosidad de Manning con un p-value<0,05. Las comparaciones múltiples se analizaron entre los diferentes niveles de caudal. Se encontraron diferencias en la rugosidad de Manning entre todos los grupos de niveles del caudal, tanto en Q1 (bajo), como en Q2 (medio) y Q3 (alto).

**Tabla 19. Comparaciones por par entre medias estimadas para el caudal**

term	y	group1	group2	df	statistic	p	p.adj	p.adj.signif
Caudal	n	Q1	Q2	102	3,4421	0,0008381	0,00251431	**
Caudal	n	Q1	Q3	102	5,9172	4,42E-08	1,33E-07	****
Caudal	n	Q2	Q3	102	2,5507	0,0122361	0.03670827	*

Fuente: Elaboración propia (R-Studio).

#### 9.4.2 Prueba de múltiples rangos para el factor sección

En la tabla 20 se aplicó el mismo test que en el factor caudal para la comparación de medias de la sección con ajuste de Bonferroni. Se observa que existen diferencias estadísticamente significativas (asterisco) entre los niveles inferior-superior y media-superior p-value<0,05. No obstante, para la interacción inferior: media no hubo diferencia significativa  $p(0,195) > 0,05$ .

Lo anterior, indicaría como la sección superior que tiene los menores diámetros exteriores y mayores distancias entre nudos (menor número de nudos en la sección) afecta fuertemente a las otras dos secciones, lo que no ocurre entre las secciones inferior-media, debido

a que, entre estas los diámetros exteriores y distancia entre nudos se comportan de manera más homogénea.

**Tabla 20. Comparaciones por par entre medias estimadas para la sección**

term	.y.	group1	group2	df	statistic	p	p.adj	p.adj.signif
Sección	n	Inferior	Media	102	2	0,065064	0,195193	ns
Sección	n	Inferior	Superior	102	5	0,000001	0,000004	****
Sección	n	Media	Superior	102	3	0,001334	0,004003	**

Fuente: Elaboración propia (R-Studio).

### 9.4.3 Prueba de múltiples rangos para la zona

Las comparaciones múltiples se analizaron entre los diferentes grupos de niveles de la zona de ubicación, con ajuste de Bonferroni. Al observar la tabla 21, se encontró que no hay efectos estadísticamente significativos de los niveles de la zona de ubicación sobre la rugosidad de Manning,  $p\text{-value} > 0,05$ . Esto complementa lo relacionado en el Anova multifactorial (tabla 18), donde el factor zona no influye en los valores de rugosidad  $n$  de Manning.

**Tabla 21. Comparaciones por par entre medias estimadas para la Zona**

term	.y.	group1	group2	df	statistic	p	p.adj	p.adj.signif
Zona	n	Z1	Z2	101	-1,1259997	0,2628341	1	ns
Zona	n	Z1	Z3	101	0,1506497	0,8805525	1	ns
Zona	n	Z1	Z4	101	0,2644686	0,7919578	1	ns
Zona	n	Z2	Z3	101	1,2752214	0,2051564	1	ns
Zona	n	Z2	Z4	101	1,3665912	0,1747880	1	ns
Zona	n	Z3	Z4	101	0,1167444	0,9072945	1	ns

Fuente: Elaboración propia (R-Studio).

## 9.5 Discusión sobre Rugosidad de Manning respecto a los factores

A partir de los resultados obtenidos de rugosidad de Manning con base a los caudales Q1, Q2 y Q3, se puede establecer que se rechaza la hipótesis nula con un nivel de significancia del 0,05; por tanto, existe diferencia estadísticamente significativa entre estos, puesto que a medida que aumenta el caudal disminuye la rugosidad de Manning (relación inversa). Aunque no existen estudios donde se relacionan la rugosidad de Manning con tubería de drenaje agrícola,

estos resultados guardan concordancia con lo reportado en el informe de la UNIANDES y PAVCO (2009), no obstante, este estudio fue realizado en tubería de PVC sanitaria con diámetro fijo de 250 mm. Del mismo modo, Vatankhah (2015) encontró que para canales circulares el coeficiente de rugosidad de Manning, bajo la condición de flujo parcialmente completo varía con la lámina del flujo, y por lo tanto, se confirma que al variar el caudal varía la rugosidad de Manning.

Con base a los resultados de rugosidad de Manning para la sección del culmo, se puede establecer que se rechaza la hipótesis nula, por consiguiente, existe diferencia estadísticamente significativa entre los niveles de la sección, a medida que disminuye el diámetro (sección superior) disminuye la rugosidad de Manning (relación directa). Aunque no existen estudios donde se mencione la rugosidad de Manning con tubería de drenaje agrícola en cuanto a la sección, estos resultados guardan relación con lo reportado por Araya I et al., (2018) donde establecen que al aumentar la profundidad del flujo y el perímetro mojado aumentan los valores del coeficiente de rugosidad de Manning, lo anterior se realizó en tubería de PVC sanitaria de 315 mm de diámetro.

Cabrera (2012) referenciado por Alarcón y Pedraza (2019), encontró que existe variación del coeficiente  $n$  de Manning respecto a en función del diámetro de la tubería de Polietileno de alta densidad PAD, donde obtuvo promedios de 0.0076 para una tubería de 100mm de diámetro y un  $n$  promedio de 0.0099 para una tubería de 1500mm de diámetro, concluyendo, que mientras mayor sea el diámetro de la tubería, mayor será su  $n$  de Manning.

Al revisar los resultados de rugosidad de Manning para la zona de ubicación de los rodales, se puede establecer que se acepta la hipótesis nula, por tanto, no existe diferencia estadísticamente significativa entre las diferentes zonas de ubicación de los rodales, indicando que este factor no afecta los valores de la rugosidad de Manning. Al ser el primer proyecto realizado sobre el estudio de la *Guadua* como tubería de drenaje no se logró referenciar un patrón de comparación respecto a las zonas de ubicación de rodales.

## 9.6 Comparación de medias entre los factores Caudal y Sección

Una vez demostrado en el ANOVA que entre los factores: caudal y sección, existe diferencias estadísticamente significativas, se realizó el estadístico de prueba HSD de Tukey con el fin de determinar los valores máximos y mínimos de rugosidad de Manning para las combinaciones de los niveles de dichos factores (ver tabla 22).

**Tabla 22. Estadístico de prueba HSD tukey para los niveles de factores caudal y sección.**

Tratamientos	n	grupos
Q1:Inferior	0.12285018	a
Q1:Media	0.10416311	ab
Q2:Inferior	0.08611125	ab
Q2:Media	0.07935224	bc
Q3:Inferior	0.06566932	bcd
Q1:Superior	0.06558521	bcd
Q3:Media	0.04307970	cd
Q2:Superior	0.04130063	cd
Q3:Superior	0.02822604	d

Fuente: Elaboración propia (R-studio).

Dentro de las combinaciones de rugosidad de Manning con valores máximos se tienen las relacionadas en el grupo “a”, es decir los caudales bajos y medios con secciones inferior y media, indicando que tuberías con diámetros grandes y caudales pequeños la conducción de agua es menos eficiente. Para los valores mínimos de rugosidad se encuentran los del grupo “d” en especial para caudales altos y secciones superiores, indicando que en tuberías con diámetros pequeños y caudales altos permiten la conducción de agua de manera más eficiente, sin embargo, se debe tener en cuenta que al manejar caudales muy grandes en tuberías pequeñas se corre el riesgo que el ducto trabaje a flujo lleno (presurizada), por lo que cambiaría las condiciones de rugosidad de Manning y los principios físicos para esta clase de fricción.

## 10. Conclusiones

La rugosidad  $n$  de Manning oscila entre 0,108911 y 0,0337272 respecto al factor caudal, evidenciando que a medida que aumenta el caudal esta disminuye y demostrando que existe diferencias estadísticamente significativas  $p\text{-value}<0,05$  en los niveles del caudal.

La rugosidad  $n$  de Manning oscila entre 0,100418 y 0,03560970 respecto al factor sección, comprobando que en las secciones de menor diámetro esta disminuye y corroborando las diferencias estadísticamente significativas entre los niveles  $p\text{-value}<0,05$ .

La rugosidad  $n$  de Manning oscila entre 0,0909607y 0,0533122 respecto al factor zona, indicando que los resultados fueron muy homogéneos y evidenciando que no existe diferencias dentro de los niveles de las zonas de ubicación de los rodales con un nivel de significancia del  $p\text{-value}>0,05$ .

La prueba de múltiples rangos para el factor sección muestra la existencia de diferencias estadísticamente significativas  $p\text{-value}<0,05$  entre los niveles inferior: superior y media: superior. Esto demuestra que la sección superior al tener menores diámetros exteriores y mayores distancias entre nudos (menor número de nudos) afecta fuertemente a las otras secciones, lo que no ocurre entre las secciones inferior: media ( $p\text{-value}>0,05$ ), debido a que, entre estas los diámetros exteriores y distancia entre nudos son más homogéneos.

La rugosidad de Manning para tubería de drenaje agrícola en *Guadua angustifolia* arrojó un valor promedio de 0,07192, con un máximo de 0,21970 y mínimo de 0,01161. En comparación con lo establecido por Ortega & Sagaldo (2001), el promedio es mayor a los de las tuberías de arcilla (0,013) concreto (0,015) y PVC (0,015), no obstante, se obtuvieron algunos valores por debajo de estos, en especial cuando se trabaja con caudales medios y altos en tuberías de diámetros pequeños.

## 11. Recomendaciones

Se debería contemplar este tipo de investigación teniendo en cuenta rangos más amplios de altitudes donde se dé naturalmente la *Guadua angustifolia*.

Mejorar el funcionamiento del banco de perforaciones de tabique central y el banco hidráulico para mejorar eficiencia en la fabricación de tubería de *Guadua* y medición de variables hidráulicas.

Realizar estudios que involucren otros tipos de perforaciones laterales en la tubería de drenaje de *Guadua angustifolia*.

Adelantar estudios que involucren las variables: pendiente, longitud y nudos de *Guadua angustifolia*.

Realizar estudios de *Guadua angustifolia* como tubería de conducción de agua en el que involucre otros coeficientes de fricción.

Realizar un estudio de caracterización genética de la *Guadua* del municipio Pitalito con el fin de correlacionarlas con las propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas.

Realizar un estudio aplicando un muestreo probabilístico con diferentes estados de madurez y diámetros de la *Guadua*.

## 12. Referencias bibliográficas

- Aguirre Contreras, E. J. (2009). *Parámetros para el diseño del sistema de drenaje en los campos Juan Pablo II y Pablo IV, en la administración Veracruz - Empresa Casa Grande S.A.A.* [Universidad Nacional de Trujillo Perú]. <https://doi.org/https://doi.org/10.2307/j.ctt20fw874.59>
- Alarcón, J. J., & Pedraza Camacho, L. J. (2019). Variación del coeficiente de rugosidad de Manning bajo distintos escenarios hidráulicos. *Universidad Tecnológica de Pereira*. [https://www.academia.edu/39050693/Variación\\_del\\_coeficiente\\_de\\_rugosidad\\_de\\_Manning\\_bajo\\_distintos\\_escenarios\\_hidráulicos](https://www.academia.edu/39050693/Variación_del_coeficiente_de_rugosidad_de_Manning_bajo_distintos_escenarios_hidráulicos)
- Alcaldía de Pitalito, CAM, & USAID-Colombia / USFS. (2015). *Ruta de cambio Pitalito 2030*. 1–40. <http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosMarinosCosterosyRecursosAcuatico/PITALITO.pdf>
- ANDECE. (n.d.). *INFORME TÉCNICO: Cálculo hidráulico en sistemas de saneamiento: Coeficiente de rugosidad*.
- Araya I, A., González C, 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. *Revista Ingeniería UC*, 25 N° 1, 43–49. <https://doi.org/https://doi.org/10.1787/888933146680>
- Beauchamp, K. H. (1987). Chapter 2. A History of Drainage and Drainage Methods. In *Farm Drainage in the United States: History, Status, and Prospects. Miscellaneous Publication No. 1455; Pavelis, G.A., Ed.; Economic Research Service: Washington, DC, USA*, 13–29.
- Capera o., A. F., & Erazo, W. J. (2012). *Resistencia a la compresión paralela a la fibra y determinación del módulo de elasticidad de la Guadua Angustifolia del municipio de Pitalito -Huila. Proyecto de Grado, Universidad Surcolombiana, Huila, Neiva*. <https://doi.org/https://doi.org/10.29097/2011-639x.182>
- Carantón García, L. A., & Molina Gordillo, J. F. (2021). *Estudio de la guadua como tubería para el diseño y construcción de drenaje agrícola en la USCO - Pitalito*.
- Carrillo Hernández, J. E., & Vidal Hidalgo, S. Y. (2021). *Determinación de coeficiente de rugosidad (n de Manning) en tubería de Guadua angustifolia Kunt para drenaje agrícola*. Universidad Surcolombiana.
- Cely, L. A. (2011). *La Guadua, Acero Vegetal Y Prodigio de la Naturaleza: Civilgeeks.Com*. <https://civilgeeks.com/2011/12/07/la-guadua-acero-vegetal-yprodigio-de-la-naturaleza/>
- Cisneros, R. (2003). DRENAJE Riego y Drenaje. In *Riego y drenaje*. <https://doi.org/https://doi.org/10.15517/ring.v4i1.7814>
- Claros Ortiz, A. V., & Burbano Ibarra, L. M. (2021). *Determinación de la resistencia a la compresión perpendicular a la fibra y módulo de elasticidad circunferencial de la Guadua angustifolia Kunth modificada como tubería de drenaje agrícola en el municipio de Pitalito*. Universidad Surcolombiana.
- Concrete Pipe Association of Australasia. (1997). *Concrete Pipe Facts*. <https://www.cpaasn.au/General/concrete-pipe-facts.html>
- Cornforth, D. (2005). *Landslides in Practice, Investigations, Analysis, and Remedial/Preventative*

Opciones In Soil. *Jhon Wiley and Sons Inc.*

- Cortez, P., Tzachkov, V., Rodríguez V., J. M., Caldiño Villagómez, I. A., Figueroa V, J., & Pellegrini M., F. (2016). *ESTUDIO DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE TUBERÍAS ETAPA II.*
- Cruz H., C. A. (2019). *DETERMINACIÓN DE CARACTERÍSTICAS DEL BAMBÚ COMO TUBERÍA TEMPORAL A TRAVÉS DEL MODELO DE UN BANCO HIDRÁULICO.* UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA.
- Davenport, M., & Skaggs, R. (1990). *Effects of drain envelope and slope on performance of a drainage - subirrigation system.*
- Davidson, B. (1913). *Agricultural Engineering. Agricultural Engineering.*
- Duarte T, M., Erazo, W. J., Barrios R, Y. F., & Joven, N. (2015). Actividades de manejo silvicultural asociadas a las propiedades físicas y mecánicas de la Guadua Angustifolia kunth en el municipio de Pitalito Silvicultural management activities associated with the physical and mechanical properties of Guadua Angustifol. *Ingeniería Hidráulica En México, 14(2), 75–85.*
- FAO. (2009). Materiales para sistemas de drenaje subterráneo. In *Estudio FAO Riego y Drenaje* (Vol. 60). <http://www.fao.org/3/a0258s/a0258s.pdf>
- FAO. (2020). *El Manejo de Suelos de Arcillas Expandibles.* Organización de Las Naciones Unidas Para La Alimentación y Agricultura. <https://doi.org/https://doi.org/10.5716/wp18007.pdf>
- FAO, (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura), & GTIS, (Grupo Técnico Intergubernamental del. (2016). Estado mundial del recurso del suelo (EMRS) - Resumen Técnico. In *Fao*. <http://www.fao.org/3/a-i5126s.pdf>
- Ferrer Polo, J., & Jiménez Sánchez, J. (1998). *Cálculo hidráulico de las Conducciones de Saneamiento y Drenaje. Valor de coeficiente de Rugosidad recomendado para la Fórmula de Manning. Informe de la cátedra de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Departamento de Ingeniería Hidráulica de la Universidad Po. ATHA.* <https://doi.org/https://doi.org/10.15517/ring.v17i2.7750>
- Ford, H. w. (1994). *Iron Ocre and related sludge deposits in subsurface drains lines.*
- García Jacho, C. A. (2019). *EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO Y MECÁNICO DE TUBOS DE HORMIGÓN ARMADO REVESTIDOS INTERNAMENTE CON POLIETILENO.* Universidad de Especialidades Espíritu Santo.
- Giraldo, H., & Sabogal, E. (2007). *Una alternativa sostenible: la Guadua técnicas de cultivo y manejo.* Corporación Autónoma Regional del Quindío C.R.Q.
- Hernández, A. (1994). Drenajes de tierras. *Universidad Del Valle, 3–17.*
- Hernandez Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Luico, M. del P. (2014). *Metología de la Investigación.* INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
- Hines, W., Montgomery, D., Goldsman, D., & Borrór, C. (2011). *Probabilidad y Estadística para Ingeniería.* Grupo editorial Patria.
- ICONTEC. (2013). *NTC 6028: Tuberías de drenaje de policloruro de vinilo rígido (pvc - u). Dimensiones, requisitos y ensayos.* Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificaciones.

- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificaciones ICONTEC. (2007). *NTC 5525 Métodos de ensayo para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la Guadua angustifolia Kunth* (p. 22).
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificaciones ICONTEC. (2009). *NTC 5726 Inventario de rodales de Guadua angustifolia Kunth para aprovechamientos con fines comerciales* (p. 10).
- Jaramillo, J. (2010). *DRENAJE AGRÍCOLA NOTAS DE CLASE*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE PALMIRA.
- Joaquín Amat, R. (2016). *Comparaciones múltiples: corrección de p-value y FDR*. Available under a Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) At. [https://www.cienciadedatos.net/documentos/19b\\_comparaciones\\_multiples\\_correccion\\_p-value\\_fdr](https://www.cienciadedatos.net/documentos/19b_comparaciones_multiples_correccion_p-value_fdr)
- Kumar, S., Shukla, K. S., Dev, T., & Dobriyal, P. B. (1994). *Bamboo Preservation Techniques: A Review*. INBAR; ICFRE.
- Lara, A. (2001). *Diseño Estadístico de Experimentos, Análisis de la Varianza y Temáticas Relacionadas*. Proyecto sur Ediciones.
- Leiton Soubannier, J. S. (1985). *Riego y Drenaje*. EUNED.
- Liese, W. (1998). The anatomy of bamboo culms. *INBAR Technical Report N° 18, 204*.
- Liota, M. A. (2012). *El drenaje de los suelos agrícolas*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. <https://doi.org/https://doi.org/10.14409/fa.v16i2.7020>
- LLerana, F. A., Fernández Reynoso, D., & Velas, Lópezco, O. (2017). *Drenaje superficial en terrenos agrícolas*. Editora Agrícola Española S.A.
- Londoño, X; (2002). *Distribución, Morfología, Taxonomía, Anatomía, Silvicultura y Usos de los bambúes del nuevo mundo*. Www.Hof-Landlust.de: <Http://Www.Hof-Landlust.de/Scb/Taller.Html>.
- Londoño, Ximena, Camayo, G. C., Riaño, N., & López, Y. (2002). Characterization of the anatomy of *Guadua angustifolia* (Poaceae: Bambusoideae) culms. *Bamboo Science and Culture*, 16(1), 18–31. [http://www.bamboo.org/publications/e107\\_files/downloads/ABSJournal-vol16.pdf#page=3](http://www.bamboo.org/publications/e107_files/downloads/ABSJournal-vol16.pdf#page=3)
- Ministerio de Fomento, Ministerio de Medio Ambiente, & CEDEX, C. de E. y E. de O. P. (2005). *Recomendaciones para tuberías de hormigón armado en redes de saneamiento y drenaje*. <https://doi.org/https://doi.org/10.2307/j.ctvn5twd2.15>
- Monge, M., Sánchez Delgado, M., Huanca Velarde, L., & Moreno Llacza, A. (2019). El bambú (*Guadua angustifolia* spp.) como alternativa de conducción para un sistema de riego por multicompuertas. *Anales Científicos*, 80 (1)(1), 240–252. <https://doi.org/https://doi.org/10.21704/ac.v80i1.1391>
- Montiel, M. (1998). El Bambú: revisión de su biología y cultivo. *Biología Tropical*, 46, 65–87.
- Mott, R. (2006). Mecánica de Fluidos. In *Mecánica de Fluidos: Vol. 3 ed.* [https://www.academia.edu/31396567/Mecánica\\_de\\_Fluidos\\_-\\_6ta\\_Edición\\_-\\_Robert\\_L.\\_Mott.pdf](https://www.academia.edu/31396567/Mecánica_de_Fluidos_-_6ta_Edición_-_Robert_L._Mott.pdf)
- Nijland, H. J., Croon, F. W., & Ritzema, H. . (2005). *Subsurface Drainage Practices: Guidelines*

- for the Implementation, Operation and Maintenance of Subsurface Pipe Drainage Systems. *ILRI Publication No. 60*.
- Nolberto Sifuentes, V. A., & Ponce Aruneri, M. E. (2008). *Estadística Inferencial Aplicada*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Noriega Ome, M. de los Á. (2018). *Caracterización de servicios ecosistémicos de la Guadua angustifolia Kunth en la cuenca baja del río Guarapas en Pitalito-Huila*. Universidad Nacional Abierta Y A Distancia – UNAD Escuela.
- Ortega, L., & Sagaldo, L. (2001). DRENAJES EN SUELOS AGRÍCOLAS. *INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS INIA - CARILLANCA*.
- PAVCO. (2005). *Manual técnico Tubosistemas uso agrícola PAVCO*.
- Pérez Porto, J., & Gardey, A. (2009). *Definición de drenaje*. Definicion.de: Definición de Drenaje. <https://doi.org/https://doi.org/10.2307/j.ctvhn0b3j.5>
- Pizarro, F. (1975). *Drenaje agrícola y recuperacion de suelos salinos*.
- Polón Pérez, R., Ruiz Sánchez, M., Dell'Amico Rodríguez, J. M., Morales Guevara, D., Jerez Mompié, E., Ramírez Arrebato, M. Á., & Maqueira López, A. (2011). PRINCIPALES BENEFICIOS QUE SE ALCANZAN CON LA PRÁCTICA ADECUADA DEL DRENAJE AGRÍCOLA Review Main benefits reached by the adequate practice of agricultural drainage. *Cultivos Tropicales.*, 32(2), 52–60.
- Portillo España, L. E. (2012). *CALIBRACIÓN DE VERTEDEROS DE PARED DELGADA PARA PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES*. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Qian, Y., Zhu, Y., Ye, M., Huang, J., & Wu, J. (2020). Experiment and numerical simulation for designing layout parameters of subsurface drainage pipes in arid agricultural areas. *Agricultural Water Management*, 243, 106455. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106455>
- Rius Díaz, F., Barón López, J., Guijosa Parras, L., & Sánchez Font, E. (1995). *Bioestadística . Métodos y aplicaciones*. Servicio de Publicaciones y Divulgación Científica de la Universidad de Málaga.
- Romero, R., & Zúnica, L. (2005). *Métodos estadísticos en ingeniería [online]*. Editorial Universidad Politécnica de Valencia. España. 2005. Universitat Politècnica de València. <https://doi.org/https://doi.org/10.18057/ijasc.2005.1.2.5>
- Sapuyes, E., Takeuchi T, C., Duarte T, M., & Erazo, W. J. (2018). Esistencia Y Elasticidad a La Flexión De La. *Revista de Investigación*, 11, 97–111. <https://revistas.uamerica.edu.co/index.php/rinv/article/view/182/180>
- Soto, M. (1994). El cultivo de banano, producción y comercialización: Planteamiento de una empresa bananera. *San José - CR. Pp 165 - 172*.
- Stuyt, L. C., Dierickx, W. ., & Martínez Beltrán, J. (2005). Materials for Subsurface Land Drainage Systems. Paper No. 60mRev. 1. *Food and Agricultural Organization of the United States: Rome, Italy*.
- Suarez, J. (2009). *Deslizamientos: Técnicas de Remediación*. Universidad Industrial de Santander.
- Takeuchi T, C., Duarte T., M., Alarcón, J. E., & Olarte F. Jairo. (2014). Estudio Multifactorial de

Resistencia última a Tensión Paralela a la Fibra en Muestra de *Guadua angustifolia* Kunth. *Revista de Ingeniería y Región*, 11, 85–90. <https://doi.org/https://doi.org/10.25054/22161325.745>

Takeuchi T, C., Duarte T., M., Capera O., A. F., & Erazo, W. J. (2012). Análisis de varianza multifactorial para resistencia última a la compresión paralela a la fibra en muestras de *Guadua Angustifolia* Kunth. *Ingeniería y Región*, 9, 53–61. <https://doi.org/10.25054/22161325.775>

TeChow, V. (2004). *Hidráulica de canales abiertos*. Illinois: McGraw-hill.

Teneche, G. (2007). *GUADUA BAMBU COLOMBIA*. <https://guaduybambu.es.tl/Estudio-6.htm>

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.*, 239-257.

UNIANDÉS, & PAVCO. (2009). *Determinación del coeficiente n Manning y rugosidad absoluta Ks de NOVAFORT 250mm*. <https://pavcowavin.com.co/determinacion-del-coeficiente-n-manning-y-rugosidad-absoluta-ks-de-novafort-250mm>

United States Department of Agriculture U.S.D.A. (1971). Section 16. Drainage of Agricultural Land. In *National Engineering Handbook* (pp. 55–57).

Valipour, M., Krasilnikof, J., Yannopoulos, S. I., Kumar, R., Deng, J., Roccaro, P., Mays, L., Grismer, M. E., & Angelakis, A. N. (2020). The evolution of agricultural drainage from the earliest times to the present. *Sustainability (Switzerland)*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/SU12010416>

Van Schilfhaarde, J. (1971). Drainage yesterday, today, and tomorrow. In Proceedings of the American Society of Agricultural Engineers (ASAE) National Drainage Symposium., *American Society of Agricultural Engineers: St. Joseph, MI, USA*.

Vatankhah, A. R. (2015). Analytical solution of gradually varied flow equation in circular channels using variable Manning coefficient. *Flow Measurement and Instrumentation*, 43, 53–58. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2015.04.004>

Velez, S. (2006). *La guadua Angustifolia “El bambu colombiano”*.

Villón Béjar, M. (2006). *Drenaje* (1ra. Edici). Editorial Tecnológica de Costa Rica.

Vlotman, W. F., Willardson, L. S., & Dierickx, W. (2000). Envelope Design for Subsurface Drains. *Publication No. 56; International Institute for Land Reclamation (ILRI):Wageningen, The Netherlands*.

Yannopoulos, S. I., Grismer, M. E., Bali, K. M., & Angelakis, A. N. (2020). Evolution of the materials and methods used for subsurface drainage of agricultural lands from antiquity to the present. *Water (Switzerland)*, 12(6). <https://doi.org/10.3390/w12061767>

## 13. ANEXOS

ANEXO A. Caracterización de culmos de guadua en campo.

Estudiantes: Mauricio Duarte Toro y Juan Manuel Silva Chavarro

 <b>CARACTERIZACIÓN CULMOS DE BAMBÚ (<i>Guadua angustifolia</i> Kunth)</b> <b>UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA</b> <b>FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES</b> <b>ESPECIALIZACIÓN EN ESTADÍSTICA</b>														   			
PAÍS: <u>Colombia</u>				MUNICIPIO: <u>Pitalito</u>				PREDIO: <u>Zanjones</u>									
DEPARTAMENTO: <u>Huila</u>				VEREDA: <u>Zanjones</u>				RESPONSABLE: <u>Andrés</u>				ÁREA (m <sup>2</sup> ): 9496					
PENDIENTE %: 1				RELIEVE: V ___ X ___ L ___ C ___				ELEVACIÓN (m): <u>1287</u>				COORDENADAS: 694348,2487 N; 1112605,5261 E.					
DATOS SOBRE LOS CULMOS																	
N°.	Estado de Madurez					DAP (cm)	Estado sanitario			Calidad del tallo				OBSERVACIONES			
	R	V	M	SM	S		SN	AI	AH	R	D	MD	P				
1			x			14,32	x								Se buscaron culmos lo más rectos posibles y diámetros externos similares.		
2			x			14,32	x										
3			x			13,53	x										
PAÍS: <u>Colombia</u>				MUNICIPIO: <u>Pitalito</u>				PREDIO: <u>Universidad Surcolombiana</u>									
DEPARTAMENTO: <u>Huila</u>				VEREDA: <u>El Macal</u>				RESPONSABLE: <u>Faiver Becerra</u>				ÁREA (m <sup>2</sup> ): 3580					
PENDIENTE %: 1				RELIEVE: V ___ X ___ L ___ C ___				ELEVACIÓN (m): <u>1277</u>				COORDENADAS: 693808,0038 N; 1115918,878 E					
N°.	Estado de Madurez					DAP (cm)	Estado sanitario			Calidad del tallo				OBSERVACIONES			
	R	V	M	SM	S		SN	AI	AH	R	D	MD	P				
1			x			14,32	x										
2			x			12,73	x										
3			x			13,05	x										
PAÍS: <u>Colombia</u>				MUNICIPIO: <u>Pitalito</u>				PREDIO: <u>La Chaquira</u>									
DEPARTAMENTO: <u>Huila</u>				VEREDA: <u>Santa Rosa</u>				RESPONSABLE: <u>Fabian Ortiz</u>				ÁREA (m <sup>2</sup> ): 5524					
PENDIENTE %: 1				RELIEVE: V ___ X ___ L ___ C ___				ELEVACIÓN (m): <u>1284</u>				COORDENADAS: 693429,2588 N; 1117990,3929 E					
N°.	Estado de Madurez					DAP (cm)	Estado sanitario			Calidad del tallo				OBSERVACIONES			
	R	V	M	SM	S		SN	AI	AH	R	D	MD	P				
1			x			12,73	x										
2			x			13,05	x										
3			x			12,73	x										
PAÍS: <u>Colombia</u>				MUNICIPIO: <u>Pitalito</u>				PREDIO: <u>Villa Fátima</u>									
DEPARTAMENTO: <u>Huila</u>				VEREDA: <u>Cálamo</u>				RESPONSABLE: <u>Julian Molina</u>				ÁREA (m <sup>2</sup> ): 6015					
PENDIENTE %: 1				RELIEVE: V ___ X ___ L ___ C ___				ELEVACIÓN (m): <u>1263</u>				COORDENADAS: 692485,4707 N; 1114237,6276 E					
N°.	Estado de Madurez					DAP (cm)	Estado sanitario			Calidad del tallo				OBSERVACIONES			
	R	V	M	SM	S		SN	AI	AH	R	D	MD	P				
1			x			14,32	x										
2			x			12,73	x										
3			x			12,73	x										

**Relieve:** Valle (V), Ladera (L), Cima (C). **Estado de madurez:** Renuevo (R), Verde (V), Madura (M), Sobremadura (SM), Seca (S). **Estado sanitario:** Sano (SN), Afectación por insectos (AI), Afectación por Hongos (AH). **Calidad del tallo:** Rajada (R), deforme (D), Muy deforme (MD), Partida (P). **Diámetro a la altura del pecho (1.30 m) en el internudo DAP.**

## ANEXO B. Formato solicitud de registro y aprovechamiento



### LISTA DE CHEQUEO REVISIÓN DE REQUISITOS MÍNIMOS PARA SOLICITUD DE REGISTRO Y/O APROVECHAMIENTO FLORA SILVESTRE NO MADERABLE CON FINES COMERCIALES (GUADUA, CAÑA BRAVA, BAMBÚ, OTROS)

Código: F-CAM-261

Versión: 2

Fecha: 13 May 19

La Corporación mediante la presente lista de chequeo enuncia la información general que debe presentar el interesado en obtener el registro y/o Permiso de Aprovechamiento Forestal de Flora Silvestre no maderables con fines comerciales (Guadua, Caña Brava, Bambú, entre otros) con base en la normatividad ambiental vigente.

No.	No. REGISTRO VITAL	SI	NO	NA	OBSERVACIONES
1	Anexar el No. del radicado en el aplicativo VITAL				
No.	DOCUMENTOS QUE DEBE ANEXAR	SI	NO	N/A	OBSERVACIONES
2	Formulario De Solicitud registro y/o Permiso de Aprovechamiento Forestal de Flora Silvestre (Guadua, Caña Brava, Bambú, entre otros debidamente diligenciado y firmado.				
<b>Documentos que acrediten la personería jurídica:</b>					
3	Fotocopia cédula de ciudadanía del solicitante				
4	Certificado de existencia y representación legal, con fecha de expedición no superior a tres meses.				
5	Si el solicitante es <b>Junta de Acción Comunal</b> : Certificado de existencia y representación legal. Personería Jurídica y/o Certificación e Inscripción de Dignatarios (expedida por la Gobernación).				
<b>Documentos que acrediten la calidad del solicitante frente al predio</b>					
6	<b>En caso de actuar como propietario:</b> Certificado de libertad y tradición (fecha de expedición no superior a 3 meses).				
7	<b>En caso de actuar como tenedor:</b> Copia del documento que lo acredite como tal (contrato de arrendamiento, comodato) y autorización del propietario o poseedor para adelantar el trámite respectivo.				
8	<b>En caso de actuar como Poseedor:</b> Manifestación escrita y firmada de tal calidad, acompañada de dos declaraciones extra juicio.				
9	Permisos de Servidumbre (cuando se trate de proyectos lineales - líneas eléctricas, oleoductos, Vías)				
10	Poder debidamente otorgado, cuando actúe como apoderado				
<b>Documentación técnica</b>					
11	Mapa del predio indicando la zona o áreas específicas (Georeferenciación) de los rodales en las cuales se pretende realizar el aprovechamiento y/o registro, según el caso. <b>(aplica para un volumen superior a 20 m3- 200 unidades de guadua)</b>				



**LISTA DE CHEQUEO REVISIÓN DE REQUISITOS MÍNIMOS  
PARA SOLICITUD DE REGISTRO Y/O APROVECHAMIENTO  
FLORA SILVESTRE NO MADERABLE CON FINES COMERCIALES  
(GUADUA, CAÑA BRAVA, BAMBÚ, OTROS)**

Código: F-CAM-261

Versión: 2

Fecha: 13 May 19

La Corporación mediante la presente lista de chequeo enuncia la información general que debe presentar el interesado en obtener el registro y/o Permiso de Aprovechamiento Forestal de Flora Silvestre no maderables con fines comerciales (Guadua, Caña Brava, Bambú, entre otros) con base en la normatividad ambiental vigente.

No.	DOCUMENTOS QUE DEBE ANEXAR	SI	NO	N/A	OBSERVACIONES
12	Plan de manejo y aprovechamiento forestal ( <u>aplica para un volumen superior a 20 m3- 200 unidades de guadua</u> ).				

DOCUMENTACIÓN COMPLETA

SI

NO

NOTA: EN CASO DE NO ESTAR COMPLETA LA DOCUMENTACIÓN CONFORME CON LOS REQUISITOS MÍNIMOS GENERALES PARA ACCEDER A LA SOLICITUD DEL PERMISO AMBIENTAL ANTE ESTA CORPORACIÓN, SERA DEVUELTO A FIN DE SER AJUSTADAS DE CONFORMIDAD CON LO SEÑALADO EN LA NORMATIVIDAD AMBIENTAL VIGENTE. SI EL USUARIO INSISTE EN SU RADICACIÓN LOS TERMINOS QUE TIENE PARA ALLEGAR LA DOCUMENTACIÓN COMPLEMENTARIA SERA DE 1 MES CONFORME AL ARTICULO 17 DE LA LEY 1755 de 2015.



**DATOS DEL USUARIO**

NOMBRE: \_\_\_\_\_

DIRECCIÓN: \_\_\_\_\_

FIRMA: \_\_\_\_\_

**FUNCIONARIO CAM**

NOMBRE: \_\_\_\_\_

FECHA: \_\_\_\_\_

FIRMA: \_\_\_\_\_

## ANEXO C. CALIBRACION DEL VERTEDERO

Para la calibración del vertedero tipo triangular 45° en la medición de caudales y utilizado en el banco hidráulico del proyecto, se realizaron dos metodologías. La primera mediante la obtención de la curva de calibración y la segunda mediante el cálculo de la ecuación de FRANCIS, esta última fue la utilizada en el trabajo de grado.

### Método Curva De Calibración

Se siguió el siguiente procedimiento:

#### Paso 1. Medición de caudales observados

Se procede a realizar aforos o mediciones de caudal al vertedero mediante el método volumétrico, teniendo en cuenta que para cada altura H en el vertedero se mide un volumen en recipiente calibrado y el tiempo en que se demora en llegar a dicho volumen. En la Tabla I se registra el procedimiento anterior para 9 ensayos.

**Tabla 23**

*Datos de aforos obtenidos de ensayos vertedero triangular de 45.*

H(cm)	t1(s)	vol 1 (l)	t2(s)	vol 2 (l)	t3(s)	vol 3 (l)
2,95	64,96	7,42258333	66,25	7,42558883	67,12	7,40154483
4,42	19,88	5,65134196	9,87	3,20586674	9,86	3,51142591
4,67	9,97	3,46333791	10,12	3,49339291	10,1	3,67572658
6,09	10,13	7,00782432	10,24	7,15910116	10,18	7,10400032
8,29	9,4	13,0959656	9,33	12,9156356	5,73	7,887434
9,58	7,95	14,290151	7,56	14,9193023	8,25	15,1036397
11,8	4,37	14,290151	4,55	14,9193023	4,7	15,1036397
12,46	5,81	20,5696424	5,72	20,5696424	5,64	20,5696425
13,17	4,1	17,1894567	3,74	15,450274	4,05	16,838815

Nota: Fuente propia

El caudal observado se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$Q_{obs} = V/t$$

Donde,  $Q_{obs}$ : Caudal observado (l/s), V: volumen= (l) y t: tiempo (s).

En la Tabla 2 se registra los caudales observados

**Tabla 24**

*Caudales observados*

H (cm)	Q <sub>obs1</sub> (l/s)	Q <sub>obs2</sub> (l/s)	Q <sub>obs3</sub> (l/s)	Q <sub>obs</sub> (prom)
2,95	0,114	0,112	0,11	0,112
4,42	0,284	0,325	0,356	0,322
4,67	0,347	0,345	0,364	0,352
6,09	0,692	0,699	0,698	0,696
8,29	1,393	1,384	1,377	1,385
9,58	1,798	1,973	1,831	1,867
11,8	3,27	3,279	3,214	3,254
12,46	3,54	3,596	3,647	3,595
13,17	4,193	4,131	4,158	4,16

Nota: Fuente propia

### 13.1.1.1 Paso 2. Ecuación del modelo

La ecuación usada para este modelo de medidores de caudal experimentalmente es del tipo exponencial, y está representada por la ecuación:

$$Q = K \cdot H^n$$

Los valores de H son conocidos (altura de nivel de agua sobre el vertedero) y se necesitan hallar los valores de K y n, estos se encuentran aplicando la siguiente ecuación:

$$\log Q_{obs} = \log K + \log H$$

Se observa que tiene la forma de la ecuación general de una recta:

$$Y = mX + b$$

Donde, Y = Log Q, m = n, X = Log H y b = Log K.

En la Tabla 3 se muestra los logaritmos a los caudales reales y a las alturas H.

**Tabla 25**

*Logaritmos de caudales y de alturas h (cargas)*

H(cm)	Qr=V/t (l/s)	Log H	Log Qobs
2,95	0,112	0,4698	-0,95
4,42	0,322	0,6454	-0,4925
4,67	0,352	0,6693	-0,4532
6,09	0,696	0,7846	-0,1572
8,29	1,385	0,9186	0,1413
9,58	1,867	0,9814	0,2712
11,8	3,254	1,0719	0,5124
12,46	3,595	1,0955	0,5556
13,17	4,16	1,1196	0,6191

Nota: Fuente propia

Posteriormente en la Gráfica 1 se enseña la relación de logaritmos de la altura H y del caudal  $Q_{obs}$ , agregando una línea de tendencia para hallar la ecuación de la recta que brinde el valor de **n** y de **K**, para completar la ecuación de calibración.

$$Y = mX + b$$

$$Y = 2,3836X - 2,0489$$

N = pendiente (2,3886)

$$K = \log^{-1} (-2,0489)$$

## ECUACION DE CALIBRACION

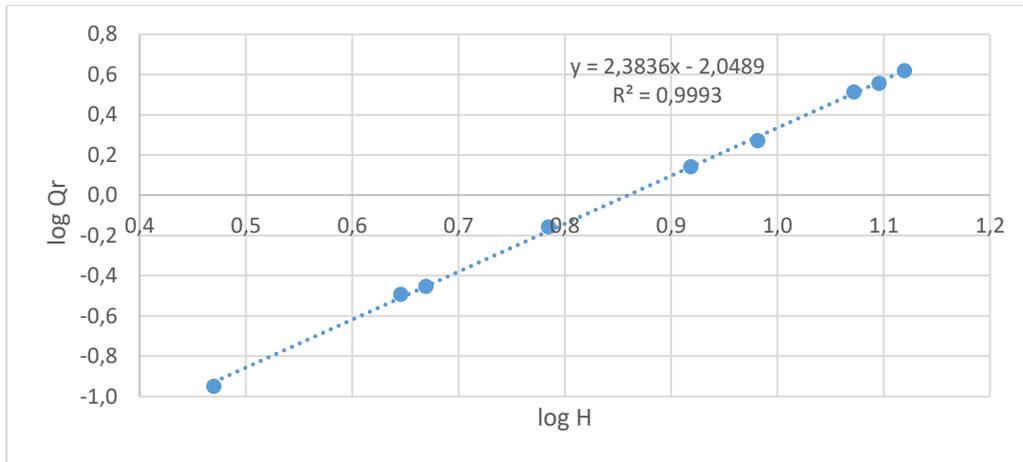
Ecuación de calibración:

$$Q_{\text{generado}} = K * H^n = 0,08935 * H^{2,3836}$$

Donde,  $Q_{\text{generado}}$  = Caudal generado (l/s) y  $H$  = Altura de lámina de agua sobre el vertedero (cm).

### Gráfica 1

*Log Qobs Vs log H*



Nota: Fuente propia

### Paso 3. Comparación caudales observados y generados

Con la ecuación de calibración, se procede a calcular los caudales generados, se comparan con los caudales observados y se estiman los porcentajes de error entre ambos caudales (Ver Tabla 4) y, por último, se realiza la curva de calibración de este vertedero.

### Tabla 26

*Porcentaje de error entre caudales observados y generados*

H (cm)	Qobservado (l/s)	Qgenerado con ecuación calibrada Q= 0,0089351H <sup>2,3836</sup>	error (%)
		(l/s)	
2,95	0,112	0,1178	4,7088
4,42	0,322	0,3087	4,2251
4,67	0,352	0,352	0,0615
6,09	0,696	0,6627	5,0639
8,29	1,385	1,3822	0,1798
9,58	1,867	1,9511	4,2992
11,8	3,254	3,2065	1,4857
12,46	3,595	3,6507	1,5389

13,17

4,16

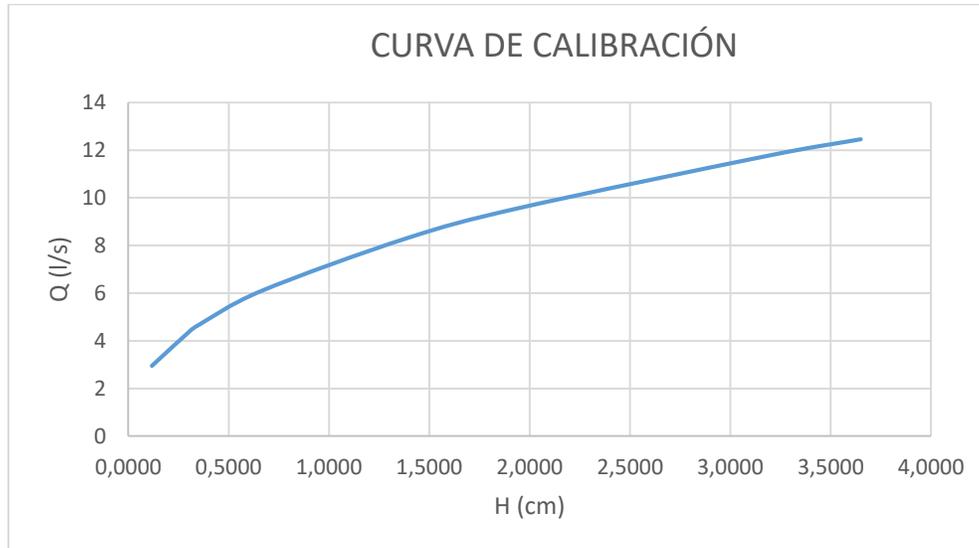
4,1662

0,1389

Nota: Fuente propia

## Gráfica 2

Curva de calibración del vertedero.



Nota: Fuente propia

Método ecuación de Francis

En este método para encontrar el caudal real en vertederos triangulares, es necesario aplicar un coeficiente de descarga a la ecuación general, con el objetivo de corregirlas o ajustarlas.

La ecuación general para vertederos triangulares a 45° es:

$$Q_{teorico} = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) H^{\frac{5}{2}}$$

Donde,  $Q_{teórico}$  = Caudal teórico ( $m^3/s$ ) y  $H$  = Altura de la aguja limnimétrica (cm).

Sustituyendo los valores y realizando conversiones, se obtiene:

$$Q_{teórico} = \frac{8}{15} \sqrt{2 * 9.81} \tan\left(\frac{45}{2}\right) H^{\frac{5}{2}} * 1000$$

$$Q_{real} = C_d * 0,009785 H^{\frac{5}{2}}$$

Donde,  $Q_{real}$  y  $Q_{teórico}$  = l/s y,  $H$  = cm.

Paso 1. Calculo de caudales teóricos

Se procede a calcular los caudales teóricos mediante el uso de la ecuación general para vertederos triangulares a 45° y se elabora la Tabla 5.

**Tabla 27**

*Tabla Caudales observados y teóricos*

H(cm)	Qobservado (l/s)	Qteorico (l/s)
2,95	0,11	0,1463
4,42	0,32	0,4019
4,67	0,35	0,4612
6,09	0,7	0,8956
8,29	1,38	1,9362
9,58	1,87	2,7796
11,8	3,25	4,6803
12,46	3,59	5,3625
13,17	4,16	6,1594

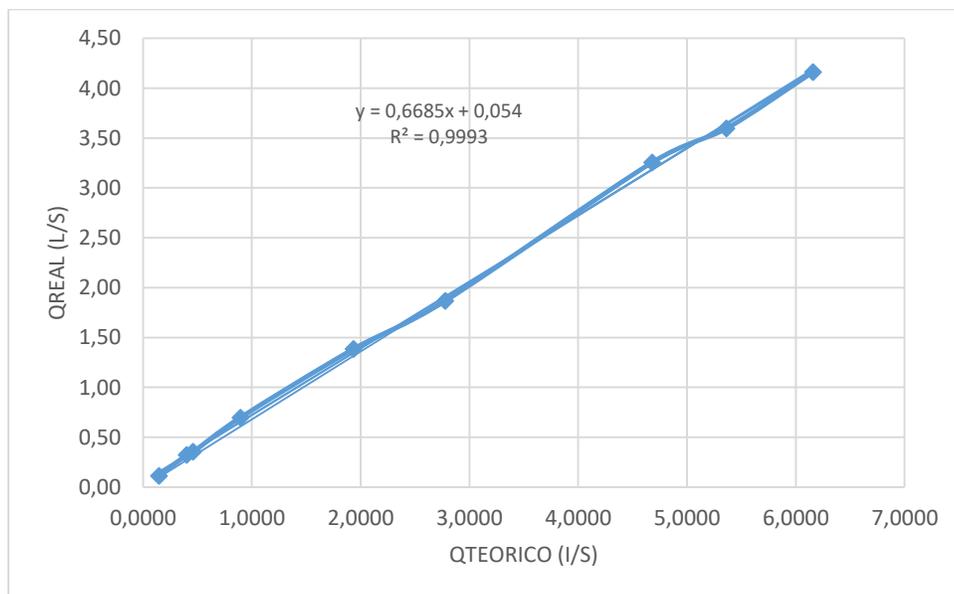
Nota: Fuente propia

Paso 2. Determinación del coeficiente de descarga (cd).

Para la determinación del coeficiente de descarga se procede a realizar el Gráfica 3 de Caudal real contra Caudal teórico.

**Gráfica 3**

*Caudal Real Vs Caudal Teórico*



Nota: Fuente propia

El coeficiente de descarga será el valor de la pendiente de la línea de tendencia:

$$C_d = 0,6685$$

Paso 3. Cálculo de la ecuación corregida de caudal.

Con el  $C_d$  anteriormente hallado, se procede a encontrar la ecuación corregida de caudal.

$$Q_{real} = 0,6685 * 0,009785H^{\frac{5}{2}}$$

Paso 4. Comparación de los caudales teóricos y corregidos

En la tabla VI, se muestran los valores de los caudales con la ecuación general de vertederos triangulares a  $45^\circ$  y con la ecuación corregida de la misma.

**Tabla 28**

*Comparación de caudal teórico y caudal corregido*

H(cm)	Q observado (l/s)	Q teórico (l/s)	Q corregido (l/s)
2,95	0,112	0,1463	0,0978
4,42	0,322	0,4019	0,2687
4,67	0,352	0,4612	0,3083
6,09	0,696	0,8956	0,5987
8,29	1,385	1,9362	1,2943
9,58	1,867	2,7796	1,8581
11,8	3,254	4,6803	3,1287
12,6	3,595	5,3625	3,5847
13,1	4,16	6,1594	4,1174

Nota: Fuente propia

Comparación de los caudales observados, caudales con la ecuación calibrada y con la ecuación corregida.

En la Tabla VII se muestran los caudales observados, generados con la ecuación calibrada (METODO 1) y con la ecuación corregida (METODO 2). En la gráfica IV, se muestran la comparación de dichos caudales.

**Tabla 29**

*Caudales observados, generados y corregidos*

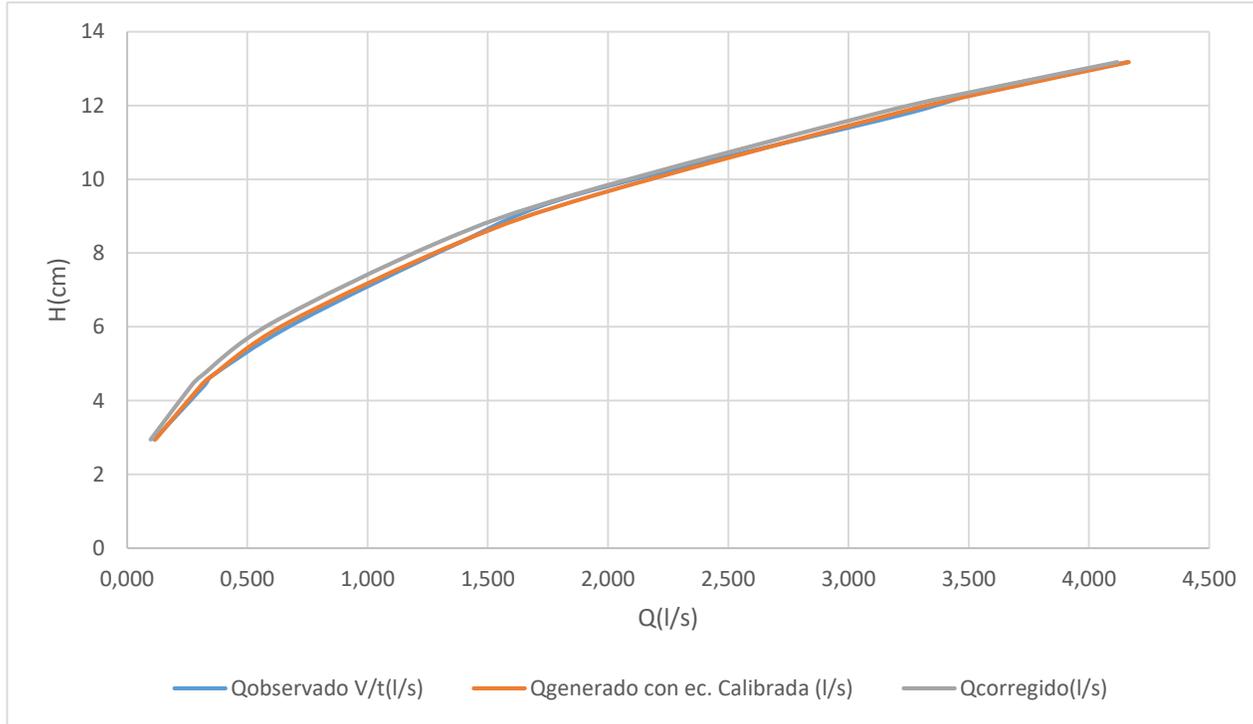
H(cm)	Qobservado V/t (l/s)	Qgenerado Calibrada (l/s)	Ec. (l/s)	Qcorregido (l/s)
2,95	0,112	0,1178		0,0978
4,42	0,322	0,3087		0,2687
4,67	0,352	0,352		0,3083
6,09	0,696	0,6627		0,5987
8,29	1,385	1,3822		1,2943

9,58	1,867	1,9511	1,8581
11,8	3,254	3,2065	3,1287
12,46	3,595	3,6507	3,5847
13,17	4,16	4,1662	4,1174

Nota: Fuente propia

**Tabla 30**

*Comparación de caudales*



Nota: Fuente propia.

## ANEXO D: Registro fotográfico.

*Registro fotográfico del paso a paso de actividad*

Visita a predios, corte de culmos y extracción después del proceso de avinagrado.		
		
		
		
Extracción de culmos, lavado de las secciones del culmo, corte de probetas y perforación de tabique transversal.		



Marcación y perforación lateral de probetas, medición y caracterización de acuerdo al rótulo y pruebas del modelo hidráulico en la sede regional Pitalito, de la Universidad Surcolombiana.



## ANEXO E. Ficha técnica.

ROT. PROB.	Diámetro ext. Promedio (m)			Espesor promedio (m)			Diámetro int promedio (m)			Área (m <sup>2</sup> )			Pend.	Cabeza (lectura aguja limnimétrica h cm)						Tirante																	
	INICIAL	FINAL	Prom	Inicial	Final	Prom	Inicial	Final	Prom	Inicial	Final	Prom		1	Prom	2	Prom	3	Prom	1			2			3											
																				Cot. Media	Md_pie (m)	Prom	Y1	Md_pie (m)	Prom	Y2	Md_pie (m)	Prom	Y3								
Z1N1I	0,133	0,126	0,1000	0,017	0,015	0,0100	0,0983	0,0960	0,0971	0,0076	0,0074	0,0075	0,01	28,50	5,70	5,70	27,94	5,14	5,14	30,08	7,28	7,28	0,657	0,111	0,111	0,026	0,111	0,106	0,106	0,021	0,126	0,126	0,126	0,126	0,126	0,041	
														28,50	5,70		27,96	5,16		30,09	7,29						0,111				0,106						0,126
														28,49	5,69		27,93	5,13		30,09	7,29						0,111				0,106						0,126
Z1N1M	0,121	0,107	0,1137	0,015	0,013	0,0139	0,0908	0,0812	0,0860	0,0065	0,0058	0,0061	0,01	27,55	4,75	4,74	29,50	6,70	6,71	28,00	5,20	5,19	0,650	0,098	0,098	0,030	0,098	0,116	0,116	0,048	0,103	0,103	0,103	0,035			
														27,54	4,74		29,50	6,70		28,00	5,20						0,098				0,116				0,103		
														27,52	4,72		29,52	6,72		27,98	5,18						0,097				0,116				0,103		
Z1N1S	0,094	0,083	0,0888	0,012	0,010	0,0113	0,0700	0,0626	0,0663	0,0038	0,0034	0,0036	0,01	28,31	5,51	5,51	29,90	7,10	7,10	33,20	10,40	10,40	0,645	0,132	0,132	0,047	0,132	0,139	0,139	0,054	0,146	0,146	0,146	0,061			
														28,30	5,50		29,90	7,10		33,20	10,40						0,132				0,139				0,146		
														28,31	5,51		29,90	7,10		33,20	10,40						0,132				0,139				0,146		
Z1N2I	0,139	0,129	0,1340	0,026	0,017	0,0214	0,0869	0,0955	0,0912	0,0059	0,0065	0,0062	0,01	27,05	4,25	4,23	29,03	6,23	6,23	30,72	7,92	7,92	0,665	0,123	0,123	0,052	0,123	0,143	0,143	0,072	0,157	0,157	0,157	0,087			
														27,04	4,24		29,07	6,27		30,74	7,94						0,123				0,143				0,157		
														27,00	4,20		29,00	6,20		30,69	7,89						0,122				0,143				0,157		
Z1N2M	0,129	0,121	0,1248	0,016	0,014	0,0150	0,0976	0,0918	0,0947	0,0075	0,0070	0,0073	0,01	28,80	6,00	5,99	29,42	6,62	6,64	31,41	8,61	8,61	0,655	0,104	0,104	0,041	0,104	0,115	0,115	0,052	0,129	0,129	0,129	0,066			
														28,78	5,98		29,43	6,63		31,41	8,61						0,104				0,115				0,129		
														28,78	5,98		29,47	6,67		31,41	8,61						0,104				0,115				0,129		
Z1N2S	0,100	0,091	0,0956	0,015	0,011	0,0128	0,0710	0,0693	0,0701	0,0040	0,0039	0,0039	0,01	28,00	5,20	5,20	30,43	7,63	7,63	31,20	8,40	8,43	0,649	0,110	0,110	0,026	0,110	0,131	0,131	0,047	0,138	0,138	0,138	0,054			
														28,00	5,20		30,43	7,63		31,20	8,40						0,110				0,131				0,138		
														28,00	5,20		30,43	7,63		31,30	8,50						0,110				0,131				0,138		
Z1N3I	0,140	0,139	0,1395	0,025	0,022	0,0233	0,0893	0,0963	0,0928	0,0063	0,0068	0,0065	0,01	30,96	8,16	8,15	32,11	9,31	9,28	27,39	4,59	4,56	0,672	0,136	0,136	0,062	0,136	0,123	0,123	0,049	0,085	0,085	0,085	0,011			
														30,95	8,15		32,07	9,27		27,38	4,58						0,136				0,123				0,085		
														30,94	8,14		32,05	9,25		27,30	4,50						0,136				0,123				0,085		
Z1N3M	0,122	0,114	0,1179	0,016	0,013	0,0143	0,0909	0,0877	0,0893	0,0065	0,0063	0,0064	0,01	27,73	4,93	4,91	28,32	5,52	5,54	30,55	7,75	7,76	0,659	0,101	0,101	0,028	0,101	0,108	0,108	0,035	0,125	0,125	0,125	0,052			
														27,72	4,92		28,33	5,53		30,55	7,75						0,101				0,108				0,125		
														27,69	4,89		28,37	5,57		30,57	7,77						0,101				0,108				0,125		
Z1N3S	0,113	0,105	0,1089	0,014	0,012	0,0132	0,0838	0,0812	0,0825	0,0055	0,0053	0,0054	0,01	30,27	7,47	7,47	29,19	6,39	6,38	32,45	9,65	9,66	0,648	0,118	0,118	0,048	0,118	0,107	0,107	0,037	0,142	0,142	0,142	0,072			
														30,28	7,48		29,15	6,35		32,45	9,65						0,118				0,107				0,142		
														27,40	4,60		28,67	5,87		30,28	7,48						0,096				0,106				0,117		
Z2N1I	0,133	0,129	0,1310	0,019	0,012	0,0155	0,0961	0,1039	0,1000	0,0073	0,0079	0,0076	0,01	27,37	4,57	4,58	28,67	5,87	5,87	30,29	7,49	7,49	0,658	0,096	0,096	0,036	0,096	0,107	0,107	0,046	0,118	0,118	0,118	0,057			
														27,37	4,57		28,68	5,88		30,30	7,50						0,096				0,107				0,118		
														28,00	5,20		28,70	5,90		31,25	8,45						0,097				0,105				0,121		
Z2N1M	0,125	0,119	0,1217	0,013	0,010	0,0115	0,0994	0,0979	0,0986	0,0078	0,0076	0,0077	0,01	28,00	5,20	5,20	28,73	5,93	5,92	31,26	8,46	8,44	0,663	0,097	0,097	0,026	0,097	0,105	0,105	0,034	0,121	0,121	0,121	0,050			
														27,99	5,19		28,74	5,94		31,22	8,42						0,097				0,105				0,121		
														29,22	6,42		30,28	7,48		31,90	9,10						0,124				0,131				0,148		
Z2N1S	0,112	0,106	0,1089	0,013	0,012	0,0125	0,0864	0,0815	0,0839	0,0059	0,0055	0,0057	0,01	29,23	6,43	6,43	30,29	7,49	10,49	31,90	9,10	9,10	0,650	0,124	0,124	0,052	0,124	0,131	0,131	0,059	0,148	0,148	0,148	0,076			
														29,23	6,43		30,29	7,49		31,91	9,11						0,124				0,131				0,148		
														28,50	5,70		30,17	7,37		29,42	6,62						0,097				0,112				0,107		
Z2N2I	0,132	0,127	0,1296	0,016	0,015	0,0155	0,1005	0,0968	0,0986	0,0079	0,0076	0,0078	0,01	28,49	5,69	6,02	30,15	7,35	7,34	29,41	6,61	6,62	0,662	0,097	0,097	0,031	0,097	0,112	0,112	0,046	0,107	0,107	0,107	0,041			
														29,47	6,67		30,10	7,30		29,42	6,62						0,096				0,112				0,107		
														28,90	6,10		30,75	7,95		31,75	8,95						0,108				0,122				0,133		
Z2N2M	0,117	0,115	0,1162	0,012	0,011	0,0118	0,0932	0,0921	0,0926	0,0068	0,0067	0,0068	0,01	28,90	6,10	6,10	30,75	7,95	7,95	31,74	8,94	8,94	0,655	0,108	0,108	0,039	0,108	0,122	0,122	0,053	0,133	0,133	0,133	0,064			
														28,90	6,10		30,75	7,95		31,74	8,94						0,108				0,122				0,133		
														32,20	9,40		30,83	8,03		30,25	7,45						0,151				0,135				0,173		
Z2N2S	0,106	0,097	0,1013	0,013	0,010	0,0114	0,0800	0,0771	0,0786	0,0050	0,0048	0,0049	0,01	32,20	9,40	9,40	30,82	8,02	8,02	30,25	7,45	7,45	0,651	0,151	0,151	0,072	0,151	0,135	0,135	0,056	0,173	0,173	0,173	0,094			
														32,20	9,40		30,80	8,00		30,25	7,45						0,151				0,135				0,173		
														29,47	6,67		30,50	7,70		27,67	4,87						0,105				0,113				0,090		
Z2N3I	0,146	0,141	0,1433	0,019	0,015	0,0173	0,1073	0,1102	0,1088	0,0090	0,0093	0,0092	0,01	29,45	6,65	6,65	30,50	7,70	7,70	27,68	4,88	4,87	0,666	0,104	0,104	0,046	0,104	0,113	0,113	0,055	0,089	0,089	0,089	0,031			
														29,44	6,64		30,51	7,71		27,66	4,86						0,104				0,113				0,089		
														28,39	5,59		28,95	6,15		35,40	12,60						0,106				0,112				0,127		
Z2N3M	0,140	0,132	0,1357	0,016	0,014	0,0148	0,1084	0,1038	0,1061	0,0092	0,0088	0,0090	0,01	28,37	5,57	5,57	28,92	6,12	6,13	35,70	12,90	12,83	0,662	0,106	0,106	0,047	0,106	0,112	0,112	0,053	0,127	0,127	0,127	0,068			
														28,34	5,54		28,91	6,11		35,80	13,00						0,106				0,112				0,127		
														28,37	5,57		29,33	6,53		30,70	7,90						0,104				0,115				0,124		
Z2N3S	0,132	0,116	0,1237	0,017	0,011	0,0143	0,0971	0,0930	0,0951	0,0074	0,0071	0,0073	0,01	28,37	5,57	5,58	29,3																				



ROT. PROB.	RADIO HIDRÁULICO												Caudal l/s						n de Manning		
	1				2				3				1	PROM	2	PROM	3	PROM	1	2	3
	$\theta (y < D/2)$	$\theta (y > D/2)$	$\theta$	RH	$\theta (y < D/2)$	$\theta (y > D/2)$	$\theta$	RH	$\theta (y < D/2)$	$\theta (y > D/2)$	$\theta$	RH									
Z1N1I	2,19366	4,08952	2,1937	0,0153	1,9543	4,3288	1,9543	0,0128	2,8454	3,4378	2,8454	0,0218	0,5074	0,5067	0,3918	0,3924	0,9354	0,9375	0,09115	0,10430	0,06238
													0,5074		0,3956		0,9386				
													0,5052		0,3899		0,9386				
Z1N1M	2,50398	3,77920	2,5040	0,0164	2,9307	3,3525	3,3525	0,0228	2,7763	3,5069	2,7763	0,0187	0,3217	0,3194	0,7601	0,7620	0,4033	0,4021	0,12396	0,06484	0,10766
													0,3200		0,7601		0,4033				
													0,3166		0,7657		0,3995				
Z1N1S	2,30905	3,97413	3,9741	0,0196	1,8152	4,4680	4,4680	0,0202	1,1943	5,0889	5,0889	0,0196	0,4662	0,4655	0,8786	0,8786	2,2816	2,2816	0,05703	0,03074	0,01161
													0,4641		0,8786		2,2816				
													0,4662		0,8786		2,2816				
Z1N2I	2,84756	3,43562	3,4356	0,0247	1,8915	4,3917	4,3917	0,0277	0,9044	5,3787	5,3787	0,0261	0,2436	0,2407	0,6337	0,6346	1,1547	1,1535	0,21970	0,08997	0,04758
													0,2421		0,6439		1,1620				
													0,2365		0,6261		1,1438				
Z1N2M	2,86115	3,42204	2,8611	0,0214	2,9561	3,3270	3,3270	0,0250	2,3440	3,9392	3,9392	0,0280	0,5768	0,5736	0,7376	0,7432	1,4229	1,4229	0,09748	0,08347	0,04701
													0,5720		0,7404		1,4229				
													0,5720		0,7516		1,4229				
Z1N2S	2,61152	3,67167	2,6115	0,0141	2,4540	3,8292	3,8292	0,0204	2,0085	4,2747	4,2747	0,0212	0,4033	0,4033	1,0519	1,0519	1,3377	1,3511	0,05664	0,02776	0,02218
													0,4033		1,0519		1,3377				
													0,4033		1,0519		1,3779				
Z1N3I	2,46446	3,81873	3,8187	0,0270	3,0232	3,2600	3,2600	0,0240	1,3936	4,8896	1,3936	0,0068	1,2442	1,2404	1,7300	1,7145	0,2953	0,2900	0,04729	0,03166	0,08077
													1,2404		1,7114		0,2936				
													1,2366		1,7022		0,2810				
Z1N3M	2,35854	3,92465	2,3585	0,0157	2,6880	3,5952	2,6880	0,0187	2,8287	3,4545	3,4545	0,0243	0,3530	0,3500	0,4683	0,4726	1,0937	1,0961	0,11402	0,09506	0,04885
													0,3512		0,4704		1,0937				
													0,3459		0,4790		1,1008				
Z1N3S	2,82769	3,45550	3,4555	0,0225	2,9203	3,3629	2,9203	0,0191	1,4805	4,8027	4,8027	0,0249	0,9976	0,9987	0,6752	0,6717	1,9070	1,8972	0,04327	0,05769	0,02440
													0,9976		0,6752		1,8923				
													1,0010		0,6647		1,8923				
Z2N1I	2,55302	3,73017	2,5530	0,0196	2,9880	3,2952	2,9880	0,0237	2,8541	3,4291	3,4291	0,0271	0,2969	0,2942	0,5461	0,5469	1,0010	1,0043	0,18651	0,11408	0,06784
													0,2936		0,5461		1,0043				
													0,2920		0,5484		1,0077				
Z2N1M	2,16462	4,11857	2,1646	0,0152	2,5173	3,7659	2,5173	0,0189	3,1070	3,1762	3,1762	0,0249	0,4033	0,4027	0,5531	0,5586	1,3577	1,3550	0,11748	0,09797	0,04852
													0,4033		0,5601		1,3617				
													0,4014		0,5625		1,3457				
Z2N1S	2,63736	3,64583	3,6458	0,0238	2,2829	4,0003	4,0003	0,0249	1,2137	5,0695	5,0695	0,0249	0,6831	0,6849	1,0010	3,0797	1,6341	1,6355	0,06870	0,01578	0,02965
													0,6858		1,0043		1,6341				
													0,6858		7,2339		1,6385				
Z2N2I	2,37009	3,91310	2,3701	0,0174	3,0109	3,2723	3,0109	0,0236	2,8066	3,4766	2,8066	0,0218	0,5074	0,5881	0,9646	0,9548	0,7376	0,7366	0,08892	0,06707	0,08240
													0,5052		0,9580		0,7348				
													0,7516		0,9418		0,7376				
Z2N2M	2,84227	3,44092	2,8423	0,0208	2,8339	3,4493	3,4493	0,0252	2,3386	3,9446	3,9446	0,0274	0,6012	0,6012	1,1657	1,1657	1,5675	1,5646	0,08511	0,04994	0,03933
													0,6012		1,1657		1,5632				
													0,6012		1,1657		1,5632				
Z2N2S	1,17941	5,10378	5,1038	0,0232	2,2665	4,0167	4,0167	0,0234	#¡NUM!	#¡NUM!	#¡NUM!	#¡NUM!	1,7721	1,7721	1,1952	1,1903	0,9910	0,9910	0,02265	0,03390	
													1,7721		1,1915		0,9910				
													1,7721		1,1841		0,9910				
Z2N3I	2,84472	3,43847	2,8447	0,0244	3,1186	3,1646	3,1646	0,0274	2,2664	4,0168	2,2664	0,0180	0,7516	0,7469	1,0762	1,0774	0,3424	0,3424	0,10319	0,07728	0,18370
													0,7460		1,0762		0,3441				
													0,7432		1,0797		0,3406				
Z2N3M	2,90904	3,37415	2,9090	0,0244	3,1358	3,1474	3,1358	0,0265	2,5743	3,7089	3,7089	0,0304	0,4833	0,4783	0,6136	0,6078	3,6863	3,8606	0,15903	0,13206	0,02278
													0,4790		0,6061		3,9096				
													0,4725		0,6036		3,9858				
Z2N3S	2,69684	3,58634	2,6968	0,0200	3,0918	3,1914	3,1914	0,0241	2,7241	3,5591	3,5591	0,0265	0,4790	0,4804	0,7128	0,7201	1,1474	1,1450	0,11117	0,08414	0,05628
													0,4790		0,7237		1,1474				
													0,4833		0,7237		1,1402				
Z3N1I	2,64332	3,63987	2,6433	0,0190	2,9167	3,3665	3,3665	0,0248	2,2730	4,0101	4,0101	0,0276	0,6858	0,6778	1,1804	1,1730	1,8678	1,8743	0,06893	0,04748	0,03198
													0,6752		1,1657		1,8874				



## ANEXO F. Verificación de supuestos del modelo

### Verificación de supuestos

A continuación, se muestran las hipótesis iniciales de media cero, normalidad, homocedasticidad e independencia de los residuos.

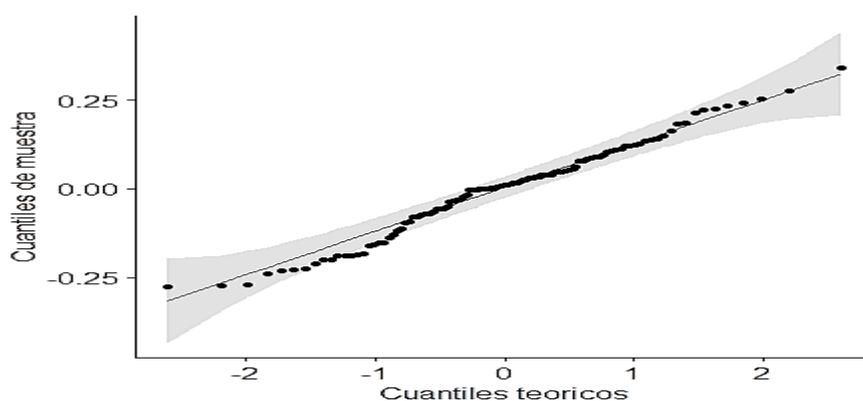
#### **Media Cero**

Con el test t - student's se acepta la hipótesis nula  $H_0$ : media = cero (0), con p-value 1.

#### **Normalidad de los residuos**

Como prueba para verificar que efectivamente los datos provienen de una distribución normal se presenta el gráfico de probabilidad normal de residuos, en donde se observa que los datos se acomodan a lo largo de la línea de referencia que pasa a través de la mediana (determinada por el rango intercuartílico), lo cual representa efectivamente la normalidad entre los datos (ver figura 1).

**Figura 19. Gráfico de probabilidad normal.**



Nota: Fuente propia (adaptada del R-Studio).

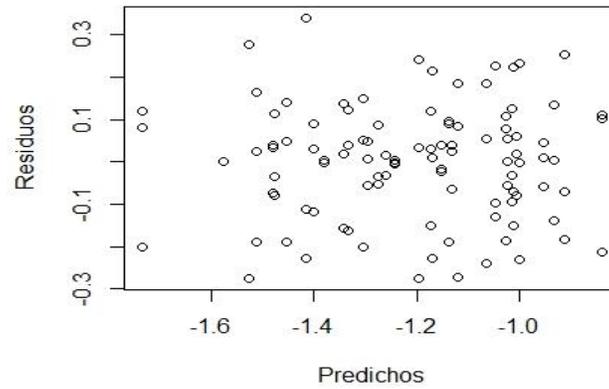
Con el test de Shapiro-Wilk (0,230) se acepta la  $H_0$ : distribución normal en los residuos.

#### **Prueba de homocedasticidad**

Se comprobó mediante la prueba de Levene's la igualdad de las varianzas arrojando un p-value de 0, 8778. Por lo tanto, se acepta la hipótesis nula  $H_0$ : Varianza constante, es decir que hay homocedasticidad.

Igualmente, se verificó la homocedasticidad en el gráfico de residuos frente a valores predichos de resistencia, en él se observa que no existe un patrón general en forma de embudo formado por los puntos por lo que no hay indicios de heterocedasticidad (ver figura 2).

**Figura 20. Gráfico de varianza constante**



***Independencia de los residuos***

La dispersión aleatoria en la figura 3, es una prueba de la representatividad de las muestras, se deduce, que no existe ninguna correlación serial entre los datos, dicho de otra forma, no existe dependencia entre las observaciones.

**Figura 21. Gráfico de independencia de residuos.**

