

**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA: INGENIERÍA CIVIL**

**TÍTULO:**

**Obtención de las propiedades mecánicas y estructurales de  
la caña Guadúa Angustifolia Kunth del Ecuador.**

**AUTOR:**

**Córdova Alcívar, Pedro Luis**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**TUTOR:**

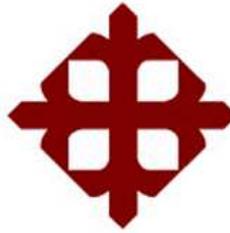
**Ing. Mera Ortíz, Walter Vicente, PHD**

**DIRECTOR:**

**Prof. Dr. Ing. Antonio La Tegola**

**Guayaquil, Ecuador**

**2014**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA: INGENIERÍA CIVIL**

## **CERTIFICACIÓN**

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por **Córdova Alcívar, Pedro Luis**, como requerimiento parcial para la obtención del Título de **Ingeniero Civil**.

### **TUTOR**

\_\_\_\_\_  
**Ing. Mera Ortiz, Walter Vicente, PHD**

### **REVISOR(ES)**

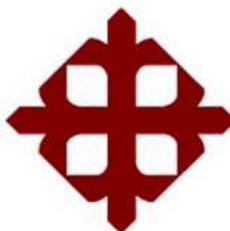
\_\_\_\_\_  
**Ing. Yépez Roca, Luis Octavio**

\_\_\_\_\_  
**Lcda. Baño Pazmiño, Sonia Margarita**

### **DIRECTOR DE LA CARRERA**

\_\_\_\_\_  
**Ing. Dueñas Rossi, Mario**

**Guayaquil, a los 22 del mes de abril del año 2014**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA: INGENIERÍA CIVIL**

## **DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

**Yo, Pedro Luis Córdova Alcívar**

### **DECLARO QUE:**

El Trabajo de Titulación **Obtención de las propiedades mecánicas y estructurales de la caña Guadúa Angustifolia Kunth del Ecuador**, previa a la obtención del Título **de Ingeniero Civil**, ha sido desarrollado en base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

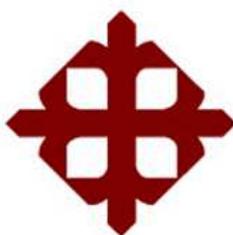
En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del Trabajo de Titulación referido.

**Guayaquil, a los 22 del mes de abril del año 2014**

**EL AUTOR**

---

**Pedro Luis Córdova Alcívar**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA: INGENIERÍA CIVIL**

## **AUTORIZACIÓN**

Yo, **Pedro Luis Córdova Alcívar**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: **Obtención de las propiedades mecánicas y estructurales de la caña Guadúa Angustifolia Kunth del Ecuador**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

**Guayaquil, a los 22 del mes de abril del año 2014**

**EL AUTOR:**

---

**Pedro Luis Córdova Alcívar**

## **AGRADECIMIENTO**

**A mis padres, por haberme apoyado y alentado en todo momento desde mis primeros años de vida y darme la oportunidad de prepararme como profesional.**

**A mi querido Tutor Ing. Walter Mera Ortiz por haberme dado la oportunidad de desarrollar este tema.**

**Al Arq. Jorge Morán Ubidia por su guía, orientación y tiempo durante este proceso, por demostrar esa pasión por el bambú.**

**Al Ing. Octavio Yépez por su colaboración y dedicación incondicional en la elaboración de los ensayos para determinar resultados correctos.**

**Al Prof. Dr. Ing. Antonio La Tegola por los consejos brindados durante la elaboración de este trabajo de grado.**

**Pedro Luis Córdova Alcívar**

## **DEDICATORIA**

**A mi familia, por apoyarme, acompañarme, transmitirme esas enseñanzas, experiencias y principios para mi desarrollo personal a lo largo de mi vida.**

**Pedro Luis Córdova Alcívar**

# **TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

---

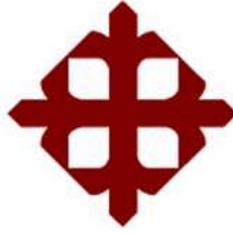
**ING. MERA ORTÍZ, WALTER VICENTE, PHD**

PROFESOR GUÍA Ó TUTOR

---

**ING. YÉPEZ ROCA, LUIS OCTAVIO**

PROFESOR DELEGADO



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA: INGENIERÍA CIVIL**

**CALIFICACIÓN**

---

**ING. MERA ORTÍZ, WALTER VICENTE, PHD**

## ÍNDICE GENERAL

<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>24</b>
<b>1.1 RAZONES QUE MOTIVARON EL ESTUDIO</b> .....	<b>24</b>
<b>1.2 JUSTIFICACION DEL TEMA:</b> .....	<b>24</b>
1.2.1 Desde el punto de vista científico: .....	24
1.2.2 De su pertinencia social: .....	26
<b>1.3 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN O DE LA SITUACIÓN PROBLEMÁTICA:</b> .....	<b>29</b>
<b>1.4 OBJETO DE ESTUDIO, CARACTERÍSTICAS, ENTORNO EN QUE SE INSERTA:</b> .....	<b>30</b>
<b>1.5 CONTEXTUALIZACIÓN EN TIEMPO Y ESPACIO, ESTABLECIMIENTO DE LOS MARCOS EN LOS QUE EL TRABAJO SE DESARROLLA:</b> .....	<b>30</b>
<b>1.6 OBJETIVOS:</b> .....	<b>31</b>
1.6.1 Objetivo general:.....	31
1.6.2 Objetivos específicos:.....	31
<b>1.7 HIPÓTESIS:</b> .....	<b>32</b>
<b>1.8 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN:</b> .....	<b>32</b>
<b>1.9 METODOLOGÍA:</b> .....	<b>32</b>
<b>CAPÍTULO 2: CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA CAÑA GUADÚA</b> .....	<b>34</b>
<b>2.1 DESCRIPCIÓN CIENTÍFICA</b> .....	<b>34</b>
<b>2.2 ZONIFICACIÓN Y CULTIVO</b> .....	<b>40</b>
<b>2.3 IMPACTO ECOLÓGICO</b> .....	<b>45</b>
<b>2.4 PRODUCCIÓN NACIONAL</b> .....	<b>49</b>
<b>2.5 DURABILIDAD DE LA CAÑA GUADÚA</b> .....	<b>51</b>
<b>2.6 PRESERVACIÓN DE LA CAÑA GUADÚA</b> .....	<b>54</b>
<b>CAPÍTULO 3: PROPIEDADES GEOMÉTRICAS DE LA CAÑA GUADÚA</b>	<b>58</b>

<b>3.1</b>	<b>LA ESTRUCTURA VEGETAL DE LA CAÑA GUADÚA:</b>	<b>58</b>
<b>3.2</b>	<b>INFLUENCIA DE LAS PROPIEDADES Y RELACIONES GEOMÉTRICAS EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA CAÑA GUADÚA</b>	<b>60</b>
<b>3.3</b>	<b>PROPIEDADES GEOMÉTRICAS DE LA CAÑA GUADÚA</b>	<b>63</b>
<b>3.4</b>	<b>INFLUENCIA DE LAS DEFORMACIONES NATURALES DE LA CAÑA</b>	<b>66</b>
3.4.1	Ensayos en columnas	67
3.4.2	Comportamiento de columnas en guadúa	68
3.4.3	Pandeo	68
3.4.4	La caña guadúa esbelta sometida a flexo compresión	69
<b>3.5</b>	<b>ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS PROPIEDADES GEOMÉTRICAS DE LA CAÑA GUADÚA</b>	<b>70</b>
3.5.1	Análisis estadístico de las propiedades geométricas de la caña guadúa como el diámetro exterior, espesor y longitud del entrenudo...	84
3.5.2	Análisis estadístico de las relaciones geométricas de la caña guadúa como el espesor contra diámetro exterior (Esp/Dext), diámetro interior contra diámetro exterior (Dint/Dext), diámetro exterior contra longitud de entrenudo (Dext/S. Int).	88
3.5.3	Análisis estadístico de la imperfección vertical de las cañas guadúa	92
<b>CAPÍTULO 4: PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA CAÑA GUADÚA</b>		<b>100</b>
<b>4.1</b>	<b>MARCO TEÓRICO</b>	<b>100</b>
<b>4.2</b>	<b>NATURALEZA ORTOTRÓPICA DE LA CAÑA GUADÚA</b>	<b>107</b>
<b>4.3</b>	<b>MÓDULO DE ELASTICIDAD</b>	<b>108</b>
<b>4.4</b>	<b>PROPIEDADES MECÁNICAS COMUNES DE LOS MATERIALES.</b>	<b>109</b>
<b>4.5</b>	<b>ENSAYOS DE FLEXION</b>	<b>111</b>
<b>4.6</b>	<b>ENSAYOS DE COMPRESIÓN</b>	<b>115</b>
<b>4.7</b>	<b>ENSAYOS DE TENSIÓN</b>	<b>116</b>

4.8	VARIABLES DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS.....	118
<b>CAPÍTULO 5: METODOLOGÍA DE LOS ENSAYOS.....</b>		<b>119</b>
5.1	NORMAS ISO 22157-1:2004.....	119
5.1.1	COMPRESIÓN .....	120
5.1.2	FLEXIÓN .....	124
5.1.3	CORTE .....	130
5.1.4	TENSIÓN.....	133
<b>CAPITULO 6: ENSAYOS .....</b>		<b>138</b>
6.1	INTRODUCCIÓN .....	138
6.2	PREPARACIÓN DE EQUIPOS DE ENSAYOS DE CORTE.....	140
6.3	PREPARACIÓN DE EQUIPOS DE ENSAYOS DE COMPRESIÓN.. .....	143
6.4	PREPARACIÓN DE EQUIPOS DE ENSAYOS DE FLEXIÓN.....	146
6.5	PREPARACIÓN DE EQUIPOS DE ENSAYOS DE TENSIÓN ....	150
<b>CAPITULO 7: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....</b>		<b>155</b>
7.1	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	155
7.2	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE CORTE .	155
7.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE COMPRESIÓN PARALELA A LA FIBRA.....	158
7.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE TENSIÓN PARALELA A LA FIBRA .....	168
7.5	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE FLEXIÓN.... .....	176
7.6	RESULTADOS PRODUCTO DE LOS ENSAYOS .....	192
8:	<b>CONCLUSIONES:</b> .....	<b>193</b>
9:	<b>RECOMENDACIONES:</b> .....	<b>197</b>
10:	<b>BIBLIOGRAFÍA:</b> .....	<b>198</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Condiciones de siembra</i> .....	40
<i>Tabla 2: Ciclo biológico.</i> .....	44
<i>Tabla 3: Beneficios de la siembra de la caña guadúa.</i> .....	46
<i>Tabla 4: Total de muestras de caña guadúa para análisis geométrico.</i> .....	71
<i>Tabla 5: Análisis geométrico de las relaciones <b>espesor contra diámetro exterior (Esp/Dext), diámetro interior contra diámetro exterior (Dint/Dext), diámetro medio (Dm), diámetro exterior contra longitud de entrenudo (Dext/S. Int).</b></i> .....	77
<i>Tabla 6: Análisis estadístico del diámetro exterior de las cañas guadúa.</i> ...	85
<i>Tabla 7: Análisis estadístico del espesor de la pared de las cañas guadúa.</i> .....	86
<i>Tabla 8: Análisis estadístico de la longitud de entrenudo de las cañas guadúa.</i> .....	87
<i>Tabla 9: Análisis estadístico de la relación (Esp/Dext) de las cañas guadúa.</i> .....	88
<i>Tabla 10: Propiedades geométricas y mecánicas de la caña guadúa de acuerdo a la relación (Esp/Dext) = 0.0823 con un fratil del 5%.</i> .....	89
<i>Tabla 11: Propiedades geométricas y mecánicas de la caña guadúa de acuerdo a la relación (Esp/Dext) = 0.070 con un fratil del 5%.</i> .....	90
<i>Tabla 12: Análisis estadístico de la relación (Dint/Dext) de las cañas guadúa.</i> .....	90
<i>Tabla 13: Análisis estadístico de la relación (Dext/S. Int) de las cañas guadúa.</i> .....	92
<i>Tabla 14: Muestras para el análisis de la imperfección natural de la no verticalidad que tienen las cañas guadúa.</i> .....	92
<i>Tabla 15: Análisis estadístico de la imperfección vertical de las cañas guadúa.</i> .....	93
<i>Tabla 16: Variables que se obtendrán producto de los ensayos:</i> .....	118
<i>Tabla 17: Muestras de los resultados de los ensayos y cálculo del esfuerzo cortante de muestras de caña guadúa.</i> .....	155
<i>Tabla 18: Análisis estadístico del esfuerzo último de fuerzas cortantes.</i> ....	155

<i>Tabla 19: Muestras de los resultados de los ensayos y cálculo del esfuerzo de compresión último de caña guadúa.....</i>	<i>158</i>
<i>Tabla 20: Análisis estadístico del esfuerzo de compresión último de caña guadúa. ....</i>	<i>158</i>
<i>Tabla 21: Cálculo del módulo de elasticidad de caña guadúa sometida a compresión paralela a la fibra. ....</i>	<i>166</i>
<i>Tabla 22: Análisis estadístico del módulo de elasticidad de caña guadúa de compresión paralela a la fibra. ....</i>	<i>167</i>
<i>Tabla 23: Muestras de los resultados de los ensayos y cálculo del esfuerzo de tensión última de caña guadúa.....</i>	<i>168</i>
<i>Tabla 24: Análisis estadístico del esfuerzo de tensión última de caña guadúa. ....</i>	<i>168</i>
<i>Tabla 25: Cálculo del módulo de elasticidad de caña guadúa sometida a tensión paralela a la fibra. ....</i>	<i>170</i>
<i>Tabla 26: Análisis estadístico del módulo de elasticidad de caña guadúa de tensión paralela a la fibra. ....</i>	<i>170</i>
<i>Tabla 27: Propiedades geométricas de las muestras de caña guadúa para el ensayo de flexión. ....</i>	<i>176</i>
<i>Tabla 28: Propiedades geométricas de las muestras de caña guadúa para el ensayo de flexión. ....</i>	<i>176</i>
<i>Tabla 29: Propiedades geométricas de las muestras de caña guadúa para el ensayo de flexión. ....</i>	<i>177</i>
<i>Tabla 30: Longitudes de las luces libres de las muestras de caña guadúa para el ensayo de flexión.....</i>	<i>178</i>
<i>Tabla 31: Resultados de los ensayos y cálculo del esfuerzo de flexión última de caña guadúa.....</i>	<i>179</i>
<i>Tabla 32: Análisis estadístico del esfuerzo de flexión último de caña guadúa. ....</i>	<i>179</i>
<i>Tabla 33: Cálculo del módulo de elasticidad último de caña guadúa sometida a flexión. Método 1.....</i>	<i>189</i>
<i>Tabla 34: Análisis estadístico del módulo de elasticidad último de caña guadúa de flexión. Método 1. ....</i>	<i>189</i>
<i>Tabla 35: Cálculo del módulo de elasticidad del 50% del esfuerzo último de caña guadúa sometida a flexión. Método 1.....</i>	<i>189</i>

<i>Tabla 36: Análisis estadístico del módulo de elasticidad del 50% del esfuerzo último de caña guadúa de flexión. Método 1. ....</i>	<i>190</i>
<i>Tabla 37: Cálculo del módulo de elasticidad último de caña guadúa sometida a flexión. Método 2.....</i>	<i>190</i>
<i>Tabla 38: Análisis estadístico del módulo de elasticidad último de caña guadúa de flexión. Método 2. ....</i>	<i>190</i>
<i>Tabla 39: Cálculo del módulo de elasticidad del 50% del esfuerzo último de caña guadúa sometida a flexión. Método 2.....</i>	<i>191</i>
<i>Tabla 40: Análisis estadístico del módulo de elasticidad del 50% del esfuerzo último de caña guadúa de flexión. Método 2. ....</i>	<i>191</i>
<i>Tabla 41: Resultados de las variables producto de los ensayos.....</i>	<i>192</i>

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<i>Figura 1: plantaciones de caña guadúa en Quevedo, provincia de Los Ríos.</i> .....	34
<i>Figura 2: plantaciones de caña guadúa en Bucay, provincia del Guayas. ...</i>	35
<i>Figura 3: partes principales de un culmo de guadúa.....</i>	36
<i>Figura 4: partes principales de un culmo de guadúa.....</i>	37
<i>Figura 5: partes principales de un culmo de guadúa.....</i>	38
<i>Figura 6: partes principales de un tallo de caña guadúa.....</i>	39
<i>Figura 7: partes principales de un culmo de guadúa.....</i>	40
<i>Figura 8: región donde se encuentra caña guadúa en Ecuador.....</i>	41
<i>Figura 9: caña guadúa angustifolia.....</i>	45
<i>Figuras 10 y 11: caña guadúa angustifolia.....</i>	47
<i>Figura 12: caña guadúa angustifolia.....</i>	48
<i>Figura 13: Selección de la caña a cortar.....</i>	50
<i>Figura 14: Tocón de caña guadúa recién cortado.....</i>	50
<i>Figura 15: Transportación de la caña recién cortada.....</i>	51
<i>Figura 16: Preservación por inmersión en químicos.....</i>	57
<i>Figura 17: Variación del diámetro exterior de la caña guadúa vs. el diámetro interior. A medida que aumenta el diámetro exterior aumenta el diámetro interior. Son directamente proporcionales.....</i>	75
<i>Figura 18: Variación del diámetro exterior de la caña guadúa vs. la longitud de entrenudo. A medida que disminuye el diámetro exterior, aumenta la longitud del entrenudo.....</i>	76
<i>Figura 19: Variación del diámetro exterior de la caña guadúa vs. el espesor de la pared de la caña. A medida que aumenta el diámetro exterior aumenta el espesor de la pared de la caña. ....</i>	76
<i>Figura 20: Variación de la longitud del entrenudo de la caña guadúa vs. el espesor de la pared de la caña. A medida que disminuye la longitud del entrenudo disminuye el espesor de la pared de la caña. ....</i>	77
<i>Figura 21: Variación de la longitud del entrenudo de la caña guadúa vs. la relación (Espesor/Diámetro exterior). A medida que aumenta la relación (Esp/Dext) disminuye la longitud del entrenudo. ....</i>	81

<i>Figura 22: Variación de la longitud del entrenudo de la caña guadúa vs. la relación (Espesor/Diámetro exterior). A medida que aumenta la relación (Dint/Dext) aumenta la longitud del entrenudo. ....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 23: Variación del espesor de la pared de la caña guadúa vs. la relación (Diámetro exterior/Longitud de entrenudo). A medida que aumenta la relación (Dext/S. Int) aumenta el espesor de la pared de la caña. ....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 24: Variación de la relación (Espesor/Diámetro exterior) de la caña guadúa vs. la relación (Diámetro interior/diámetro exterior). A medida que aumenta la relación (Dint/Dext) disminuye la relación (Esp/Dext). ....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 25: Variación de la relación (Espesor/Diámetro exterior) de la caña guadúa vs. la relación (Diámetro exterior/longitud de entrenudo). A medida que aumenta la relación (Dext/S. Int) aumenta la relación (Esp/Dext). ....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 26: Variación de la relación (Diámetro interior/Diámetro exterior) de la caña guadúa vs. la relación (Diámetro exterior/longitud de entrenudo). A medida que aumenta la relación (Dext/S. Int) disminuye la relación (Dint/Dext). ....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 27: Análisis estadístico del diámetro exterior de la caña guadúa. ....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 28: Análisis estadístico del espesor de la caña guadúa. ....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 29: Análisis estadístico de la longitud de entrenudo de la caña guadúa. ....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 30: Análisis estadístico de la relación (Espesor/Diámetro exterior). ..</i>	<i>88</i>
<i>Figura 31: Análisis estadístico de la relación (Diámetro interior/Diámetro exterior). ....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 32: Análisis estadístico de la relación (Diámetro exterior/Longitud de entrenudo). ....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 33: Análisis estadístico de la imperfección vertical de las cañas guadúa. ....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 34: Variación de la relación imperfección vertical de la caña guadúa vs. la relación (Espesor/Diámetro exterior). ....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 35: Variación de la relación imperfección vertical de la caña guadúa vs. la longitud de entrenudos. A medida que aumenta la longitud de entrenudos disminuye la imperfección vertical de la caña guadúa. ....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 36: Variación de la relación imperfección vertical de la caña guadúa vs. la relación (Diámetro interior/Diámetro exterior). ....</i>	<i>95</i>

<i>Figura 37: Variación de la relación imperfección vertical de la caña guadúa vs. el diámetro exterior.</i>	95
<i>Figura 38: Variación de la relación imperfección vertical de la caña guadúa vs. el espesor de la pared de la caña.</i>	96
<i>Figura 39: Variación de la relación imperfección vertical de la caña guadúa vs. la relación (Diámetro exterior/Longitud de entrenudo).</i>	96
<i>Figura 40: cañas guadúa en Quevedo para las mediciones de las propiedades geométricas.</i>	97
<i>Figura 41: cañas guadúa en Bucay para las mediciones de las propiedades geométricas.</i>	97
<i>Figura 42: cañas guadúa en Bucay para las mediciones de las propiedades geométricas.</i>	98
<i>Figuras 43 y 44: mediciones de propiedades geométricas de las cañas guadúa en La Mana, provincia de Cotopaxi.</i>	98
<i>Figura 45: mediciones de propiedades geométricas de las cañas guadúa en La Mana, provincia de Cotopaxi con calibrador Vernier.</i>	99
<i>Figura 46: naturaleza orto trópica de la caña guadúa.</i>	108
<i>Figura 47: esquema del ensayo a flexión.</i>	113
<i>Figuras 48 y 49: Cañas guadúa angustifolia Kunth de Quevedo, Ecuador almacenadas en la planta de Ecomateriales de la UCSG en Duran, Guayas.</i>	139
<i>Figura 50: Cañas guadúa angustifolia Kunth de Quevedo, Ecuador almacenadas en la planta de Ecomateriales de la UCSG en Duran, Guayas.</i>	139
<i>Figuras 51, 52 y 53: Cañas guadúa angustifolia Kunth de Quevedo, Ecuador almacenadas en la planta de Ecomateriales de la UCSG en Duran, Guayas.</i>	140
<i>Figura 54: Muestras de caña guadúa ensayadas en los equipos de corte, con nudo y sin nudo.</i>	141
<i>Figura 55: Placas huecas en cuadrantes opuestos para formar los planos de falla en el ensayo de corte.</i>	141
<i>Figura 56: Ensayo de corte en la máquina de compresión simple. La muestra debe estar centrada.</i>	142

<i>Figuras 57 y 58: Mecanismo de falla del ensayo de corte al llegar a la resistencia ultima al esfuerzo cortante. ....</i>	<i>142</i>
<i>Figura 59: Elaboración de una muestra de caña guadúa sin nudo para el ensayo de compresión paralela a la fibra. ....</i>	<i>143</i>
<i>Figuras 60 y 61: Placa elaborada para el ensayo de compresión libre de fricción en la muestra y ocurra el deslizamiento horizontal. ....</i>	<i>144</i>
<i>Figuras 62 y 63: Ensayo de compresión simple paralela a la fibra. ....</i>	<i>144</i>
<i>Figuras 64 y 65: Mecanismo de falla del ensayo de compresión al llegar a la resistencia ultima a la compresión paralela a la fibra. ....</i>	<i>145</i>
<i>Figuras 66 y 67: Strain gauge instalados en las muestras de compresión para poder medir la deformación a medida que se aumente la carga y poder determinar el modulo de elasticidad de la caña guadúa. ....</i>	<i>145</i>
<i>Figuras 68 y 69: Apoyos articulados en los extremos. ....</i>	<i>147</i>
<i>Figuras 70 y 71: Apoyos centrales en los cuales se distribuye la aplicación de la carga del gato. ....</i>	<i>147</i>
<i>Figuras 72 y 73: Ensayo de flexión de 4 puntos de carga puntual en una caña guadúa. El gato aplica una fuerza P que se transmite a la viga metálica y se divide en fuerzas P/2 sobre los apoyos centrales de aplicación de las cargas. Se utilizaron los deformímetros para poder medir las deformaciones a medida que se aumenta la carga aplicada a la caña guadúa y poder medir su deformación máxima cuando se llega al máximo esfuerzo por flexión. ....</i>	<i>148</i>
<i>Figura 74: Caña guadúa pandeada antes de llegar a la falla debido a las cargas de flexión. ....</i>	<i>149</i>
<i>Figura 75: Mecanismo de falla a flexión de la caña guadúa. Existe una falla por compresión de las fibras superiores debido a que la lignina que une las fibras falla. No fallan las fibras sometidas a tensión debido a que son más resistentes. ....</i>	<i>149</i>
<i>Figura 76: Muestras de tiras de caña guadúa, con una reducción de su área en el centro, para el ensayo de tensión. ....</i>	<i>150</i>
<i>Figura 77: Strain gauges colocados en la sección de medición. ....</i>	<i>151</i>
<i>Figura 78 y 79: Elaboración de los agarres en los extremos de las muestras. ....</i>	<i>152</i>
<i>Figuras 80, 81, 82, 83 y 84: Ensayo de tensión paralela a la fibra. ....</i>	<i>153</i>
<i>Figura 85: Mecanismo de falla de muestras de caña guadúa a tensión. ....</i>	<i>154</i>

<i>Figura 86: Análisis estadístico del esfuerzo cortante último de la caña guadúa.</i> .....	156
<i>Figura 87: Variación del esfuerzo cortante último de la caña guadúa vs. el área sometida a corte. A medida que aumenta el área de corte, disminuye el esfuerzo cortante en la caña.</i> .....	156
<i>Figura 88: Variación del esfuerzo cortante último de la caña guadúa vs. el espesor de la pared de la caña. A medida que aumenta el espesor se tiene un menor esfuerzo cortante en la caña.</i> .....	157
<i>Figura 89: Variación del esfuerzo cortante último de la caña guadúa vs. el diámetro exterior de la caña.</i> .....	157
<i>Figura 90: Análisis estadístico del esfuerzo a compresión paralela a la fibra último de la caña guadúa.</i> .....	159
<i>Figura 91: Variación del esfuerzo a compresión paralela a la fibra último de la caña guadúa vs. el espesor de la pared de la caña. A medida que aumenta el espesor de la pared de la caña, aumenta la resistencia a compresión.</i> .....	159
<i>Figura 92: Variación del esfuerzo a compresión paralela a la fibra último de la caña guadúa vs. el diámetro exterior de la caña.</i> .....	160
<i>Figura 93: Variación del esfuerzo a compresión paralela a la fibra último de la caña guadúa vs. la relación entre el espesor y el diámetro exterior de la caña.</i> .....	160
<i>Figura 94: Curva del esfuerzo de compresión paralela a la fibra vs. la deformación unitaria de la muestra CP1.</i> .....	161
<i>Figura 95: Curva del esfuerzo de compresión paralela a la fibra vs. la deformación unitaria de la muestra CP2.</i> .....	161
<i>Figura 96: Curva del esfuerzo de compresión paralela a la fibra vs. la deformación unitaria de la muestra CP3.</i> .....	162
<i>Figura 97: Curva del esfuerzo de compresión paralela a la fibra vs. la deformación unitaria de la muestra CP4.</i> .....	162
<i>Figura 98: Curva del esfuerzo de compresión paralela a la fibra vs. la deformación unitaria de la muestra CP5.</i> .....	163
<i>Figura 99: Curva del esfuerzo de compresión paralela a la fibra vs. la deformación unitaria de la muestra CP6.</i> .....	163

<i>Figura 100: Curva del esfuerzo de compresión paralela a la fibra vs. la deformación unitaria de la muestra CP7.</i>	164
<i>Figura 101: Curva del esfuerzo de compresión paralela a la fibra vs. la deformación unitaria de la muestra CP9.</i>	164
<i>Figura 102: Curva del esfuerzo de compresión paralela a la fibra vs. la deformación unitaria de la muestra CP10.</i>	165
<i>Figura 103: Curva del esfuerzo de compresión paralela a la fibra vs. la deformación unitaria de la muestra CP11.</i>	165
<i>Figura 104: Curva del esfuerzo de compresión paralela a la fibra vs. la deformación unitaria de la muestra CP12.</i>	166
<i>Figura 105: Análisis estadístico del esfuerzo a tensión paralela a la fibra último de la caña guadúa.</i>	169
<i>Figura 106: Curva del esfuerzo de tensión paralela a la fibra vs. la deformación unitaria de la muestra T1.</i>	171
<i>Figura 107: Curva del esfuerzo de tensión paralela a la fibra vs. la deformación unitaria de la muestra T2.</i>	171
<i>Figura 108: Curva del esfuerzo de tensión paralela a la fibra vs. la deformación unitaria de la muestra T3.</i>	172
<i>Figura 109: Curva del esfuerzo de tensión paralela a la fibra vs. la deformación unitaria de la muestra T4.</i>	172
<i>Figura 110: Curva del esfuerzo de tensión paralela a la fibra vs. la deformación unitaria de la muestra T6.</i>	173
<i>Figura 111: Curva del esfuerzo de tensión paralela a la fibra vs. la deformación unitaria de la muestra T7.</i>	173
<i>Figura 112: Curva del esfuerzo de tensión paralela a la fibra vs. la deformación unitaria de la muestra T8.</i>	174
<i>Figura 113: Curva del esfuerzo de tensión paralela a la fibra vs. la deformación unitaria de la muestra T10.</i>	174
<i>Figura 114: Curva del esfuerzo de tensión paralela a la fibra vs. la deformación unitaria de la muestra T11.</i>	175
<i>Figura 115: Curva del esfuerzo de tensión paralela a la fibra vs. la deformación unitaria de la muestra T12.</i>	175
<i>Figura 116: Esquema del ensayo de flexión en una muestra de caña guadúa.</i>	177

<i>Figura 117: Esquema del ensayo de flexión en una muestra de caña guadúa. Gráfico del momento flector. ....</i>	<i>178</i>
<i>Figura 118: Análisis estadístico del esfuerzo a flexión último de la caña guadúa. ....</i>	<i>180</i>
<i>Figura 119: Variación del esfuerzo de flexión último de la caña guadúa vs. la inercia. A medida que aumenta el valor de la inercia, aumenta el valor del esfuerzo flector máximo. ....</i>	<i>180</i>
<i>Figura 120: Variación del esfuerzo de flexión último de la caña guadúa vs. el radio de giro. A medida que aumenta el valor del radio de giro, aumenta el valor del esfuerzo flector máximo. ....</i>	<i>181</i>
<i>Figura 121: Variación del esfuerzo de flexión último de la caña guadúa vs. la longitud de la muestra. ....</i>	<i>181</i>
<i>Figura 122: Variación del esfuerzo de flexión último de la caña guadúa vs. el peso de la muestra. La tendencia parece concluir en que es muy probable que una caña pesada resista mucho más que una caña más liviana de aproximadamente las mismas dimensiones. ....</i>	<i>182</i>
<i>Figura 123: Variación del esfuerzo de flexión último de la caña guadúa vs. el promedio de la separación de los nudos de la muestra. La tendencia parece concluir en que es muy probable que una caña guadúa con separación de entrenudos mayor pueda resistir más que una de separación menor de entrenudos. ....</i>	<i>182</i>
<i>Figura 124: Variación del esfuerzo de flexión último de la caña guadúa vs. el diámetro medio de la caña guadúa. A medida que la relación del diámetro medio aumenta, probablemente la resistencia a la flexión de la caña guadúa aumentará. ....</i>	<i>183</i>
<i>Figura 125: Variación del esfuerzo de flexión último de la caña guadúa vs. la relación entre el espesor y el diámetro exterior de la caña guadúa. A medida que la relación entre el espesor y el diámetro exterior aumenta, probablemente la resistencia a la flexión de la caña guadúa aumentará. .</i>	<i>183</i>
<i>Figura 126: Variación del esfuerzo de flexión último de la caña guadúa vs. la relación entre la longitud de la muestra y el diámetro medio de la caña guadúa. ....</i>	<i>184</i>
<i>Figura 127: Curva del esfuerzo de flexión vs. la deformación en el centro de la muestra Flex1. ....</i>	<i>184</i>

<i>Figura 128: Curva del esfuerzo de flexión vs. la deformación en el centro de la muestra Flex2.....</i>	<i>185</i>
<i>Figura 129: Curva del esfuerzo de flexión vs. la deformación en el centro de la muestra Flex4.....</i>	<i>185</i>
<i>Figura 130: Curva del esfuerzo de flexión vs. la deformación en el centro de la muestra Flex5.....</i>	<i>186</i>
<i>Figura 131: Curva del esfuerzo de flexión vs. la deformación en el centro de la muestra Flex6.....</i>	<i>186</i>
<i>Figura 132: Curva del esfuerzo de flexión vs. la deformación en el centro de la muestra Flex7.....</i>	<i>187</i>
<i>Figura 133: Curva del esfuerzo de flexión vs. la deformación en el centro de la muestra Flex8.....</i>	<i>187</i>
<i>Figura 134: Curva del esfuerzo de flexión vs. la deformación en el centro de la muestra Flex9.....</i>	<i>188</i>
<i>Figura 135: Curva del esfuerzo de flexión vs. la deformación en el centro de la muestra Flex10.....</i>	<i>188</i>

## RESUMEN

El principal objetivo de este trabajo de investigación es la determinación de las propiedades mecánicas de la caña Guadúa Angustifolia Kunth de Ecuador, a través de la metodología experimental determinar los valores de la resistencia a la compresión, a la tensión, al cortante, a la flexión y su módulo de elasticidad. Se realizaron ensayos estructurales a muestras de caña guadúa obtenidas de plantaciones de Valencia, provincia de Los Ríos, Ecuador, para poder dar un soporte ingenieril y científico a este trabajo. Las muestras fueron sometidas a ensayos de compresión, tensión, corte y flexión. La metodología cuantitativa dio base al trabajo empírico de la investigación, constituido por siete variables independientes y ajustadas a través de la revisión bibliográfica. La metodología de diseño se basa en la mecánica estructural, la ISO 22157. El conjunto de las variables será explicado a través del estudio de la información estadística. Los resultados de los ensayos permitieron determinar los valores característicos de las variables de estudio, con los cuales se puede diseñar y construir estructuras de caña guadúa seguras. Con estos y otros resultados producto del trabajo de investigación, el autor espera aportar a la creación de la nueva norma ecuatoriana de construcción y diseño estructural de bambú.

**Palabras Claves:** Propiedades mecánicas. Caña Guadúa Angustifolia Kunth. Propiedades geométricas.

# **CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN**

## **1.1 RAZONES QUE MOTIVARON EL ESTUDIO**

Uno de los usos más antiguos y frecuentes de la caña guadúa es en la construcción. La estructura cilíndrica y lista para usar de la caña guadúa la predispone como un material natural de la construcción. La alta resistencia, el bajo peso y su utilidad; la capacidad para regenerarse de la caña guadúa y su adaptabilidad al ambiente, la proyectan como el material de construcción del mañana. Su producción y consumo y su rol diario entre millones de personas, colocan a esta hierba en la posición del catalizador para el mejoramiento socio económico.

La caña guadúa angustifolia es el bambú de mayor uso en el Ecuador, es un bambú endémico del país y esta seleccionado como uno de los mejores bambúes de la naturaleza debido a sus características. En el capítulo 17 del NEC-11 no existen procedimientos de diseño estructural, ni consideraciones sobre los esfuerzos a los que se sometería una estructura de caña guadúa. Se puede ayudar a las personas a tener estructuras seguras, eficientes que cumplan sus expectativas de vida, mejorando las condiciones de vida y que ésta sea, ambientalmente aceptable.

## **1.2 JUSTIFICACION DEL TEMA:**

### **1.2.1 Desde el punto de vista científico:**

El problema que se plantea resolver es el uso del bambú a través del conocimiento de sus propiedades mecánicas y estructurales para la elaboración de un procedimiento que permita el uso de este material en diseño, en el cálculo estructural y en la construcción de viviendas utilizando este material.

Para poder resolver este problema es necesario la planificación y ejecución de pruebas de laboratorio en especímenes de bambú para determinar sus propiedades mecánicas y propiedades estructurales.

La caña guadúa de Ecuador cuyo nombre científico es *Guadúa Angustifolia*, pertenece a la familia de las gramíneas que son una familia de plantas herbáceas. Es una hierba vertical perdurable que está formada por numerosos tallos erectos y sin ramificación basal, producto de los brotes que emergen continuamente de los rizomas.

Las cañas guadúa tienen un follaje exuberante. Es una hierba muy alta y larga que la mayoría de sus especímenes alcanzan los treinta metros de altura, con diámetro variable a lo largo de su altura, entre los diez y quince centímetros.

Según David Gorozabel, experto en cañas guadúas de la Corporación Forestal y Ambiental de Manabí (Corfam) “En Ecuador existen dos tipos de caña guadúa. La primera espinosa conocida como “caña brava”, es de un color verde intenso, con las paredes de los tallos más gruesos y resistentes, posiblemente con un alto porcentaje de sílice, y la segunda sin espinas y conocida como “caña mansa”, es de un color verde amarillento, de menor consistencia aunque esté madura, debido a que las paredes que forman el tallo son más delgadas.”

### **1.2.2 De su pertinencia social:**

La caña guadúa como material de construcción en estructuras es considerada grande, resistente, de calidad superior, lo que la convierte en un material con muchas ventajas.

Es extensamente usado como un material de construcción para casas de bajos recursos aunque ya se la ha usado para grandes construcciones. Muchas casas y construcciones construidas con caña guadúa han sobrevivido a grandes terremotos.

Es importante desarrollar metodologías para el uso correcto y seguro de la caña guadúa en construcciones porque su tipo de material y estructura geométrica es apropiado para emplearlo en la ingeniería, ya que es liviano y resistente, y usado desde tiempos antiguos en la construcción por ser muy bueno. Además a las construcciones de caña guadúa las hace muy atractivas por su aspecto natural. Es una materia prima barata, renovable, que se regenera rápidamente y no contamina el medio ambiente. Desarrollando tecnologías sostenibles de preservación que garanticen sus durabilidad se puede tener un material útil y amigable para la construcción que puede reemplazar a otro tipos de materiales de construcción, generando fuentes de ingresos para agricultores, trabajadores, productores y profesionales dedicados al comercio de la caña guadúa. Las plantaciones comerciales están en crecimiento.

La caña guadúa tiene un sentido comercial por sus características físico-mecánicas que le dan flexibilidad y durabilidad, pero no se han explotado sus beneficios. Se pueden construir viviendas de alta durabilidad, buena estética y a bajo costo. Guayaquil es una ciudad que usa mucho la caña

guadúa, muchas de las viviendas son de este material o durante su construcción han usado la caña guadúa en forma de puntales para aguantar el peso de las losas mientras el hormigón fragua en los edificios en construcción, para elaborar andamios, o se hace la caña picada para los cerramientos de las casas, etc.

Los propósitos comerciales incluyen proveer un ambiente saludable, reducir la frecuencia de fallas ambientales, estructurales o funcionales, hacer mejoramientos en la calidad y economía de la construcción estableciendo estándares para un correcto manejo de los contratos entre los constructores y los usuarios. Es muy importante la innovación y desarrollo, buscando proteger los intereses de las comunidades y sus miembros.

Otros propósitos sociales incluyen el buscar mejoramientos en las construcciones con estándares de higiene y salud, mitigar el sufrimiento y pérdidas mortales en caso de desastres naturales como los sismos. Siempre satisfaciendo las necesidades de los usuarios al más bajo costo.

Un sistema estandarizado de diseño estructural con caña guadúa beneficiaría grandemente a las familias con bajos ingresos económicos protegiendo a los usuarios y al medio ambiente, promoviendo el crecimiento económico de constructores, trabajadores y productores de caña guadúa. Se debe promover también su uso para familias de grandes ingresos económicos para que sean implementados.

Se busca proteger a los usuarios debido a que materiales poco confiables y diseños y sistemas constructivos mal hechos pueden ser peligrosos. Al

construir se debe proteger al medio ambiente de cualquier tipo de contaminación que se pueda efectuar.

Creando sistemas de diseños y de construcción adecuados se puede reducir el costo de producción, además de mejorar la calidad sin elevar los costos, además se implementaría mano de obra calificada con estándares de seguridad y salud mínimos. Cuando se tiene un sistema de construcción que cumple estándares de calidad se puede desarrollar su uso dentro de un mercado regulado cada vez más, por lo que urge cumplir con los requerimientos mínimos.

Entre las instituciones que desarrollan programas de investigación con la caña guadúa en Ecuador están: Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (Magap), la Red Internacional del Bambú y Ratán (Inbar, con sus siglas en inglés) y la Universidad Católica Santiago de Guayaquil (UCSG), cuyos objetivos en común son involucrar a la sociedad ecuatoriana y el sector académico para resolver problemas, influyendo positivamente en la realidad del Ecuador.

Para la implementación de un código de diseño se debe seguir las tradiciones locales, reconociendo a la construcción como un proceso en crecimiento que cumple con las necesidades de las comunidades, para mejorar las viviendas de las clases sociales altas y bajas, siempre teniendo en cuenta las prioridades de las personas y su límite de inversión.

Nuevos estándares deben usar las oportunidades que da la caña guadúa para ayudar a las personas a resolver sus problemas, empezando por

requerimientos mínimos o básicos hasta requerimientos más lujosos, siempre buscando que el comportamiento de la estructura sea el apropiado.

Para estimular el uso de la caña guadúa debe haber sistemas de certificación de calidad, para reconocer a la caña guadúa como un material durable y apropiado para la construcción.

La caña guadúa no aparece en la norma ecuatoriana de la construcción (NEC-11), lo que obstaculiza su uso en construcción. El diseño de especificaciones técnicas para la construcción de estructuras de caña guadúa puede acabar esta restricción y caracterizarlo como un material ingenieril usado por diseñadores.

Un código de diseño motivará a los ingenieros civiles a usar la caña guadúa, debido a que prefieren trabajar con un material conocido o sistema determinado, apoyados en el conocimiento de sus propiedades, y respaldados por la existencia de especificaciones técnicas mínimas que pueden usar para sus decisiones y diseños.

### **1.3 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN O DE LA SITUACIÓN PROBLEMÁTICA:**

Las propiedades físicas y mecánicas de la guadúa se han estudiado desde hace poco tiempo. Es un material orgánico y por tanto heterogéneo (el acero es homogéneo). La forma tubular de los bambúes y su bajo peso es la forma perfecta para soportar esfuerzos originados por sismos. Es necesario seleccionar la guadúa en función de sus características anatómicas y de los estudios realizados.

#### **1.4 OBJETO DE ESTUDIO, CARACTERÍSTICAS, ENTORNO EN QUE SE INSERTA:**

La caña guadúa angustifolia de Ecuador será evaluada en diferentes tipos de cargas mediante pruebas estructurales y se obtendrán los valores de esfuerzo o resistencia última, mediante las cuales se podrán efectuar cálculos para el diseño estructural con caña guadúa.

La propiedad de un material es representado por el 5% estimado de los resultados de los ensayos, con el 50% de seguridad que se representará a la población total, este es conocido como el valor característico.

Debe prestársele especial atención a los parámetros de rigidez y resistencia y evaluarlos en los diferentes casos en que la estructura puede estar sujeta. Las deformaciones o deflexiones que afecten a la estructura no deben afectar al correcto uso de la vivienda ni causar incomodidades a las personas por daños en la vivienda.

Los esfuerzos admisibles pueden ser adoptados de los resultados de los ensayos. La caña guadúa puede ser modelada como una sección tubular de espesor variable, sin ser perfectamente rectos.

#### **1.5 CONTEXTUALIZACIÓN EN TIEMPO Y ESPACIO, ESTABLECIMIENTO DE LOS MARCOS EN LOS QUE EL TRABAJO SE DESARROLLA:**

En Ecuador actualmente hay muchas construcciones de viviendas usando la caña guadúa como materia prima; por lo tanto, los ingenieros civiles de la UCSG y del Ecuador, en nuestra responsabilidad social y liderazgo ante

nuestra comunidad, tenemos que desarrollar un método de diseño basado en cálculos para sus estructuras sometidas a diferentes tipos de solicitaciones como estados de cargas.

Se realizarán diversos ensayos de laboratorio a muestras de caña guadúa; pruebas a compresión, a flexión, a tracción, y se obtendrán las propiedades mecánicas y estructurales, de acuerdo a los resultados que representen a la población de la caña guadúa. Se evaluará las propiedades físicas y mecánicas de la caña guadúa, que en muchos testimonios es denominada el “acero vegetal”.

## **1.6 OBJETIVOS:**

### **1.6.1 Objetivo general:**

Obtener las propiedades mecánicas y estructurales de la caña angustifolia del Ecuador, a través de ensayos de laboratorio, para poder en un procedimiento de cálculo estructural que sirva para diseñar estructuras seguras.

### **1.6.2 Objetivos específicos:**

- Determinar los parámetros geométricos de la caña guadúa, para determinar si existen estadísticamente las relaciones geométricas de la caña guadúa, midiendo cañas guadúa de diferentes plantaciones y depósitos en el Ecuador.
- Determinar las imperfecciones verticales de la caña guadúa, hasta 5 metros de altura, midiendo cañas guadúa de diferentes plantaciones y depósitos en el Ecuador, para determinar su influencia en el fenómeno de pandeo de columnas esbeltas.

- Determinar las propiedades mecánicas y estructurales para la elaboración de un procedimiento de cálculo estructural empírico que pueda usarse para el diseño y construcción de viviendas de uno o dos pisos.

### **1.7 HIPÓTESIS:**

- 1) La no verticalidad de la caña guadúa, debido a sus imperfecciones naturales, influirá directamente en la disminución de la resistencia de la caña debido a los efectos de segundo orden.
- 2) La relación geométrica que influye de manera directa en la resistencia de la caña guadúa es el espesor de la pared de la caña entre el diámetro exterior de la caña guadúa ( $Esp/Dext$ ).
- 3) La resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión, la resistencia a la tensión y la resistencia al corte de la caña guadúa pueden ser determinadas mediante pruebas estructurales de laboratorio.

### **1.8 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN:**

- 1) ¿Cuál es el esfuerzo último de compresión de la caña guadúa?
- 2) ¿Cuál es el esfuerzo último de flexión de la caña guadúa?
- 3) ¿Cuál es el esfuerzo último de tracción de la caña guadúa?
- 4) ¿Cuál es el esfuerzo último de corte de la caña guadúa?

### **1.9 METODOLOGÍA:**

El presente proyecto es de tipo experimental, se trata de la planificación y ejecución de pruebas de laboratorio, tales como pruebas de flexión, pruebas de compresión, pruebas de tensión, pruebas de corte sobre especímenes de bambú para la determinación de sus propiedades mecánicas y

estructurales. Se realizarán pruebas para que estadísticamente se verifique la validez de dichas propiedades.

De las pruebas a tracción se determinarán las leyes constitutivas del comportamiento esfuerzo vs deformación y del módulo elástico a tracción. Las pruebas a compresión se realizarán en especímenes de una altura igual al diámetro de la caña, disponiendo de transductores para medir la deformación y la obtención del modulo elástico a compresión. La prueba a flexión de 4 puntos, con el momento flector de colapso, en el que se debe medir también la deformación en el lado superior en compresión y en el lado inferior en tracción.

Planificar las pruebas con, mínimo, 10 experimentos de especímenes para calcular un estimado del 5% de fratil como valor de diseño. En este trabajo se siguió la metodología que se recomienda en las Normas ISO para obtener las propiedades mecánicas del bambú: INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Bamboo - Determination of physical and mechanical properties - Part 1: Requirements. Geneva: ISO, 2004, 19 p (ISO 22157-1:2000(E)), elaboradas por el Dr. Jules Janssen.

## **CAPÍTULO 2: CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA CAÑA GUADÚA**

### **2.1 DESCRIPCIÓN CIENTÍFICA**

Figura 1: plantaciones de caña guadúa en Quevedo, provincia de Los Ríos.



Fuente: Pedro Córdova.

La caña Guadúa *angustifolia* Kunth, pertenece a la familia de las gramíneas Poacecae y a la Tribu Bambuseae, una familia de plantas herbáceas. En 1820 el botánico Kunth constituyó este género nombrándolo guadúa como los indígenas de Ecuador y Colombia se referían a estas cañas. En su hábitat natural, las cañas guadúas crecen continuamente de semillas o rizomas. El sistema de rizomas es muy importante para la caña guadúa. Como las cañas guadúa no tienen un tronco central como en los árboles, los rizomas proveen estabilidad como cimientos. McClure (1996) ha descrito al rizoma de caña guadúa como un sistema complejo subterráneo segmentado, con nudos.

De acuerdo a McClure (1993), “La elegante caña guadúa es excelente en altura, propiedades mecánicas (resistencia y trabajabilidad) y durabilidad de

sus tallos, y es muy importante por los diferentes usos que se le ha dado en los territorios donde se encuentra”.

Figura 2: plantaciones de caña guadúa en Bucay, provincia del Guayas.

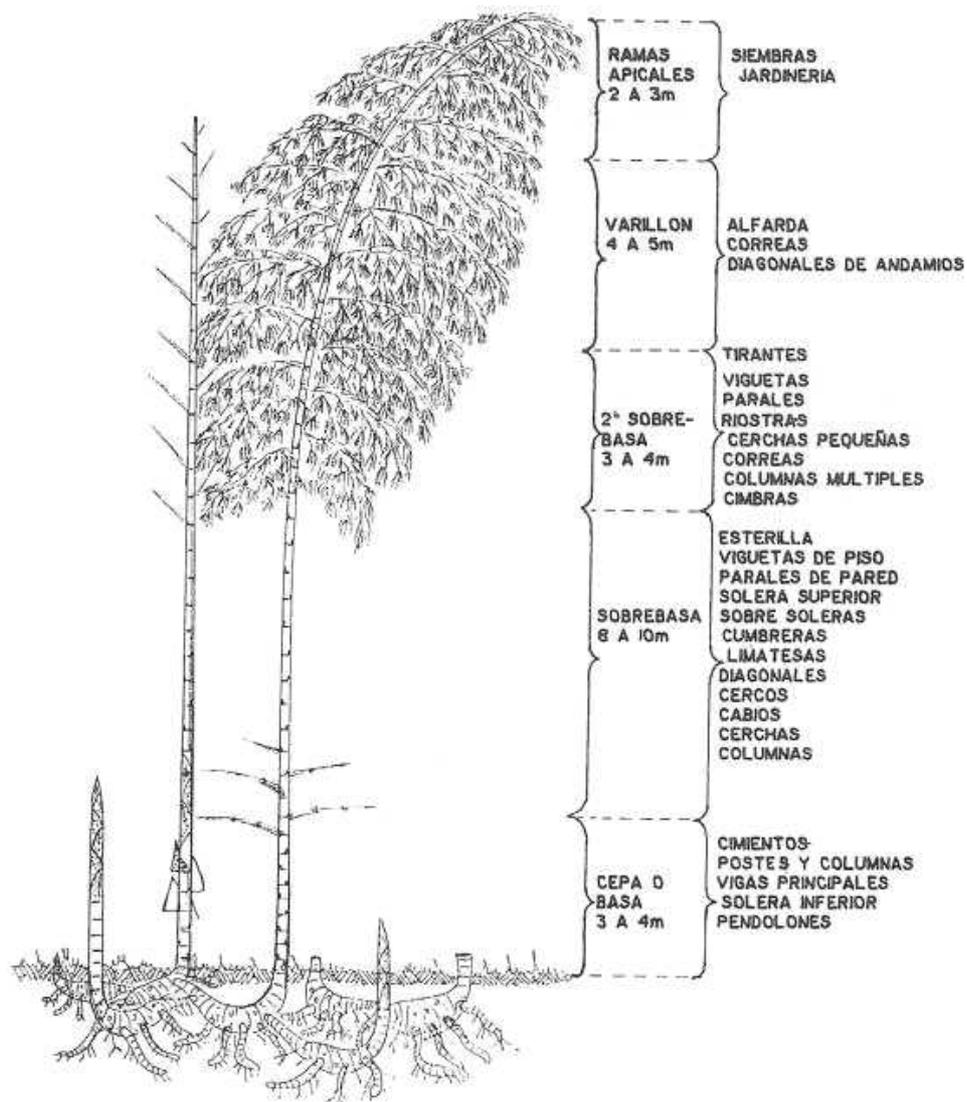


Fuente: Pedro Córdova

A diferencia de la madera, la guadúa no tiene anillos de crecimiento, puesto que nace con el diámetro que va a tener durante su existencia. El diámetro de las cañas guadúa varía, disminuyendo a medida que se aleja del suelo. Las cañas guadúa son cilíndricas y huecas, arqueadas apicalmente. En la parte interna hueca, algunos divisores horizontales llamados diafragmas aparecen en el sector de los nudos. En la parte externa estos divisores se ven como un anillo alrededor de la caña.

El diafragma y el anillo juntos forman un nudo. Pequeñas ramas crecen de estos nudos. El área entre dos nudos se llama entrenudo. Los entrenudos de las cañas guadúa son huecos, es decir que tienen una cavidad, su longitud varia, y es menor en la base, su longitud aumenta a medida que el nudo de la caña se encuentre más alejado del suelo.

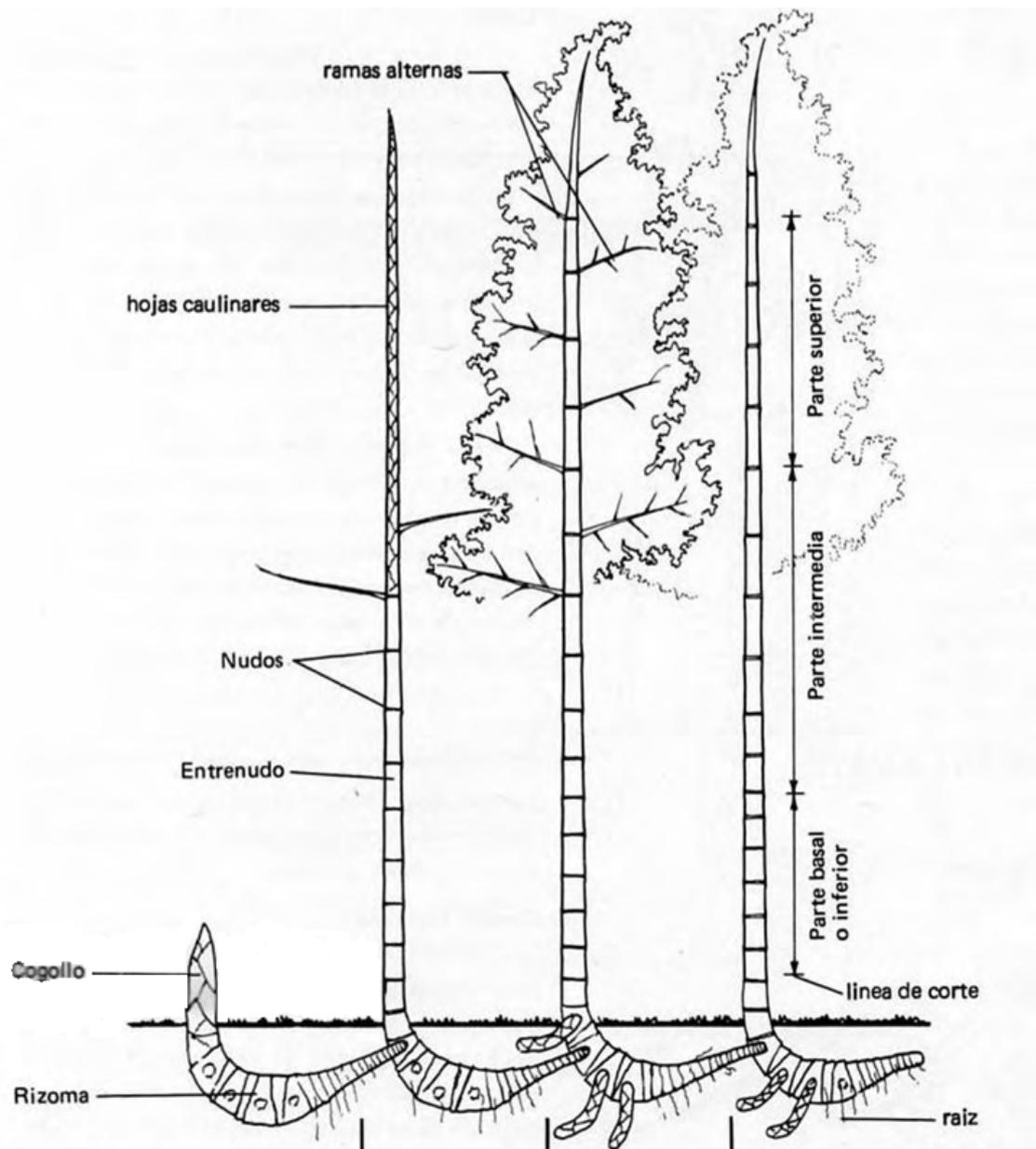
Figura 3: partes principales de un culmo de guadúa



Fuente: Grosser, Dietger y L. Walter, 1971

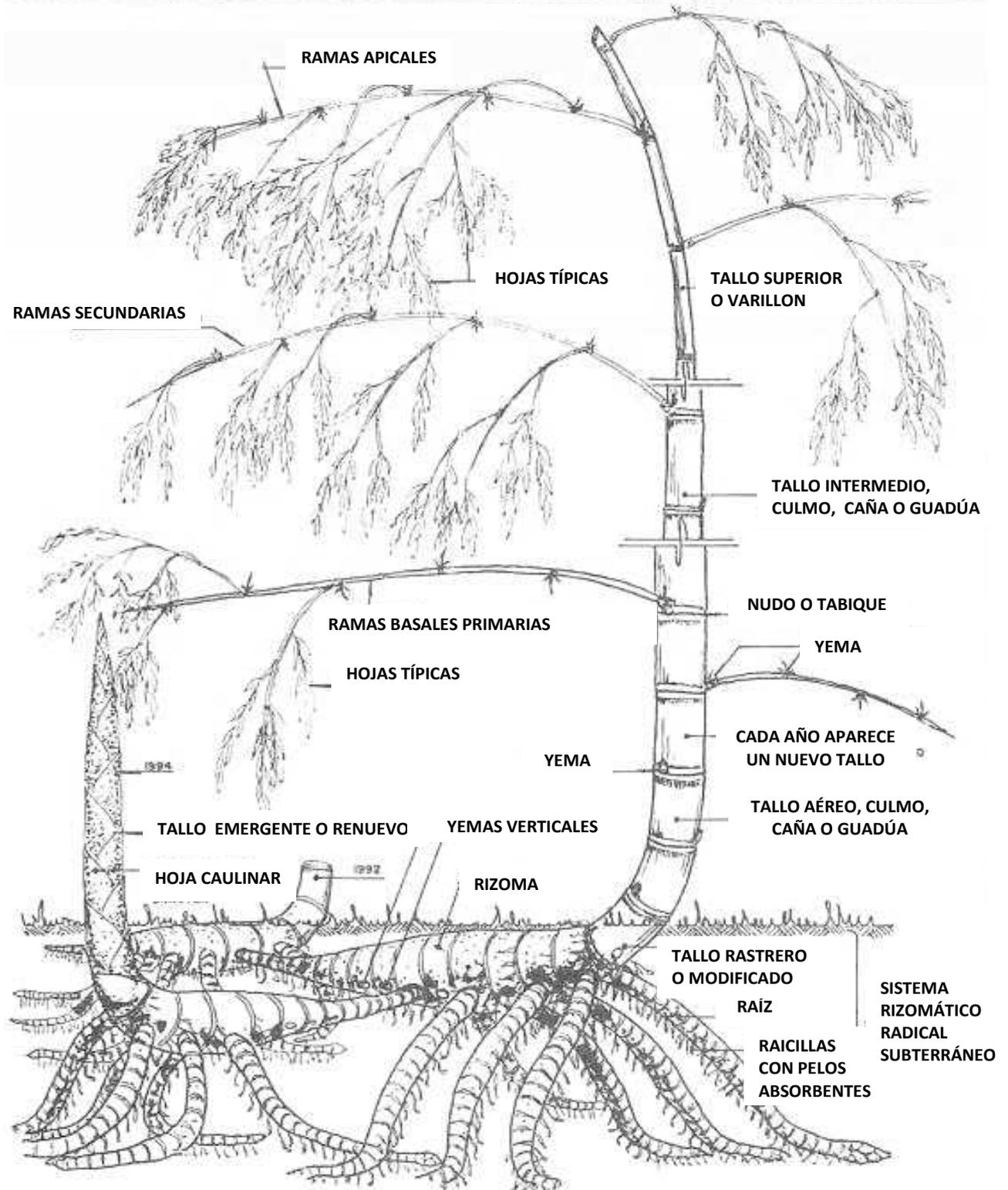
La superficie de la caña guadúa es llamada simplemente pared de la caña. Las fibras de la pared de la caña guadúa están integradas de sílice, ésta es la razón principal que le da la resistencia a la caña guadúa. El espesor de la pared es variable, siendo mayor en la parte baja del tallo y menor en la parte apical o superior del tallo.

Figura 4: partes principales de un culmo de guadúa



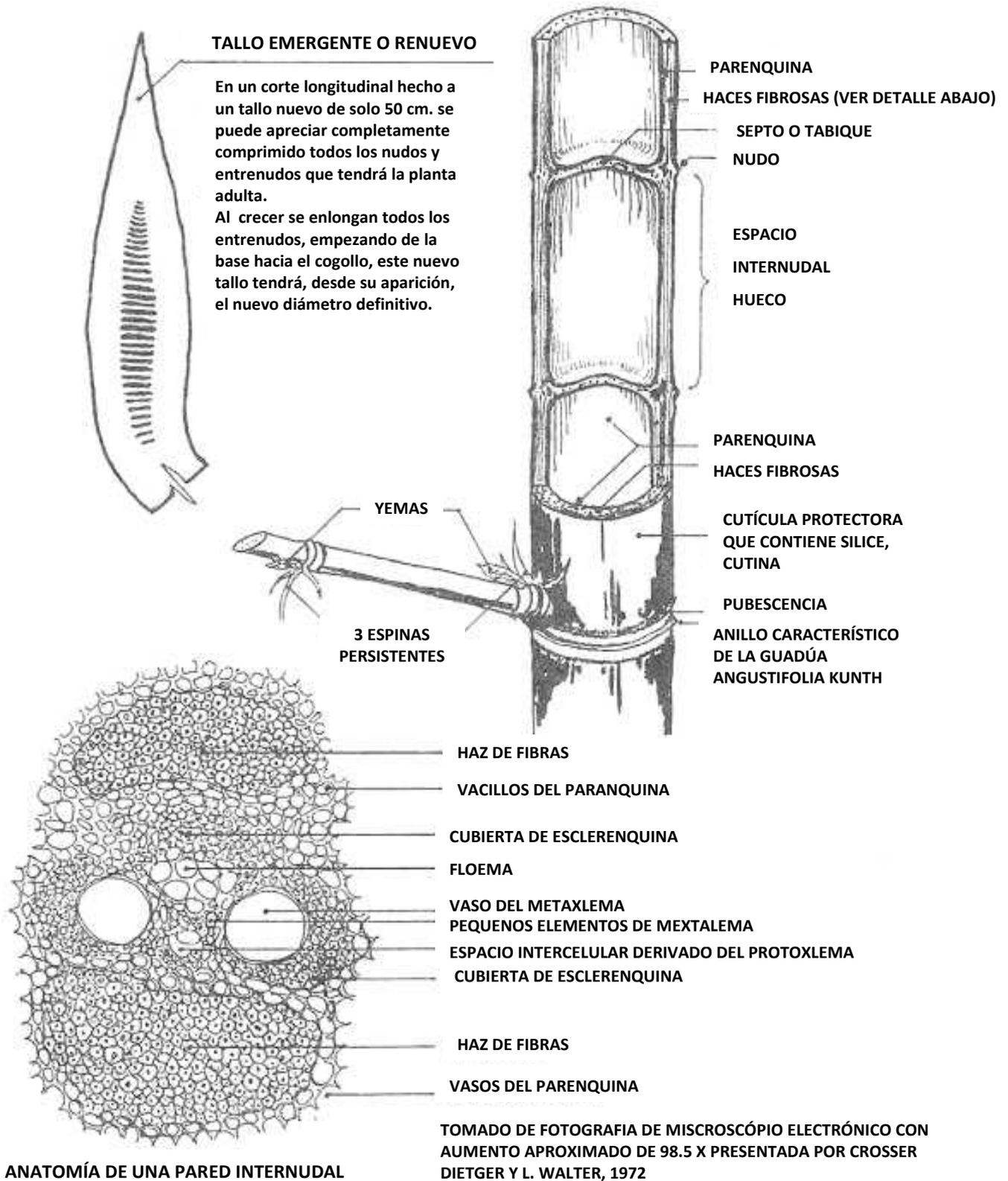
Fuente: Grosser, Dietger y L. Walter, 1971

Figura 5: partes principales de un culmo de guadúa



Fuente: Grosser, Dietger y L. Walter, 1971

Figura 6: partes principales de un tallo de caña guadúa



ANATOMÍA DE UNA PARED INTERNODAL

Fuente: Grosser, Dietger y L. Walter, 1971

Figura 7: partes principales de un culmo de guadúa

<b>PARTES DE LA GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH</b>	
<b>RIZOMA</b>	Es un tallo modificado, subterráneo, que conforma el soporte de la planta. Es el lugar por donde la guadua absorbe los nutrientes. Se utiliza en estabilización de las laderas y prevención de la erosión producida por escorrentía, vientos fuertes y desmoronamientos.
<b>CEPA</b>	Es la parte del culmo con mayor diámetro y espesores de pared mayores; Posee una longitud de 4 metros. Las distancias de cañutos son las más cortas y en la construcción se les utiliza como columnas
<b>BASA</b>	El diámetro es intermedio y la distancia entre nudos es mayor en la cepa; es la parte del culmo de la guadua que más se utiliza tiene una longitud aproximada de 11 metros
<b>SOBREBASA</b>	El diámetro es menor y la distancia entre nudos es un poco mayor, comparado con la basa, la longitud es de aproximadamente 4 metros.
<b>VARILLÓN</b>	La sección tiene un diámetro pequeño y la longitud es de unos 3 metros aproximadamente
<b>COPA</b>	Es la parte apical de la guadua, con una longitud de entre 1,20 y 2,00 metros

Fuente: Grosser, Dietger y L. Walter, 1971

## 2.2 ZONIFICACIÓN Y CULTIVO

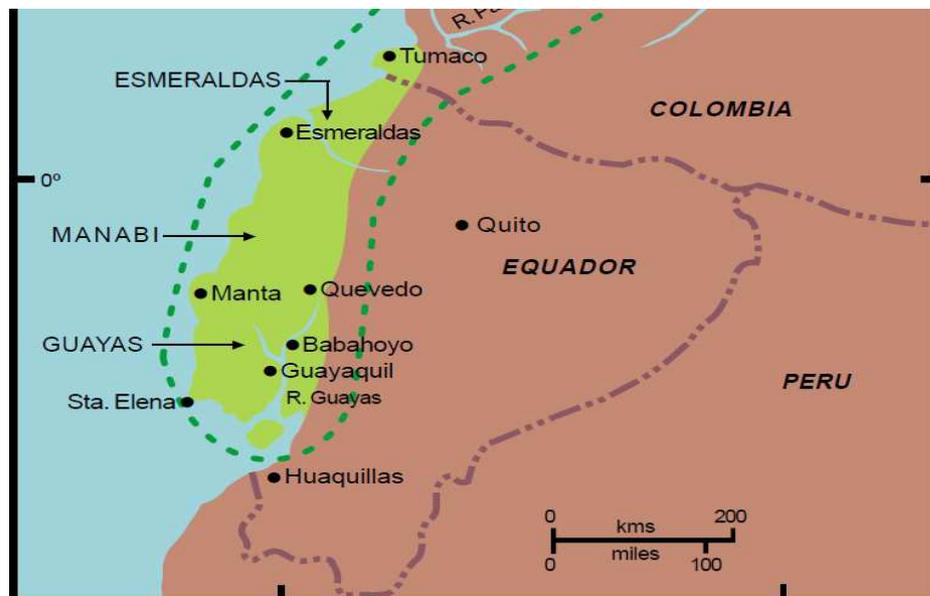
Tabla 1: Condiciones de siembra

<b>CONDICIONES DE SIEMBRA</b>	
<b>Donde Sembrar</b>	
Altitud	400 a 2.000 m.s.n.m
Temperatura	18 °C a 22 °C
Precipitación	Superior a 1.300 milímetros por año
Humedad Relativa	80%
Suelos	Areno-limosos, arcillosos, sueltos profundos, bien drenados y fértiles.
<b>Como Sembrar</b>	
Distancia de Siembra	5 X 5 metros
Plateo	1.5 metros
Hoyo	40 X 40 centímetros

Fuente: Corporación Autónoma Regional del Valle CVC. Luis Fernando Cortés  
Documento: El cultivo de la guadua alternativa económica para el desarrollo sostenible.

En Ecuador la caña guadúa crece naturalmente en abundancia, con frondosidad, en los suelos húmedos volcánicos y aluviales de la costa ecuatoriana. En las provincias de Esmeraldas, Manabí y Guayas el clima es cálido y muy húmedo y los suelos llanos susceptibles a inundaciones con lluvias que exceden los 1500 mm de precipitación, lo que es excelente para la guadúa. Toda el área es sísmicamente activa debido a procesos tectónicos, es una región volcánica.

Figura 8: región donde se encuentra caña guadúa en Ecuador



Fuente: Jorge A. Gutiérrez, 2000

La Guadúa Angustifolia, debido a su importancia económica, ocupa UNA posición privilegiada en la economía del país. El área de Guadúa Angustifolia en los bosques naturales ecuatorianos está estimado en aproximadamente 20000 ha, de los cuales 18 792 ha se encuentran en las 5 provincias de la región Costa. El área total de bosques naturales de Guadúa en la región costera, representa aproximadamente el 75% del total a nivel nacional. Con un promedio de producción estimado en 1 376 cañas/ha/

año, la cantidad total de cañas Guadúa producidas, en esta región, es de 25.86 millones de culmos verdes por año.

Los productores han seleccionado a la guadúa como la caña mas recomendada para producirse debido a su fácil reproducción, rápido crecimiento, gran crecimiento de las cañas por unidad de área. Aunque solo la guadúa angustifolia tiene un valor económico, la cultura ecuatoriana a lo largo de su historia se desarrolla con el bambú, procesándola y utilizándola en el país. Existen inventarios, así como la investigación significativa en la gestión, producción, comercialización y uso industrial de guadúa angustifolia.

Según David Gorozabel, experto en cañas guadúa de la Corporación Forestal y Ambiental de Manabí (Corfam) “En Ecuador existen dos tipos de caña guadúa. La primera espinosa conocida como “caña brava”, es de un color verde intenso, con las paredes de los tallos más gruesos y resistentes, posiblemente con un alto porcentaje de sílice, y la segunda sin espinas y conocida como “caña mansa”, es de un color verde amarillento, de menor consistencia aunque esté madura, debido a que las paredes que forman el tallo son más delgadas.”

Un brote nuevo nace desde las raíces o rizomas para formar un tallo nuevo, protegidos por vainas que son hojas caulinares. La caña guadúa en su primer año llega a su altura máxima, conservando las hojas caulinares que se desprenderán a medida que la caña madure. Cuando la caña tiene más de 5 años está lista para su corte y aprovechamiento.

La caña guadúa tiene la habilidad de crear un buen ambiente, forma una maravillosa contribución a la belleza y al mejoramiento del ambiente. Un frío invierno puede dañar severamente a la caña guadúa porque es una planta para ambientes tropicales y subtropicales. La caña guadúa se encuentra distribuida en la Zona Tropical de Sudamérica, extendiéndose desde Colombia y las Guayanas por el Norte, hasta Ecuador y Perú por el Sur.

En Ecuador existen plantaciones a lo largo y ancho de la zona tropical, existen cerca de 25000 ha de bambú en el país, según datos del Inbar (Red Internacional del Bambú y Ratán), distribuidas en Pichincha, Los Ríos, Guayas, Esmeraldas y Manabí. Algunas variedades se encuentran también en la cordillera de los Andes. El crecimiento de la caña guadúa en una plantación es una actividad comercial a gran escala, estas pertenecen o a compañías o a corporaciones. Las venden como materia prima para la construcción.

Una mancha o plantación de caña guadúa puede ser considerada como el sitio de producción de los materiales ingenieriles de una construcción. Pueden proveer una cobertura vegetal a la tierra y proteger, dándole estabilidad a los suelos. La caña guadúa es sembrada a través de cortes de pedazos de cañas que tengan yemas y dos o tres entrenudos de largo. Se las entierran tiernas para que se reproduzcan naturalmente, regenerándose para formar las manchas.

En un suelo con temperatura y humedad óptimas, pedazos de cañas tiernas con las ramitas cortadas, son puestas horizontales sobre el suelo, se cubren con tierra hasta algo más de la mitad y después de dos a tres semanas nuevos tallos empezarán a crecer de los nudos donde las ramas fueron

cortadas, en cada nudo crecerán raíces en el suelo y la caña guadúa crecerá. La caña está provista de vainas que la protegen hasta que vaya creciendo. Otro método es plantar el rizoma de la caña guadúa, se lo planta verticalmente en el suelo con un nudo enterrado en el suelo, las raíces crecerán del nudo inferior, las ramificaciones emergerán de los nudos superiores, y se reproducirá fácilmente. Las cañas maduras para construcción se obtienen a partir de los cinco años.

La caña guadúa puede ser vista creciendo en bosques naturales, haciendas o plantaciones. En la mayoría de las partes del país, la gran cantidad de las cañas guadúa crecen en bosques naturales, el hábitat principal de la caña guadúa, los guaduales naturales. La caña guadúa es un recurso natural que puede ser usado por siempre. En las haciendas o granjas los agricultores siembran la caña guadúa para su producción y venta como material de construcción.

Tabla 2: Ciclo biológico.

<b>Ciclo Biológico</b>	
<b>Crecimiento</b>	Como recurso forestal la guadua crece rápidamente (promedio de crecimiento durante los primeros 120 días es de 10 cm por día. Obtiene su altura definitiva a los 120 días).
<b>Aprovechamiento</b>	Las condiciones anteriores permiten gran nivel de aprovechamiento en tiempo reducido (madura entre 4 y 5 años) lo que significa una inversión rentable y un ingreso económico sostenible.
<b>Maduración y Dureza</b>	Las maderas se van endureciendo a medida que la especie se desarrolla y llega a convertirse en una estructura que ya madura o hecha, soporta alturas de más de docientos veces su diámetro.

*Fuente: Corporación Autónoma Regional del Valle CVC. Luis Fernando Cortés  
Documento: El cultivo de la guadua alternativa económica para el desarrollo sostenible.*

La preservación de la caña guadúa es un tema de preocupación, debido a que solo métodos tradicionales pueden ser hechos por los agricultores. Métodos modernos de preservación con equipos modernos no pueden ser usados por los agricultores debido a su alto costo. Se debe rescatar la gran utilidad de la caña guadúa para solucionar los problemas de viviendas, adaptándose a las tradiciones y cultura locales.

### **2.3 IMPACTO ECOLÓGICO**

En Ecuador la caña guadúa se desarrolla en áreas húmedas tropicales con una temperatura promedio del ambiente de veintidós grados centígrados, pero puede vivir en ambientes de mayor temperatura y en áreas con poca precipitación, siempre que haya suficiente humedad en el suelo. En Ecuador la caña guadúa se desarrolla normalmente hasta los mil metros sobre el nivel del mar.

Figura 9: caña guadúa angustifolia



Fuente: Pedro Córdova

A la caña guadúa se la debe plantar en lugares con suelos sueltos, bien drenados y arenosos, por eso las manchas de los guaduales tienen gran altura y buen diámetro en los suelos de los bancos de los ríos, estos suelos sedimentarios se forman en los costados de los ríos después de las precipitaciones.

Tabla 3: Beneficios de la siembra de la caña guadúa.

<b>Beneficios de la Siembra de la Guadua</b>	
a)	La conversión de tierras en uso o en proceso de deterioro al uso económico de la reforestación con esta especie
b)	La conservación del medio ambiente mediante el control de la erosión
c)	Impacto en el régimen hidrológico y condiciones climáticas y la regulación de la cantidad de agua para consumo humano
d)	Mejoramiento de la situación socioeconómica y la calidad de vida de las comunidades en el área de influencia del proyecto
e)	Rescate y fortalecimiento de la cultura de la guadua.

*Fuente: Corporación Autónoma Regional del Valle CVC. Luis Fernando Cortés.  
Documento: El cultivo de la guadua alternativa económica para el desarrollo sostenible.*

La caña guadúa almacena grandes cantidades de carbono en su interior, lo absorbe del aire y lo guarda en su interior, plantaciones de caña guadúa absorben grandes cantidades de carbono por hectárea por año. Las plantaciones de caña guadúa se las recomendaría como pulmones para descontaminar ciudades. Como la caña guadúa está compuesta de celulosa y lignina, que contienen mucho carbón; es decir, la caña guadúa necesita mucho carbono para crecer. Cuando las cañas son usadas para la construcción o artesanías; es decir, no es usada como madera para combustión, se asegura que el carbono se quede encerrado dentro de las cañas por un gran periodo.

Figuras 10 y 11: caña guadúa angustifolia



Fuente: Pedro Córdova

Entre las instituciones que desarrollan programas de investigación con la caña guadúa en Ecuador están el Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (Magap), la Red Internacional del Bambú y Ratán (Inbar, con sus siglas en inglés) y la Universidad Católica Santiago de Guayaquil (UCSG).

Para Paulina Soria, del área de Gestión de Conocimiento y Desarrollo Artesanal del Inbar, la caña tiene un sentido comercial por sus características físico-mecánicas que le dan flexibilidad y durabilidad. No obstante, no se han explotado sus beneficios. “Con un manejo adecuado se extiende la durabilidad y mejora el precio”.

Cada hectárea puede producir hasta 1 000 tallos comerciales, que alcanzan su madurez a los cinco años. Los cultivos no son tecnificados y sirven como un ingreso complementario a la renta de los agricultores. Los intermediarios

compran los tallos en finca, a precios promedio de USD 0,80 por tallo y el comprador final paga hasta USD 3.

Según Magap, el sector genera USD 25 millones al año. Pero Soria cree que hay que formalizar el segmento. Cita el caso que cerca de 5 millones de tallos salen anualmente a Perú, por Huaquillas (El Oro), a un precio de USD 1,40 por tallo genera un valor de USD 7 millones.

Figura 12: caña guadúa angustifolia



Fuente: Pedro Córdova

Un proyecto de la UCSG, en coordinación con el Magap e Inbar, busca dinamizar la cadena productiva de este bambú. La facultad de Arquitectura de la UCSG, forma parte el plan piloto de investigación y desarrollo de Ecomateriales para viviendas de bajo costo, financiado por la Secretaría Nacional de ciencia y tecnología (Senacyt). Se realizan investigaciones para generar nuevos materiales de construcción. El proyecto busca asesorar al agricultor para que realice labores de tratamiento de la caña. Esto consiste en labores de corte y tratamiento con químicos para preservar de polillas y ambiente.

## **2.4 PRODUCCIÓN NACIONAL**

La caña guadúa se usa en el Ecuador como material para la construcción, pero es visto como un material perecible, por el desconocimiento de procesos de preservación, y por su debilidad a la humedad y los rayos solares. Por esta razón la caña guadúa es usada en su mayoría para construcciones de familias de escasos recursos, ya que los usuarios de mejores ingresos económicos eligen materiales más durables para la construcción.

La caña guadúa de la región andina del Ecuador es una excelente materia prima, pero hay que saber seleccionarla para optimizar su uso. Se debe usar cañas guadúas maduras, “hechas” con no menos de 4 años de edad, porque son más resistentes y tienen menor contenido de humedad, se las debe curar y secar. Además deben usarse cañas de buena calidad, que no tengan fallas y sean uniformes.

Entre las fallas o enfermedades que se pueden ver a simple vista, en la caña guadúa se encuentran los huecos creados por pájaros o insectos, decoloraciones del tallo y rajaduras. Se debe prestar especial atención a las cañas torcidas o con otro tipo de deformaciones, ya que estas cañas tienen defectos mecánicos que pueden afectar su comportamiento estructural o pueden afectar estéticamente a la construcción.

El corte de las cañas guadúas se realiza en las plantaciones llamadas guaduales, cañales o manchas. Se debe contar con personal de experiencia en este tipo de trabajos, ya que las técnicas que se empleen en el corte son muy importantes para que se asegure una adecuada oferta de cañas de calidad para la construcción.

Figura 13: Selección de la caña a cortar



Fuente: Pedro Córdova

Con machetes afilados dentro del guadual se realiza un destaje en la caña, en dirección de la caída, tratando de no producir vibraciones que ocasionen la rajadura longitudinal de la caña. Al lado opuesto del primer destaje se hace un segundo corte para causar el tumbado.

Figura 14: Tocón de caña guadúa recién cortado



Fuente: Pedro Córdova

Es importante que el corte en el tallo de la caña, se lo haga lo más cercano a la superficie del suelo, entre el primer nudo y el segundo nudo, para que ésta siga reproduciéndose, arreglando el tocón para evitar que el agua se empoce en el tocón, lo que provocaría la pudrición de las raíces por el ataque de hongos y humedad.

Figura 15: Transportación de la caña recién cortada



Fuente: Pedro Córdova

## **2.5 DURABILIDAD DE LA CAÑA GUADÚA**

El principal problema que se podría pensar sobre la caña guadúa es sobre su corto periodo de vida que podría tener, o el ataque que podría tener por parte de agentes externos; en consecuencia, se cree que el periodo de vida de una estructura de caña guadúa sería corto y ésto ocasiona que no exista una inversión en este tipo de construcción.

La caña guadúa es poco durable, por eso se necesitan ciertos químicos para aumentar su durabilidad natural. Investigaciones en la durabilidad de la

caña guadúa deben hacerse, para poder tener criterios de aceptación de la caña guadúa para poder tener una durabilidad aceptable requerida para poder cumplir con la vida de servicio de las estructuras de caña guadúa.

Ser hueca es uno de los problemas que resultan en la poca durabilidad de la caña guadúa, ya que provee un lugar para que se alojen diferentes tipos de agentes destructivos. Además, si se tiene un algún tipo de daño que destruya la pared exterior de la caña guadúa, ésta quedara en una mala condición ya que perderá una parte importante de su espesor e influirá en la resistencia y en las propiedades físicas y mecánicas de la caña guadúa.

Ecuador por ser un país tropical que tiene un medio ambiente con una humedad alta crea problemas en la durabilidad de la caña guadúa. La caña guadúa tiene un porcentaje natural alto de humedad lo que hace difícil su secado completo en el interior, por lo que la caña guadúa puede sufrir diferentes tipos de daños debido al ataque de hongos o insectos. Esto da inseguridad para su uso en la construcción de estructuras de caña guadúa a largo plazo.

Para que una estructura de caña guadúa llegue a tener una alta durabilidad, durante un periodo largo de vida, las cañas deben ser tratadas, deben ser protegidas del contacto directo de los rayos del sol, del contacto directo con el suelo y la humedad. Mediante estudios de preservación, los periodos de vida de las cañas pueden ser considerablemente altos.

Cuando se use la caña guadúa como material de construcción, solo debe usarse cañas secas y maduras; en el diseño debe asegurarse que las cañas

permanecerán secas, lejos de la humedad, o estar ubicadas de manera que se puedan secar rápido por acción del viento.

El deterioro de las cañas guadúa afecta grandemente a su durabilidad y puede crear consecuencias en las estructuras, por eso deben preservarse las cañas guadúa y mantenerlas alejadas de la humedad o sino podría haber deterioros en periodos muy cortos, causando problemas graves a la estructura.

Los campesinos, agricultores, administradores de plantaciones de caña guadúa explican, por su experiencia propia de años de trabajo en el cultivo de cañas guadúa, que la parte más baja de los tallos de las cañas guadúa tiene una durabilidad mayor que el resto del tallo, a medida que se aleja del suelo; debido a que la corteza de la pared externa de la caña guadúa, en este sector, es mas durable; a ellos se les hace más difícil cortar la caña en estos sectores de la base.

Se ha evaluado que las cañas guadúas cortadas durante el cuarto menguante de la luna tienen mayor durabilidad, debido a que durante esta etapa de la luna las cañas se encuentran con menos humedad en su interior, aunque esta correlación entre la durabilidad y las fases de la luna sea difícil de establecer, probablemente en la realidad. Según la sabiduría popular debe ser cortada preferiblemente en las tres noches de más oscuridad y entre las más altas horas de la noche y las horas de la madrugada. También se ha evaluado que las cañas guadúa cosechadas durante la estación seca tienen una mejor durabilidad que aquellas cosechadas durante las estaciones lluviosas.

## **2.6 PRESERVACIÓN DE LA CAÑA GUADÚA**

La preservación tradicional o química que se le dé a la caña guadúa ayudará a tener una mayor vida útil y durabilidad de la misma y prevendrá todo tipo de futuros problemas en la estructura de ella. Al igual que todo material de la construcción, la caña guadúa necesita un apropiado mantenimiento periódico para mantener su calidad original.

El almidón que compone a la caña guadúa es muy atractivo para los hongos, insectos, plagas y microorganismos, por esta razón se la debe cosechar en estaciones en las que el contenido de almidón sea bajo. Se debe seleccionar apropiadamente aquellas cañas que estén identificadas como maduras e indicadas para el propósito a la que se la va a usar.

Las cañas guadúa deben tener un correcto almacenamiento después de cortadas, deben mantenerse secas, lejos de la humedad y libre del suelo, mantenerlas bajo techo, para su protección de la lluvia, y de manera horizontal, una encima de otra, con suficientes corredores para que existan corrientes de aire.

A las cañas guadúa, que van a ser usadas para la construcción, se las debe mantener secas; es decir, la estructura debe tener un techo y cimientos que aseguren que no le salpicará agua de la lluvia a las cañas de la estructura. La estructura debe diseñarse correctamente en detalle para que esto ocurra, porque los tratamientos químicos no pueden corregir las consecuencias debido a un mal diseño estructural.

Deben tomarse muchas precauciones para que las cañas en una construcción no se humedezcan; además, el diseño de la estructura debe ser tal que permita flujos de aire para que puedan secar rápidamente las cañas que se humedezcan por la lluvia.

La micro estructura molecular de la caña guadúa dificulta su tratamiento para preservación. Su pared exterior tiene las fibras con alto contenido de sílice, haciéndola impermeable, esto impide cualquier tipo de penetración de preservantes aplicados. La superficie interior de la caña guadúa tiene una capa de cera lo que la hace también impermeable. Entonces, un preservante solo puede entrar a través de los vasos conductores en el interior de las fibras, que no son más allá del diez por ciento de la sección transversal de la caña guadúa. Pero estos vasos se cierran para siempre veinticuatro horas después de haber sido cortada la caña, lo que ocasiona que el proceso de preservación debe ser efectuado durante este corto periodo.

Existen dos tipos de tratamiento, los tradicionales o culturales y los tratamientos con químicos. Los tratamientos tradicionales utilizan métodos como el avinagrado o curado, la evaporación de la humedad mediante humo, o con lavados de cal. El resultado final que se puede lograr con estos métodos, para la preservación de las cañas guadúa, es incierto; debido a que, estos métodos populares son aplicados por mano de obra de baja calidad.

El método de avinagrado es económico e inocuo, consiste en dejar intacta la caña cortada con sus ramas y hojas sobre el mismo tocón donde se lo cortó, durante quince a veinte días, para que mediante procesos de

deshidratación y transpiración que no paran, aunque se haya cortado la caña; ocasionando que el contenido de humedad, azúcares y almidón decaigan, cuando la savia baja. El método de evaporación de la humedad de las cañas mediante humo sobre fuego es efectivo contra hongos e insectos. El método de lavados con cal se usa para proteger la caña guadúa de los hongos.

Como en la construcción de estructuras de caña guadúa se necesita un largo periodo de vida, será necesario usar tratamientos químicos para las cañas, debido a la seguridad en los resultados que se pueden obtener. Químicos seguros elaborados con bórax y ácido bórico son efectivos. Los métodos químicos deben ser adecuadamente aplicados para no afectar la salud del usuario y el medio ambiente.

Un buen sistema de preservación puede ser obtenido con fertilizantes hechos con bórax, octaborato disódico tetrahidratado, con un sesenta y seis por ciento de contenido de bórax activo. Es un método eficaz económico y seguro para los usuarios y el medio ambiente. En un tanque con un tamaño suficiente para sumergir las cañas se elabora una mezcla de por cada treinta litros de agua se recomienda un kilo de bórax y dos kilos de ácido bórico. Se deben perforar todos los diafragmas de las cañas para que la solución entre a todas las cavidades de la caña. Se deben sumergir las cañas durante un mínimo de tres días. Una vez retiradas las cañas del tanque, se debe escurrir la solución y se somete a la caña a un proceso de secado post inmersión.

Existen algunos métodos disponibles para poder aplicar los químicos a las cañas guadúa. Lo importante es preparar técnicamente los preservantes

para que puedan actuar adecuadamente durante el procedimiento de preservación. Se necesitan muchas precauciones, al realizar estos tratamientos, con mano de obra calificada, buena administración de los recursos, control de calidad, y siempre economizando los procesos, con mucha atención.

Después de haber inmunizado las cañas guadúa, no se las debe dejar en contacto con el agua ni expuesta a los rayos solares, debe almacenárselas en un lugar que este cubierto, cuidando que no sufran deformaciones para poder usarlas lo más rápido posible.

Figura 16: Preservación por inmersión en químicos



Fuente: Pedro Córdova

## **CAPÍTULO 3: PROPIEDADES GEOMÉTRICAS DE LA CAÑA** **GUADÚA**

### **3.1 LA ESTRUCTURA VEGETAL DE LA CAÑA GUADÚA:**

La parte externa de la pared de la caña guadúa es densa, pero tiene solo un cuarto de milímetro de espesor. Este sector externo está constituido por sílice, un excelente material para proteger la caña guadúa, pero una desventaja para las herramientas de trabajo ya que la sílice desgasta los bordes de los machetes en un periodo más corto que el normal.

Del exterior al interior en la sección transversal de la caña guadúa se encuentran secciones con fibras de celulosa junto a pequeños vasos. La celulosa actúa como refuerzo similar a las barras de acero en el hormigón reforzado, o como las fibras de vidrio en el plástico reforzado por fibras. Estas fibras de celulosa están concentradas cerca de la parte externa de la caña guadúa. Los pequeños vasos sirven para el paso de líquidos en el interior de la caña guadúa durante su periodo de vida en la plantación. La caña guadúa está constituida por tejidos vegetales denominados parénquima, y son los lugares en los cuales las fibras de la caña guadúa están embebidas. Aproximadamente, una caña guadúa está constituida por un cuarenta por ciento de fibras, diez por ciento de vasos y cincuenta por ciento de parénquima.

La resistencia contra el pandeo o flexión; es decir, la rigidez de la caña guadúa mediante esta distribución de la micro estructura, es un diez por ciento más alta que con cualquier otra distribución se podría obtener.

Cuando se considera a un material para el uso de construcción de estructuras, la principal preocupación es la seguridad que ofrece este material a las personas que van a vivir dentro de ella; por eso, debe determinarse las propiedades físicas, mecánicas y la resistencia que ofrece la caña guadúa para poder considerar el comportamiento que puede tener al someterla a los diferentes esfuerzos que se somete una estructura.

La caña guadúa, por ser un material natural, tiene una amplia variedad de diferencias en sus características geométricas, como son: diámetros, espesores, distancia de entrenudos, y las imperfecciones de pandeo a lo largo de su altura alejándose del suelo. Así mismo se podría encontrar que se tiene un rango muy amplio de resistencia a las diferentes sollicitaciones a las que se la someta. Si esto es así, debería considerarse un factor de seguridad muy alto debido a que existe una amplia variedad de especímenes buenos o malos.

Un factor de seguridad muy alto podría ser malo para la optimización del material, debido a que se deberían usar mas cañas guadúa en la estructura, pero esto podría ser contrarrestado, debido al bajo costo que presentan las cañas guadúa en el Ecuador. Es decir que el uso de la caña guadúa como material de construcción para estructuras puede ser poco óptima por la gran variedad de resistencias que pueden ofrecer.

En el Ecuador nos encontramos en una zona de muy alta sismicidad, debido a que estamos dentro de uno de los lugares más activos del anillo de fuego; entonces, las estructuras de caña guadúa que se construyan, estarán afectadas muy probablemente por terremotos, los cuales incrementarán los esfuerzos aplicados, pero debido al bajo peso de ésta, se puede tener un

cortante basal bajo, ésto sumado a un alto factor de seguridad, puede ocasionar que las estructuras de caña guadúa no registren mucho daño y permanezcan en buenas condiciones. Es decir, si una estructura de caña guadúa es diseñada y construida con los criterios ingenieriles correctos, ésta puede ser un buen lugar seguro para permanecer durante el evento de un sismo.

El bajo peso de la caña guadúa puede ser una característica importante si se compara la alta resistencia que ofrece con un bajo peso propio, lo que disminuye la carga muerta en la estructura. En cuanto a la rigidez que ofrece la caña guadúa, debe determinarse las deformaciones que tiene en los diferentes esfuerzos; se puede tener una relación alta entre el modulo de elasticidad de la caña guadúa y su densidad.

El bajo peso de la caña guadúa también lo hace un material perfecto para resistir fuerzas laterales como los sismos; así como su forma hueca le otorga mayor rigidez.

### **3.2 INFLUENCIA DE LAS PROPIEDADES Y RELACIONES GEOMÉTRICAS EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA CAÑA GUADÚA**

Las propiedades mecánicas de la caña guadúa serán detalladas y evaluadas con mayor detalle en los siguientes capítulos. Una propiedad mecánica muy importante es el peso específico. Según Jules Janssen la densidad de la caña guadúa varía de 700 a 800 kg/m<sup>3</sup>, según el lugar de la plantación. Esta propiedad es muy importante debido a que mientras mayor sea la masa por volumen, la caña guadúa será más pesada debido a la alta

cantidad de moléculas presentes en una unidad de volumen, y más densa la caña.

Un material denso se requiere en ciertos aspectos; la relación de la densidad y la resistencia da algunos aspectos positivos. Por ejemplo, un aspecto importante en la falla de la caña guadúa con esfuerzos de flexión, es que la falla de flexión de la caña guadúa en realidad no es una falla. Cuando un ensayo de flexión es desarrollado en una viga de caña guadúa al llegar a su máxima resistencia a la flexión, todas las fibras de la caña, a lo largo de su longitud, todavía permanecen sin ningún tipo de daño. Lo que ocurre es que las fibras se separan entre ellas y se pierde la forma cilíndrica en su sección transversal, también disminuye su resistencia. Si la carga a la que estaba sometida la caña es retirada, la caña guadúa regresará a su forma original.

Este fenómeno de falla a flexión de la caña guadúa es muy importante en la práctica cuando una estructura de caña guadúa es sometida a un sismo muy intenso, ya que algunos elementos dentro de la estructura pueden fallar; pero al finalizar el sismo la estructura se encontraría todavía en pie, esto podría darles a las personas dentro de la estructura la posibilidad de evacuar el lugar y poder salvarse de algún derrumbamiento de la estructura.

La caña guadúa es un buen material para la construcción, pero sus propiedades mecánicas no son conocidas. Se deben estudiar todas las propiedades de la caña que son de interés para los ingenieros civiles, incluyendo las físicas, mecánicas, estructurales y la naturaleza química del material de la caña guadúa. Se debe evaluar las diferentes relaciones que puedan existir en estas propiedades de la caña guadúa que puedan afectar

directamente o indirectamente su resistencia en el diseño de estructuras de caña guadúa.

Es indispensable determinar a través de ensayos confiables el mayor número de propiedades físicas y mecánicas en el laboratorio como herramienta fundamental en el diseño científico de elementos estructurales de caña guadúa en Ecuador.

Se deben realizar las siguientes acciones:

- Hacer un estudio sobre el comportamiento de la caña guadúa sometida a compresión. Evaluar la influencia del espesor de la caña guadúa en la resistencia a la compresión de la caña guadúa. Evaluar la influencia de las diferentes dimensiones que tienen los diámetros exterior e interior de la caña guadúa en su resistencia de esfuerzos de compresión.
- Evaluar la influencia que tiene la forma estructural de las propiedades geométricas y los elementos que componen la caña guadúa y su resistencia a la compresión. Ensayos de compresión deben hacerse en cañas guadúas para determinar el esfuerzo máximo a compresión que resiste la caña guadúa. Los especímenes para las pruebas deben tener diferentes configuraciones de números de nudos y entrenudos. Evaluando si es que la longitud del entrenudo o el número de nudos influyen mucho en la resistencia a la compresión de la caña guadúa.
- Realizarse pruebas de flexión para cañas de diferentes diámetros y espesores. Analizar si existe alguna relación entre los esfuerzos a flexión que se desarrollan en la caña guadúa y el diámetro y el espesor de la caña guadúa, o concluir si es que los esfuerzos que se generan en las cañas guadúas son independientes del diámetro y el espesor de la caña guadúa. Evaluar si es que los esfuerzos que

afectan a la caña son menores cuando tiene mayores diámetros. Se debe evaluar si existe alguna relación entre la longitud del entrenudo y el número de nudos en las pruebas de flexión.

- La resistencia a la tensión debe ser evaluada en la caña guadúa, el espesor de la pared de la caña debe ser una variable que influya en esta resistencia, así como la variación de la longitud del entrenudo.

### **3.3 PROPIEDADES GEOMÉTRICAS DE LA CAÑA GUADÚA**

Por ser liviana, flexible, resistente, por su forma cilíndrica y hueca, la caña guadúa es un material que, al ser usado con un buen diseño estructural, contribuye a un buen comportamiento durante los sismos. Se debe descartar elementos que presenten defectos tales como grietas, elementos curvados y daños producidos por agentes exteriores.

Las propiedades geométricas importantes de la estructura de la caña guadúa, que pueden tener una relación con su comportamiento estructural, son la longitud del entrenudo, el diámetro y el espesor de la pared de la caña guadúa a lo largo de la longitud del tallo.

Un aspecto característico de la caña guadúa es la distribución de las longitudes de los entrenudos a lo largo de la longitud de la caña guadúa en función del número de entrenudos. En la base de la caña hay entrenudos de menor longitud, y hay un número mayor de entrenudos, a medida que se va subiendo en la altura de la caña hacia la mitad, la longitud de entrenudos aumenta y el número de entrenudos decrece, y a medida que se llega a la mayor altura de la caña, las longitudes de entrenudos son mucho más largas y el número de entrenudos decrece con relación a las partes más bajas.

Para probar que la eficiencia estructural cilíndrica de la caña guadúa es muy buena se debe hacer evaluaciones estadísticas de las diferentes dimensiones geométricas de la caña guadúa como son: su espesor, los diámetros interior y exterior y la longitud de entrenudos.

El objetivo sería encontrar una relación entre el diámetro de la caña con la longitud del entrenudo, o una relación matemática entre el diámetro y la longitud del entrenudo, así como una longitud promedio de los entrenudos de la caña guadúa; es decir, evaluar las relaciones que podría haber entre estas propiedades geométricas de la caña guadúa, y evaluar la influencia que tienen todos los elementos geométricos de la estructura de la caña guadúa en su capacidad estructural.

La caña guadúa tiene una sección transversal hueca, es cilíndrica, se debe evaluar la forma en la que la estructura de la misma afecta a la eficiencia de este material.

Evaluando los efectos que ocasiona la forma de la estructura de la caña guadúa se hace la relación entre el momento de inercia (I) y el área de la sección transversal (A):

Para la caña guadúa las siguientes fórmulas son válidas:

$$I = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64}$$
$$A = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4}$$

$$\pi = 3.14$$

D = Diámetro externo

$d$  = diámetro interno

Para comparar  $I$  y  $A$  debemos elevar al cuadrado el área  $A$ :

$$A^2 = \frac{\pi^2(D^4 - 2D^2d^2 + d^4)}{16}$$

Haciendo la relación entre  $I$  y  $A$ :

$$\frac{I}{A^2} = \frac{\frac{\pi(D^4 - d^4)}{64}}{\frac{\pi^2(D^4 - 2D^2d^2 + d^4)}{16}}$$

$$\frac{I}{A^2} = \frac{D^4 - d^4}{4\pi(D^4 - 2D^2d^2 + d^4)}$$

Siendo  $t$  el espesor de la caña guadúa:

$$\alpha = \frac{d}{D} = \frac{d}{d+2t} < 1$$

$$d = \alpha D$$

$$\frac{I}{A^2} = \frac{D^4 - (\alpha D)^4}{4\pi(D^4 - 2D^2(\alpha D)^2 + (\alpha D)^4)}$$

$$\frac{I}{A^2} = \frac{1 - \alpha^4}{4\pi(1 - 2\alpha^2 + \alpha^4)}$$

Por evaluaciones estadísticas llevadas a cabo en este estudio:

$\alpha_{min} = 0.6$  ; para cañas de espesores máximos.

$\alpha_{max} = 0.85$  ; para cañas de espesores mínimos.

$\alpha_{min} = 0.6$  ;

$$\frac{I}{A^2} = \frac{1 - (0.6)^4}{4\pi(1 - 2(0.6)^2 + (0.6)^4)}$$

$$I = 0.17(A^2)$$

$\alpha_{max} = 0.85$

$$\frac{I}{A^2} = \frac{1 - (0.85)^4}{4\pi(1 - 2(0.85)^2 + (0.85)^4)}$$

$$I = 0.49(A^2)$$

En conclusión, la inercia de las cañas guadúa llega a ser mejor cuando tienen menor espesor.

- La relación de inercia y área de una sección rectangular ( $h=2b$ ) es  $I = 0.16(A^2)$ .
- La relación de inercia y área de una sección cuadrada ( $h=b$ ) es  $I = 0.08(A^2)$ .

En conclusión, la forma cilíndrica de la caña guadúa le da una mejor inercia que con cualquier otra forma tradicional que se utilizan en las construcciones de diseño de hormigón. Un ingeniero siempre necesita un momento de inercia para sus cálculos. Con un material cónico como la caña guadúa el mejor método es medir los diámetros y espesores de ambos extremos y con el diámetro medio y el espesor medio se puede calcular un valor de momento de inercia del lado conservador.

### **3.4 INFLUENCIA DE LAS DEFORMACIONES NATURALES DE LA CAÑA**

La caña guadúa no se la encuentra completamente vertical en las plantaciones debido a los efectos que tienen las cargas de viento en las plantaciones. El diámetro y el espesor de la caña guadúa decrecen con la altura desde la base hasta la parte superior. En la parte superior, en el sector donde existe un decrecimiento dramático del diámetro y espesor, el número de ramas y hojas crece y la caña tiene menos vasos conductores de savia, incrementando la cantidad de fibras en la sección que son capaces de soportar los esfuerzos de flexión ocasionados por el viento.

Una caña guadúa curvada no es apropiada para usarla como viga o columna, pero con un sistema apropiado se puede seleccionar las cañas que son suficientemente rectas. Los nudos son un problema porque no

existe una longitud de entrenudos constante y se recomienda preferiblemente colocar los soportes, juntas y cargas sobre los nudos.

La estructura de la edificación debe soportar el peso propio de todos sus elementos: paredes, cubierta y sollicitaciones que demanden los sismos. En la estructura existen elementos horizontales llamados vigas y elementos verticales llamados columnas. Un buen diseño de la estructura le proveerá una larga vida de diseño y estabilidad a la edificación.

Las columnas de caña guadúa no pueden enterrarse directamente en el suelo o empotrarse en el hormigón porque no puede ser expuesta a la humedad, por lo que se necesita instalar un sistema de cimentación adecuado para que se aisle a la caña guadúa de la humedad del suelo y de la lluvia.

De acuerdo a las cargas y al diseño ingenieril de la edificación, se utilizan el número de elementos verticales o columnas que se necesiten. Las columnas de la edificación deben estar fijadas apropiadamente a la cimentación y si es posible se las debe arriostrar para evitar movimientos laterales. Preferiblemente se deben seleccionar para las columnas las cañas guadúas más gruesas, asentadas sobre un nudo.

#### **3.4.1 Ensayos en columnas**

Dentro de las aplicaciones que tiene la caña guadúa en la construcción, se pueden nombrar ejemplos de uso como soportes y en apoyos verticales de armadores de cubiertas y puentes y en apoyos verticales en las edificaciones. Una columna es un elemento sometido a la compresión, el

cual si es lo suficientemente delgado respecto de su longitud, podría llegar a romperse bajo la acción de una carga mucho menor, por pandeo lateral, que la necesaria para fallar por aplastamiento. Siendo así, se considera importante ensayar con cañas de diferentes longitudes con efecto de medir la variación de la resistencia respecto a la esbeltez de los mismos. La relación de esbeltez es la relación entre la longitud de la columna y el radio de giro de la sección.

### **3.4.2 Comportamiento de columnas en guadúa**

Se debe determinar los parámetros mecánicos necesarios para establecer el comportamiento de las columnas de caña guadúa en las zonas elásticas e inelásticas, tales como el esfuerzo crítico a la compresión paralela a la fibra y el modulo de elasticidad. Se debe establecer un factor de seguridad adecuado para establecer el comportamiento de las columnas, se puede recomendar un factor de seguridad igual a tres. Debido a la carencia de normas técnicas sobre la caña guadúa, se debe partir de las condiciones más críticas.

### **3.4.3 Pandeo**

El pandeo es una inestabilidad que puede ocurrir en una columna esbelta, sometida a carga axial. El pandeo de una columna de caña guadúa puede ser calculado con la ecuación de Euler. Resulta necesario evaluar la influencia que tendrán el momento de inercia variable debido a la variación del diámetro, los nudos, y las deformaciones naturales que tienen algunas cañas guadúas.

La ecuación de Euler puede ser aplicada pero se necesitarían algunos factores de corrección debido a los factores variables de la geometría de la

caña a lo largo de su longitud como en su sección transversal. Para la mayoría de las cañas guadúas se puede asumir la inercia media calculando la inercia en ambos extremos de la caña y promediándolos, teniendo una inercia conservadora para poder usarla en los cálculos de la ecuación de Euler para calcular el pandeo en columnas.

Tradicionalmente, las construcciones de caña guadúa se construyen por experiencias prácticas, sin ningún diseño con base científica. En general, el pandeo de la columna se considera que es uno de los modos críticos de fallo en las construcciones de caña guadúa, que conduce a un colapso estructural general.

Se necesita determinar la capacidad de compresión y de la capacidad de flexión de la caña guadúa estructural, para poder desarrollar del diseño de un método de cálculo del estado límite de pandeo en columnas de caña guadúa estructural.

Como material orgánico heterogéneo natural, la caña guadúa tiene grandes variaciones evidentes de las propiedades físicas a lo largo de la longitud, tales como diámetros externos e internos. Por lo tanto, el efecto no prismático es significativo en el análisis de la columna de pandeo.

#### **3.4.4 La caña guadúa esbelta sometida a flexo compresión**

Refiriéndose a la caña guadúa, la metodología para el cálculo de la caña solicitada a esfuerzos de flexo-compresión, debe tomar en cuenta el efecto de la deformación natural de la caña que pueda ocasionar efectos de segundo orden en el elemento esbelto o no.

En el caso de un elemento esbelto se amplifica el esfuerzo normal teniendo en cuenta los efectos desestabilizadores. La caña guadúa es una alternativa eficiente para la construcción de estructuras sismo resistentes y compatibles con el medio ambiente. La caña guadúa se la puede utilizar como elemento sometido a compresión en forma de columna o de puntal o como una viga. No se han hecho investigaciones en el aspecto estadístico sobre valores de las propiedades mecánicas ni de la resistencia ni de deformación.

Debe ser útil para el trabajo actual realizar una formulación teórica para poder seleccionar y verificar si el elemento trabajará correctamente, sometido a cargas de flexo-compresión, y realizar pruebas mecánicas de laboratorio para encontrar las propiedades mecánicas y así poder diseñar correctamente el elemento.

Debido a la esbeltez de las cañas guadúa, el pandeo de columna es siempre crítico en las columnas, sobre todo en los miembros de compresión con pocas restricciones. Además, también es importante para incorporar la no uniformidad de rigidez a la flexión a lo largo de la longitud de la caña ya que tanto el área de sección transversal y el módulo de Young varían significativamente desde la parte superior a la parte inferior de una caña.

### **3.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS PROPIEDADES GEOMÉTRICAS DE LA CAÑA GUADÚA**

Para los propósitos del cálculo usando las cañas guadúa, es necesario determinar antes sus características geométricas y mecánicas. Dado que los parámetros que caracterizan a la caña guadúa son el diámetro exterior, el diámetro interior y el espesor de la pared de la caña, estas cantidades no

están vinculadas por los informes analíticos. Por lo tanto, se considera que se debe hacer un análisis estadístico de estas cantidades y evaluar los valores de los parámetros de probabilidad en virtud de la probabilidad aceptada normalmente en el diseño estructural. Por lo tanto, sólo se utiliza el valor del diámetro exterior y de acuerdo con esta cantidad se proporcionan todos los parámetros necesarios para el diseño.

De una población de 246 muestras de caña guadúa de diversos orígenes se han medido los diámetros interno y externo, espesor de la pared de la caña y longitud de los entrenudos. Estas cantidades se muestran en la Tabla N°4.

Tabla 4: Total de muestras de caña guadúa para análisis geométrico.

Nro. De muestra	Diametro exterior (cm)	Diametro interior (cm)	Espesor (cm)	S. Internudo (cm)
1	10.18	8.06	1.05	37.75
2	12.56	7.94	2.23	19.00
3	10.67	7.50	1.46	19.50
4	10.26	6.16	2.02	20.25
5	10.82	9.00	1.01	32.25
6	11.55	8.44	1.66	20.25
7	10.30	7.62	1.24	23.50
8	10.15	7.60	1.10	25.25
9	10.19	7.28	1.34	22.75
10	9.96	6.93	1.69	18.50
11	9.22	7.70	0.79	38.00
12	11.47	8.94	1.29	16.50
13	10.40	8.45	0.87	35.75
14	12.76	9.60	1.83	24.25
15	14.60	9.80	1.79	17.25
16	10.86	7.77	1.54	20.00
17	10.74	9.10	0.80	48.00
18	10.84	7.98	1.75	24.50
19	10.40	8.52	0.78	34.50
20	11.76	7.77	2.19	18.75
21	10.73	7.08	1.69	19.50
22	10.04	7.73	1.22	22.25

23	10.16	7.23	1.53	23.75
24	13.20	10.02	1.95	20.50
25	10.20	7.33	1.47	20.25
26	11.25	8.00	1.75	15.25
27	10.58	8.03	1.38	23.00
28	10.55	7.89	1.28	31.25
29	11.20	7.63	1.81	22.50
30	10.02	8.12	1.05	31.00
31	10.02	6.91	1.42	20.00
32	11.32	7.90	1.81	18.25
33	10.55	7.88	1.18	20.50
34	10.58	7.56	1.38	20.50
35	10.91	7.92	1.42	21.50
36	9.41	8.04	0.85	35.75
37	10.05	6.74	1.74	18.25
38	10.37	8.73	0.83	34.00
39	12.42	8.72	1.81	20.00
40	10.50	7.32	1.46	20.50
41	9.88	7.44	1.44	23.25
42	12.07	8.52	1.86	26.00
43	11.33	8.49	1.44	20.75
44	12.79	9.40	1.94	20.25
45	13.01	10.31	1.74	20.25
46	11.06	8.58	1.24	25.25
47	12.05	8.41	1.87	26.00
48	11.04	7.01	1.98	19.00
49	12.32	8.51	1.70	19.50
50	11.32	8.41	1.30	21.50
51	10.76	8.63	1.00	29.00
52	10.57	8.06	1.29	23.25
53	11.16	8.40	1.42	25.25
54	10.75	8.67	1.02	28.75
55	11.41	7.68	1.52	19.00
56	12.88	8.12	2.51	18.00
57	11.34	7.94	1.46	26.00
58	11.94	7.73	1.70	20.75
59	11.64	7.88	1.88	22.25
60	11.24	8.23	1.50	28.50
61	12.52	7.76	2.29	16.00
62	10.68	7.46	1.82	20.75
63	12.40	9.80	1.21	23.00
64	10.55	7.36	1.66	18.25
65	11.54	7.93	1.73	17.50

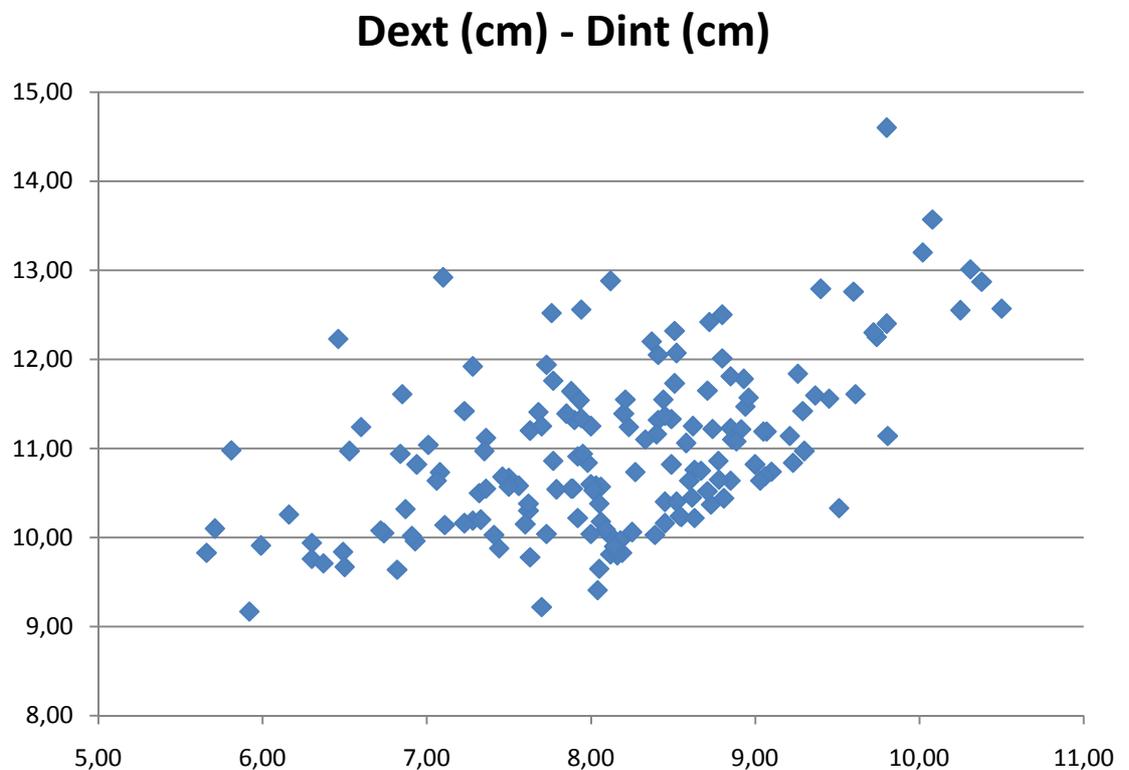
66	11.92	7.28	2.35	17.50
67	11.25	8.62	1.21	30.00
68	10.97	9.30	0.78	42.50
69	12.50	8.80	1.67	15.75
70	11.12	7.36	1.67	17.75
71	10.52	8.71	0.86	34.00
72	11.22	8.74	1.12	20.75
73	10.64	7.06	1.83	18.75
74	12.25	9.74	1.15	23.67
75	11.19	9.07	1.15	29.33
76	11.78	8.93	1.52	17.75
77	9.94	6.30	1.75	18.75
78	10.54	7.79	1.52	21.75
79	10.08	6.72	1.41	19.75
80	11.10	8.33	1.44	28.00
81	10.94	7.95	1.38	37.00
82	10.64	8.60	0.97	32.00
83	11.81	8.85	1.87	48.75
84	11.25	7.70	1.78	22.50
85	10.82	6.94	2.16	18.00
86	10.94	6.84	1.78	18.75
87	11.24	6.60	1.95	14.25
88	11.23	8.85	1.19	34.00
89	10.98	5.81	2.14	16.25
90	11.57	8.96	1.29	20.50
91	10.09	8.09	1.00	25.67
92	10.03	7.41	0.88	33.50
93	11.56	9.45	1.03	35.25
94	12.23	6.46	2.82	16.75
95	12.01	8.80	1.62	36.67
96	11.73	8.51	1.60	19.25
97	11.61	6.85	2.76	18.25
98	11.42	7.23	2.46	15.00
99	10.38	7.62	1.51	23.75
100	10.33	9.51	0.91	40.50
101	12.57	10.50	1.27	26.75
102	10.97	7.35	1.92	20.75
103	10.64	8.85	0.91	33.33
104	11.10	8.86	1.51	41.50
105	10.38	8.05	1.05	27.00
106	12.55	10.25	1.14	35.50
107	10.65	8.78	1.22	31.00
108	11.14	9.81	1.33	27.00

109	9.17	5.92	1.41	16.75
110	9.83	5.66	1.83	18.20
111	9.78	7.63	1.40	22.50
112	12.20	8.37	1.77	19.00
113	10.03	8.39	0.71	31.25
114	10.97	6.53	2.06	16.75
115	13.57	10.08	1.97	17.75
116	10.22	7.92	1.51	19.75
117	9.91	5.99	1.78	19.00
118	10.82	8.49	1.35	25.00
119	10.60	8.00	1.21	23.75
120	10.57	7.50	1.39	20.25
121	12.92	7.10	2.55	18.25
122	11.14	9.21	1.37	29.25
123	11.61	9.61	0.93	38.00
124	12.87	10.38	1.30	30.25
125	12.30	9.72	1.25	24.75
126	10.10	5.71	1.94	18.00
127	11.37	8.45	1.46	26.08
128	11.22	8.92	1.24	31.25
129	11.84	9.26	1.36	29.00
130	10.45	8.62	0.83	37.63
131	11.60	9.37	1.10	27.13
132	11.39	8.20	1.58	27.63
133	11.08	8.89	1.17	26.75
134	10.74	8.27	1.26	27.63
135	10.53	8.02	1.35	23.88
136	10.86	8.78	1.07	27.19
137	9.84	6.49	1.59	21.00
138	10.23	8.55	0.88	21.50
139	9.65	8.05	0.80	22.50
140	10.84	9.23	0.76	22.00
141	9.83	8.19	0.77	21.00
142	10.69	9.06	0.85	20.00
143	9.81	8.12	0.82	17.50
144	11.19	9.05	1.00	18.50
145	10.44	8.81	0.85	17.50
146	10.06	8.25	0.83	27.00
147	10.14	7.11	1.45	26.50
148	9.80	8.16	0.90	30.50
149	9.64	6.82	1.40	38.50
150	10.32	6.87	1.56	34.33
151	11.55	8.21	1.62	30.67

152	11.39	7.85	1.62	30.00
153	11.65	8.71	1.31	29.33
154	9.76	6.30	1.47	28.50
155	10.16	8.45	0.82	18.00
156	10.64	9.03	0.81	20.00
157	9.97	8.18	0.97	19.00
158	10.24	8.54	0.84	19.00
159	11.42	9.29	1.07	23.00
160	9.86	8.15	0.74	22.00
161	9.67	6.50	1.41	20.00
162	10.04	8.00	1.11	19.00
163	9.71	6.37	1.42	21.00
164	10.22	8.63	0.74	28.00
165	9.90	8.14	0.88	37.00

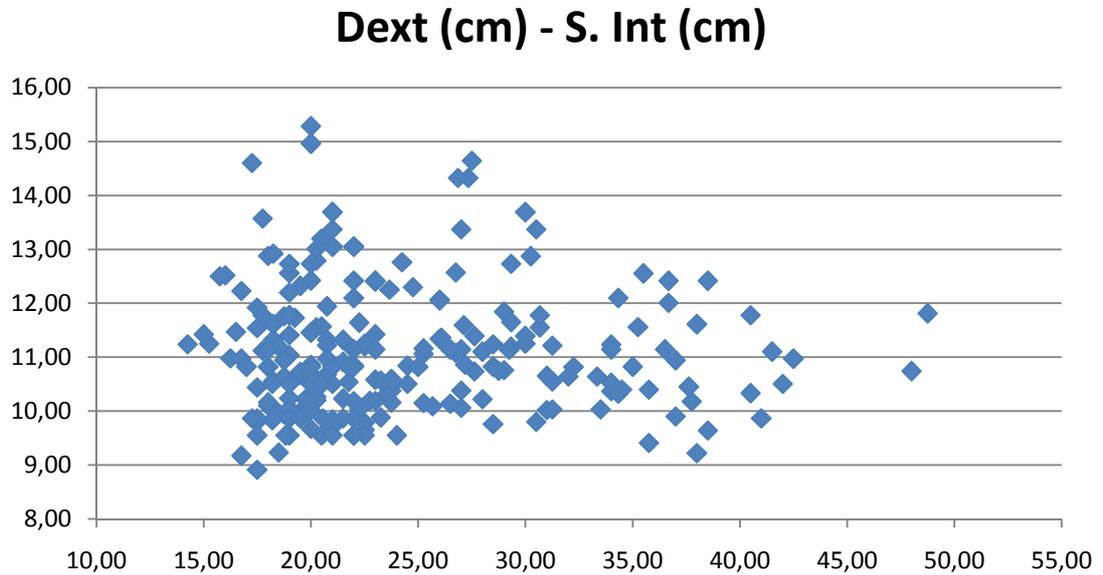
Fuente: Pedro Córdova

Figura 17: Variación del diámetro exterior de la caña guadúa vs. el diámetro interior. A medida que aumenta el diámetro exterior aumenta el diámetro interior. Son directamente proporcionales.



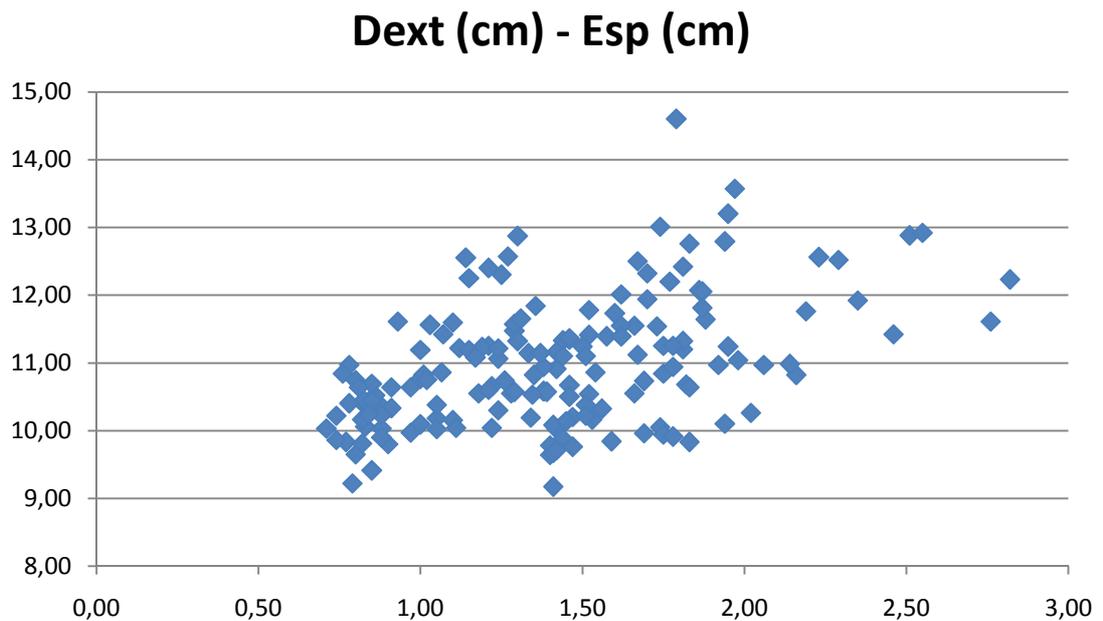
Fuente: Pedro Córdova

Figura 18: Variación del diámetro exterior de la caña guadúa vs. la longitud de entrenudo. A medida que disminuye el diámetro exterior, aumenta la longitud del entrenudo.



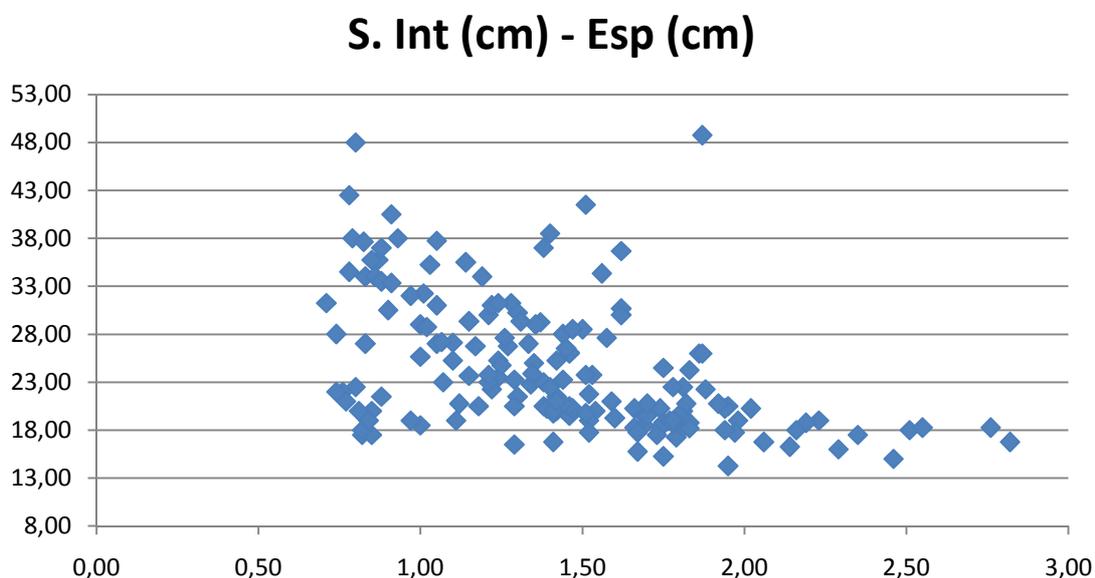
Fuente: Pedro Córdova

Figura 19: Variación del diámetro exterior de la caña guadúa vs. el espesor de la pared de la caña. A medida que aumenta el diámetro exterior aumenta el espesor de la pared de la caña.



Fuente: Pedro Córdova

Figura 20: Variación de la longitud del entrenudo de la caña guadúa vs. el espesor de la pared de la caña. A medida que disminuye la longitud del entrenudo disminuye el espesor de la pared de la caña.



Fuente: Pedro Córdova

Tabla 5: Análisis geométrico de las relaciones **espesor contra diámetro exterior (Esp/Dext)**, **diámetro interior contra diámetro exterior (Dint/Dext)**, **diámetro medio (Dm)**, **diámetro exterior contra longitud de entrenudo (Dext/S. Int)**.

Nro. De muestra	Esp/Dext	Di/De	Dm (cm)	Dext/S. Int
1	0.103	0.792	9.12	0.2697
2	0.178	0.632	10.25	0.6611
3	0.137	0.703	9.085	0.5472
4	0.197	0.600	8.21	0.5067
5	0.093	0.832	9.91	0.3355
6	0.144	0.731	9.995	0.5704
7	0.120	0.740	8.96	0.4383
8	0.108	0.749	8.875	0.4020
9	0.132	0.714	8.735	0.4479
10	0.170	0.696	8.445	0.5384
11	0.086	0.835	8.46	0.2426
12	0.112	0.779	10.205	0.6952
13	0.084	0.813	9.425	0.2909
14	0.143	0.752	11.18	0.5262
15	0.123	0.671	12.2	0.8464

16	0.142	0.715	9.315	0.5430
17	0.074	0.847	9.92	0.2238
18	0.161	0.736	9.41	0.4424
19	0.075	0.819	9.46	0.3014
20	0.186	0.661	9.765	0.6272
21	0.158	0.660	8.905	0.5503
22	0.122	0.770	8.885	0.4512
23	0.151	0.712	8.695	0.4278
24	0.148	0.759	11.61	0.6439
25	0.144	0.719	8.765	0.5037
26	0.156	0.711	9.625	0.7377
27	0.130	0.759	9.305	0.4600
28	0.121	0.748	9.22	0.3376
29	0.162	0.681	9.415	0.4978
30	0.105	0.810	9.07	0.3232
31	0.142	0.690	8.465	0.5010
32	0.160	0.698	9.61	0.6203
33	0.112	0.747	9.215	0.5146
34	0.130	0.715	9.07	0.5161
35	0.130	0.726	9.415	0.5074
36	0.090	0.854	8.725	0.2632
37	0.173	0.671	8.395	0.5507
38	0.080	0.842	9.55	0.3050
39	0.146	0.702	10.57	0.6210
40	0.139	0.697	8.91	0.5122
41	0.146	0.753	8.66	0.4249
42	0.154	0.706	10.295	0.4642
43	0.127	0.749	9.91	0.5460
44	0.152	0.735	11.095	0.6316
45	0.134	0.792	11.66	0.6425
46	0.112	0.776	9.82	0.4380
47	0.155	0.698	10.23	0.4635
48	0.179	0.635	9.025	0.5811
49	0.138	0.691	10.415	0.6318
50	0.115	0.743	9.865	0.5265
51	0.093	0.802	9.695	0.3710
52	0.122	0.763	9.315	0.4546
53	0.127	0.753	9.78	0.4420
54	0.095	0.807	9.71	0.3739
55	0.133	0.673	9.545	0.6005
56	0.195	0.630	10.5	0.7156
57	0.129	0.700	9.64	0.4362
58	0.142	0.647	9.835	0.5754

59	0.162	0.677	9.76	0.5231
60	0.133	0.732	9.735	0.3944
61	0.183	0.620	10.14	0.7825
62	0.170	0.699	9.07	0.5147
63	0.098	0.790	11.1	0.5391
64	0.157	0.698	8.955	0.5781
65	0.150	0.687	9.735	0.6594
66	0.197	0.611	9.6	0.6811
67	0.108	0.766	9.935	0.3750
68	0.071	0.848	10.135	0.2581
69	0.134	0.704	10.65	0.7937
70	0.150	0.662	9.24	0.6265
71	0.082	0.828	9.615	0.3094
72	0.100	0.779	9.98	0.5407
73	0.172	0.664	8.85	0.5675
74	0.094	0.795	10.995	0.5176
75	0.103	0.811	10.13	0.3815
76	0.129	0.758	10.355	0.6637
77	0.176	0.634	8.12	0.5301
78	0.144	0.739	9.165	0.4846
79	0.140	0.667	8.4	0.5104
80	0.130	0.750	9.715	0.3964
81	0.126	0.727	9.445	0.2957
82	0.091	0.808	9.62	0.3325
83	0.158	0.749	10.33	0.2423
84	0.158	0.684	9.475	0.5000
85	0.200	0.641	8.88	0.6011
86	0.163	0.625	8.89	0.5835
87	0.173	0.587	8.92	0.7888
88	0.106	0.788	10.04	0.3303
89	0.195	0.529	8.395	0.6757
90	0.111	0.774	10.265	0.5644
91	0.099	0.802	9.09	0.3931
92	0.088	0.739	8.72	0.2994
93	0.089	0.817	10.505	0.3279
94	0.231	0.528	9.345	0.7301
95	0.135	0.733	10.405	0.3275
96	0.136	0.725	10.12	0.6094
97	0.238	0.590	9.23	0.6362
98	0.215	0.633	9.325	0.7613
99	0.145	0.734	9	0.4371
100	0.088	0.921	9.92	0.2551
101	0.101	0.835	11.535	0.4699

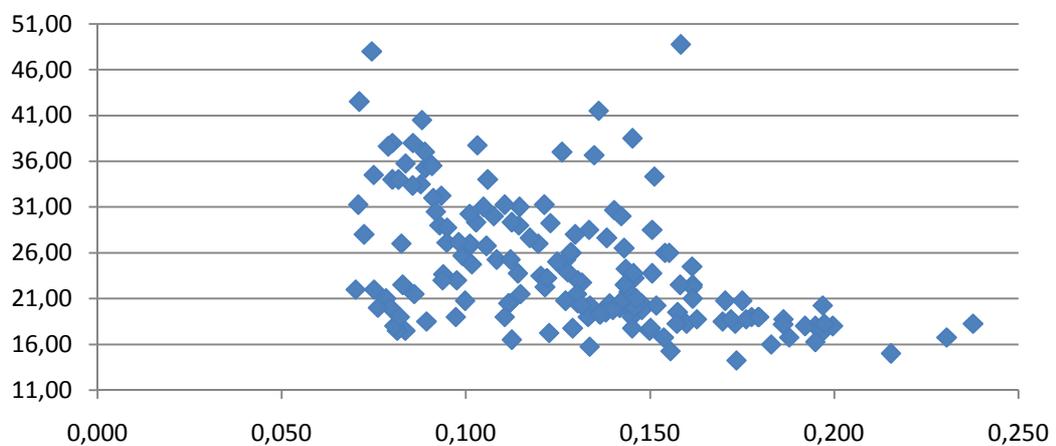
102	0.175	0.670	9.16	0.5287
103	0.086	0.832	9.745	0.3192
104	0.136	0.798	9.98	0.2675
105	0.101	0.776	9.215	0.3844
106	0.091	0.817	11.4	0.3535
107	0.115	0.824	9.715	0.3435
108	0.120	0.880	10.4741793	0.4126
109	0.154	0.646	7.545	0.5475
110	0.186	0.576	7.745	0.5401
111	0.143	0.780	8.705	0.4347
112	0.145	0.686	10.285	0.6421
113	0.071	0.836	9.21	0.3210
114	0.188	0.595	8.75	0.6549
115	0.145	0.743	11.825	0.7645
116	0.148	0.775	9.07	0.5175
117	0.180	0.604	7.95	0.5216
118	0.125	0.785	9.655	0.4328
119	0.114	0.755	9.3	0.4463
120	0.132	0.710	9.035	0.5220
121	0.197	0.550	10.01	0.7079
122	0.123	0.827	10.175	0.3809
123	0.080	0.828	10.61	0.3055
124	0.101	0.807	11.625	0.4255
125	0.102	0.790	11.01	0.4970
126	0.192	0.565	7.905	0.5611
127	0.128	0.744	9.9075	0.4359
128	0.111	0.795	10.065	0.3589
129	0.114	0.782	10.55	0.4083
130	0.079	0.824	9.5325	0.2777
131	0.095	0.808	10.48	0.4275
132	0.138	0.720	9.795	0.4123
133	0.106	0.802	9.9825	0.4142
134	0.117	0.770	9.5025	0.3886
135	0.128	0.761	9.2725	0.4410
136	0.098	0.808	9.8175	0.3994
137	0.162	0.660	8.165	0.4686
138	0.086	0.836	9.39	0.4758
139	0.083	0.834	8.85	0.4289
140	0.070	0.851	10.035	0.4927
141	0.078	0.833	9.01	0.4681
142	0.080	0.848	9.875	0.5345
143	0.084	0.828	8.965	0.5606
144	0.089	0.809	10.12	0.6049

145	0.081	0.844	9.625	0.5966
146	0.083	0.820	9.155	0.3726
147	0.143	0.701	8.625	0.3826
148	0.092	0.833	8.98	0.3213
149	0.145	0.707	8.23	0.2504
150	0.151	0.666	8.595	0.3006
151	0.140	0.711	9.88	0.3766
152	0.142	0.689	9.62	0.3797
153	0.112	0.748	10.18	0.3972
154	0.151	0.645	8.03	0.3425
155	0.081	0.832	9.305	0.5644
156	0.076	0.849	9.835	0.5320
157	0.097	0.820	9.075	0.5247
158	0.082	0.834	9.39	0.5389
159	0.094	0.813	10.355	0.4965
160	0.075	0.827	9.005	0.4482
161	0.146	0.672	8.085	0.4835
162	0.111	0.797	9.02	0.5284
163	0.146	0.656	8.04	0.4624
164	0.072	0.844	9.425	0.3650
165	0.089	0.822	9.02	0.2676

Fuente: Pedro Córdoba

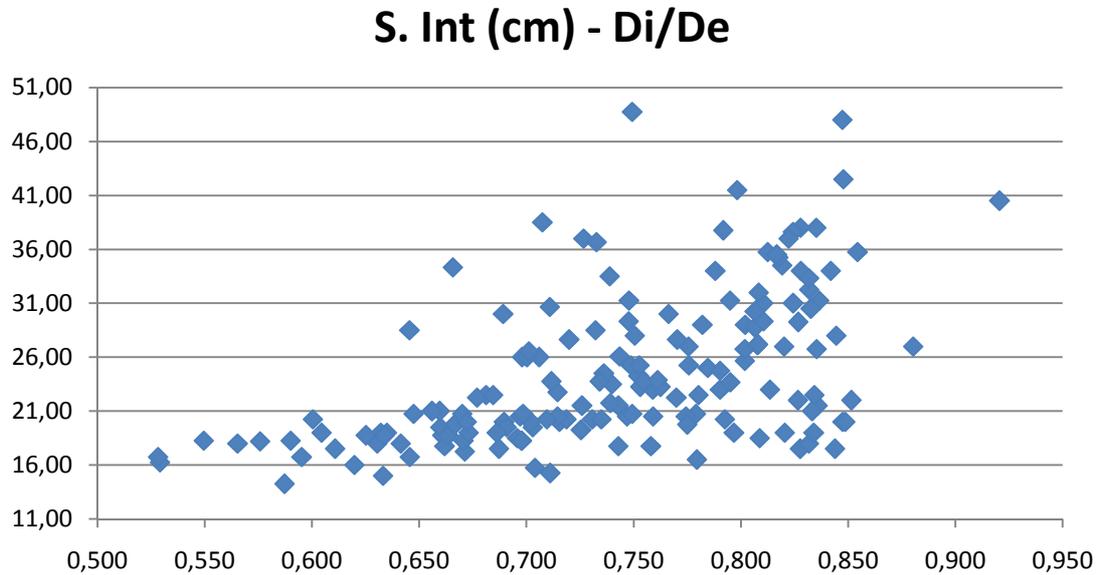
Figura 21: Variación de la longitud del entrenudo de la caña guadúa vs. la relación (Espesor/Diámetro exterior). A medida que aumenta la relación (Esp/Dext) disminuye la longitud del entrenudo.

### S. Int (cm) - Esp/Dext



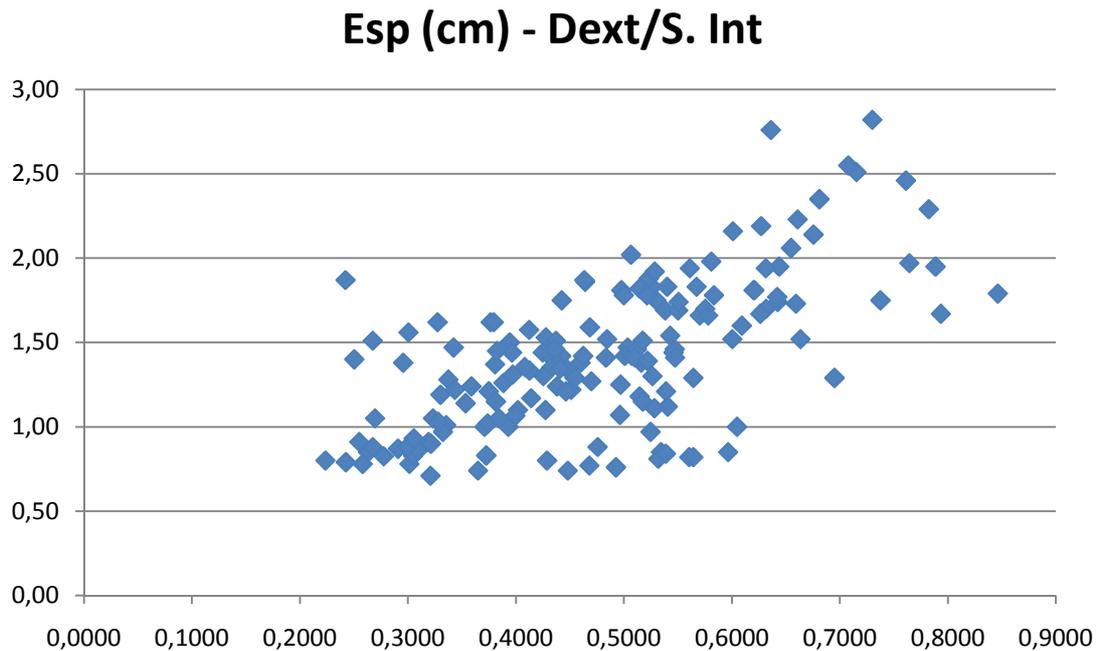
Fuente: Pedro Córdoba

Figura 22: Variación de la longitud del entrenudo de la caña guadúa vs. la relación (Espesor/Diámetro exterior). A medida que aumenta la relación (Dint/Dext) aumenta la longitud del entrenudo.



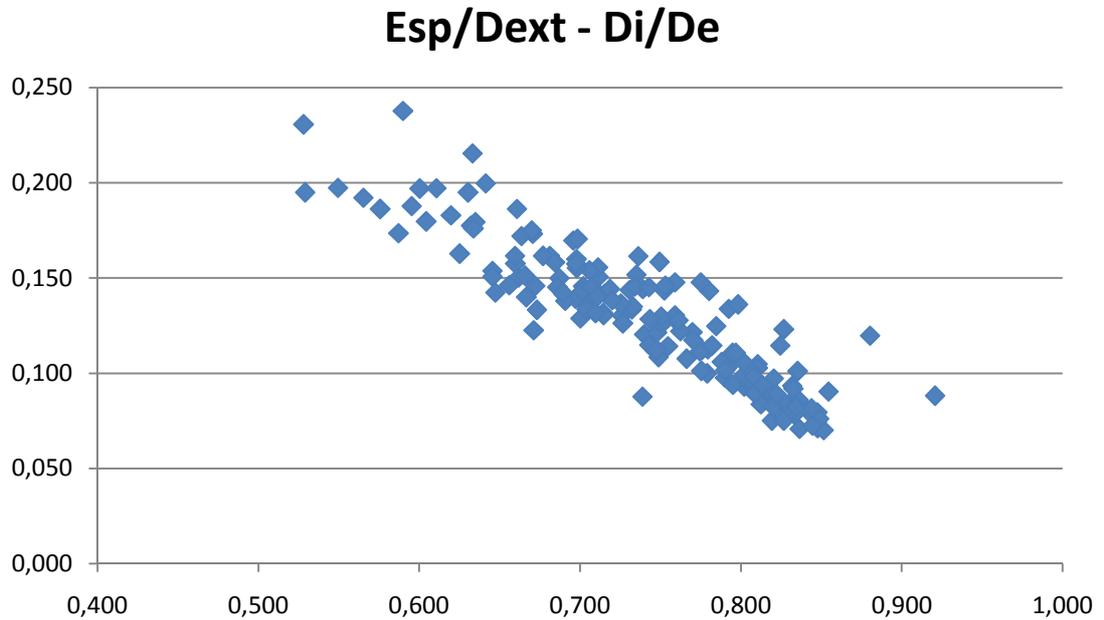
Fuente: Pedro Córdova

Figura 23: Variación del espesor de la pared de la caña guadúa vs. la relación (Diámetro exterior/Longitud de entrenudo). A medida que aumenta la relación (Dext/S. Int) aumenta el espesor de la pared de la caña.



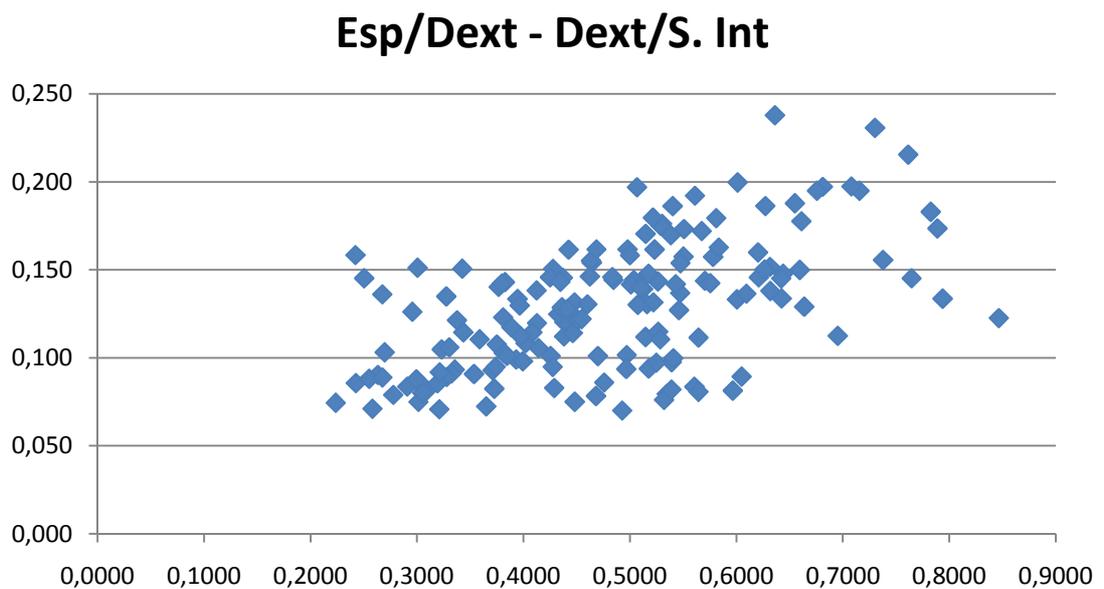
Fuente: Pedro Córdova

Figura 24: Variación de la relación (Espesor/Diámetro exterior) de la caña guadúa vs. la relación (Diámetro interior/diámetro exterior). A medida que aumenta la relación (Dint/Dext) disminuye la relación (Esp/Dext).



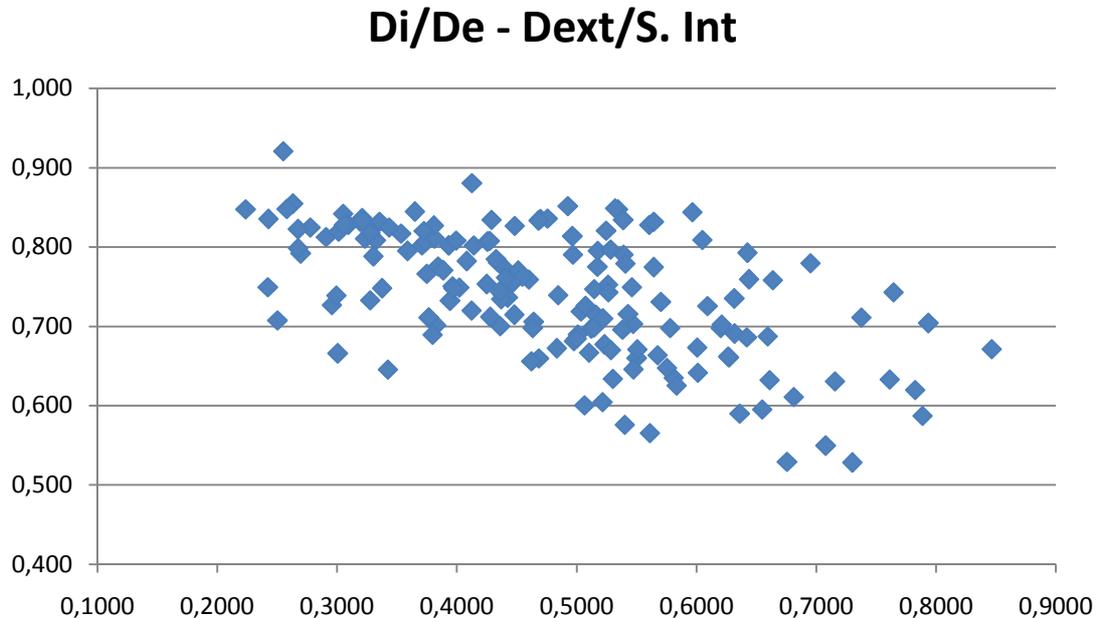
Fuente: Pedro Córdova

Figura 25: Variación de la relación (Espesor/Diámetro exterior) de la caña guadúa vs. la relación (Diámetro exterior/longitud de entrenudo). A medida que aumenta la relación (Dext/S. Int) aumenta la relación (Esp/Dext).



Fuente: Pedro Córdova

Figura 26: Variación de la relación (Diámetro interior/Diámetro exterior) de la caña guadúa vs. la relación (Diámetro exterior/longitud de entrenudo). A medida que aumenta la relación (Dext/S. Int) disminuye la relación (Dint/Dext).



Fuente: Pedro Córdova

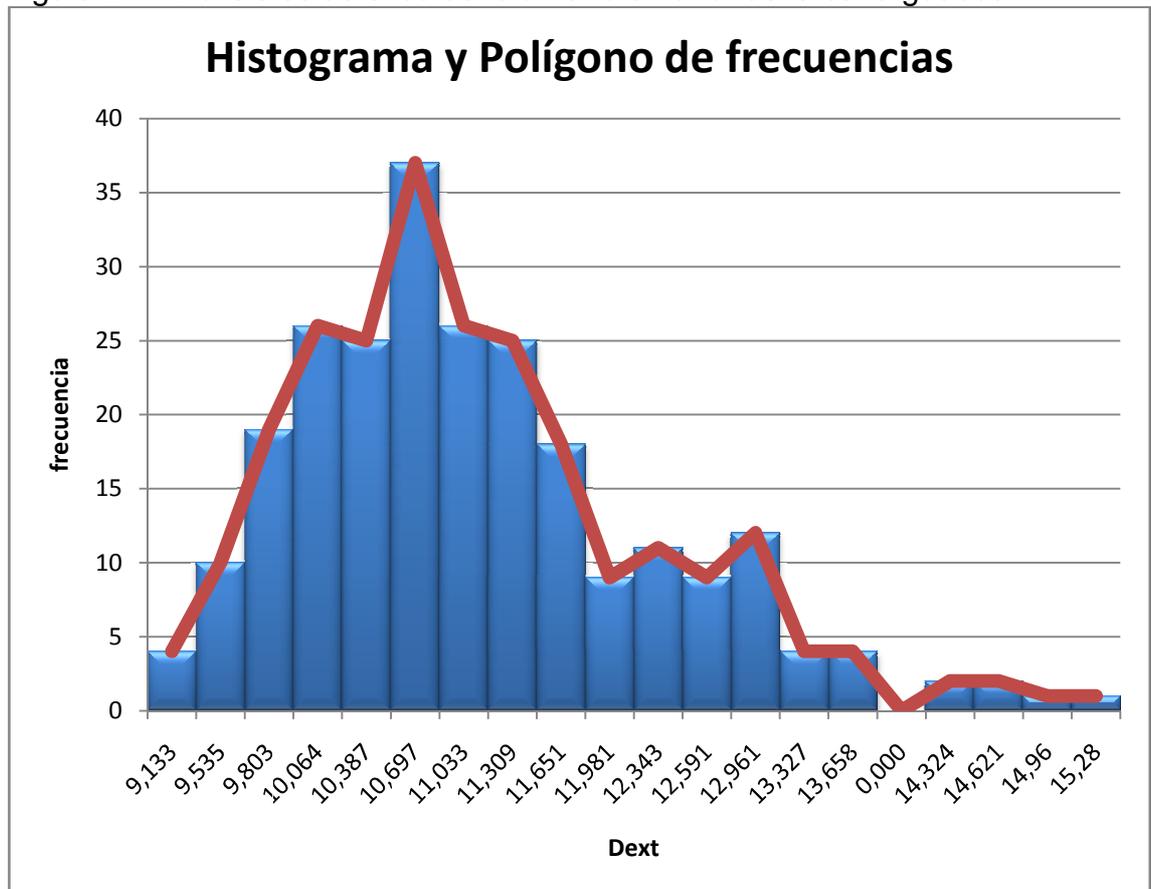
Habiendo hecho todo este análisis se concluye que la relación del diámetro medio (Dm) no es una relación que ayude a encontrar algún tipo de variación directamente o inversamente proporcional con alguna otra propiedad o relación geométrica de la caña guadúa. Algo muy importante a destacar es que la relación entre el espesor y el diámetro exterior (Esp/Dext) nos da mucha ayuda para poder encontrar relación con el resto de propiedades y relaciones geométricas de la caña guadúa.

### **3.5.1 Análisis estadístico de las propiedades geométricas de la caña guadúa como el diámetro exterior, espesor y longitud del entrenudo.**

De los gráficos de las figuras 27, 28 y 29 se puede analizar que tan frecuente se puede encontrar con la medida específica de la propiedad que se desea.

En la figura 27 se observa que el rango de mayor probabilidad del diámetro exterior de una caña guadúa se encuentra entre 9.803 cm y 11.651 cm, siendo el valor promedio máximo de 10.697 cm la medida común más probable que tenga una caña guadúa.

Figura 27: Análisis estadístico del diámetro exterior de la caña guadúa.



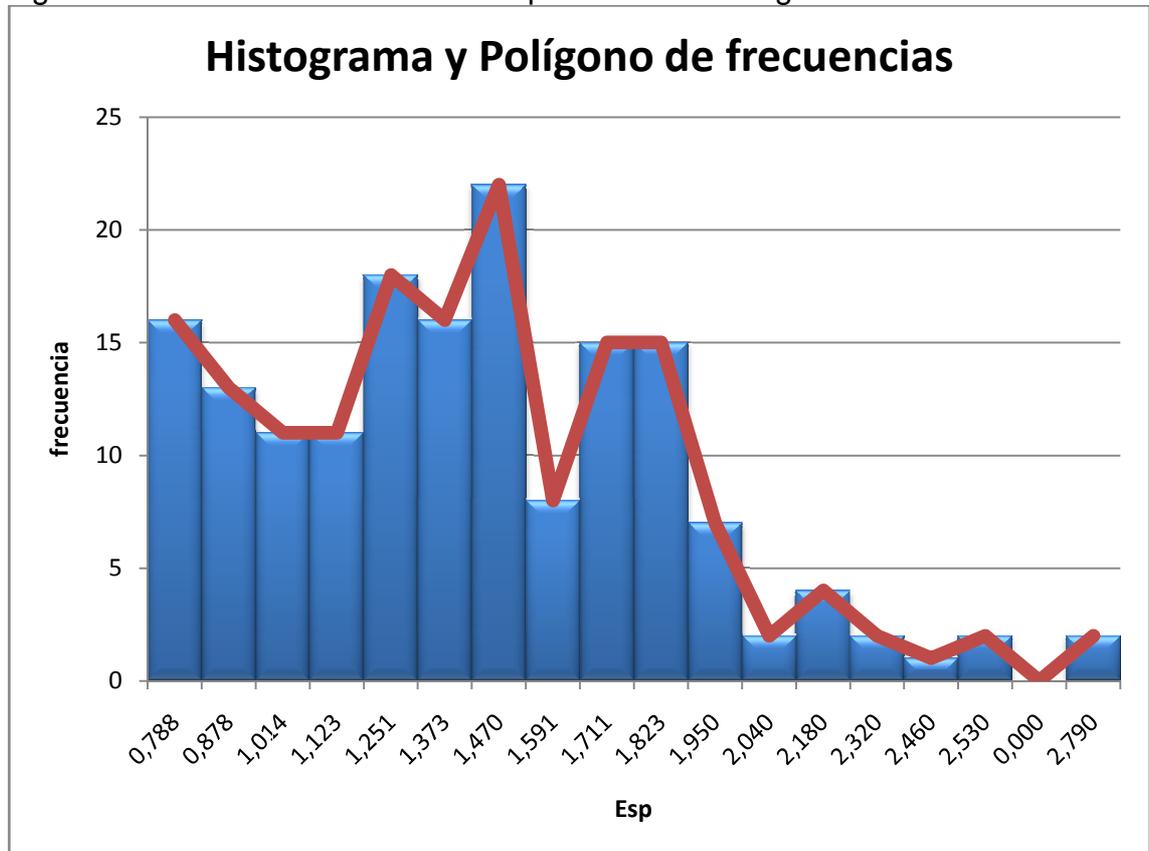
Fuente: Pedro Córdova

Tabla 6: Análisis estadístico del diámetro exterior de las cañas guadúa.

Dext Media =	11.130	cm
Desviación estándar (S) =	1.198	cm
Dextk =	9.159	cm
S/Dext Media =	0.108	

Fuente: Pedro Córdova

Figura 28: Análisis estadístico del espesor de la caña guadúa.



Fuente: Pedro Córdova

En la figura 28 se observa que el rango de mayor probabilidad del espesor de la pared de una caña guadúa se encuentra entre 0.788 cm y 1.823 cm, siendo el valor promedio máximo de 1.47 cm la medida común más probable que tenga una caña guadúa. En esta propiedad podemos encontrar mucha variación en los datos.

Tabla 7: Análisis estadístico del espesor de la pared de las cañas guadúa.

<b>Esp Media =</b>	<b>1.420 cm</b>
<b>Desviacion estandar (S) =</b>	<b>0.440 cm</b>
<b>Espk =</b>	<b>0.697 cm</b>
<b>S/Esp Media =</b>	<b>0.310</b>

Fuente: Pedro Córdova

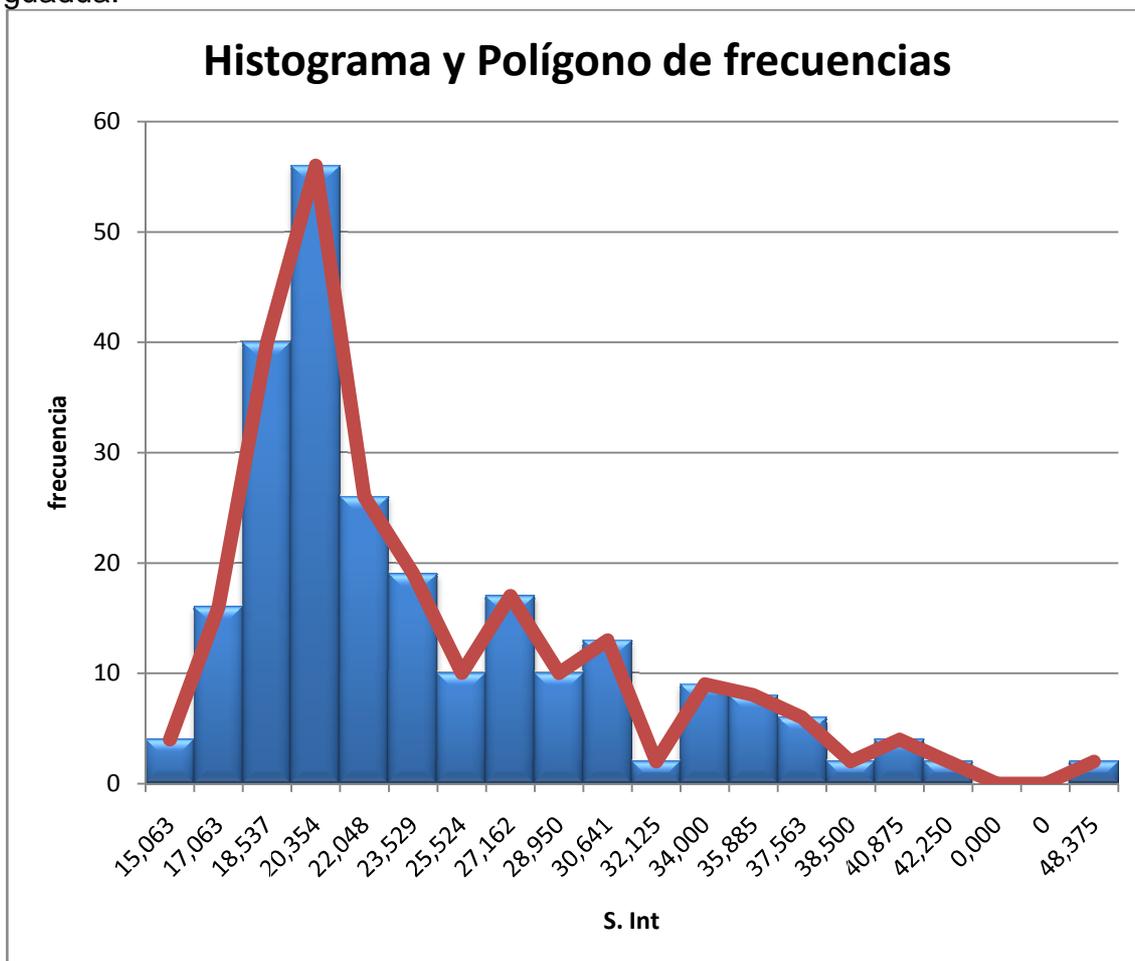
En la figura 29 se observa que el rango de mayor probabilidad de la longitud de entrenudos de una caña guadúa se encuentra entre 18.537 cm y 22.048 cm, siendo el valor promedio máximo de 20.354 cm la medida común más probable que tenga una caña guadúa.

Tabla 8: Análisis estadístico de la longitud de entrenudo de las cañas guadúa.

S. Int Media =	24.163 cm
Desviacion estandar (S) =	6.659 cm
S. Intk =	10.178 cm
S/S.Int Media =	0.276

Fuente: Pedro Córdova

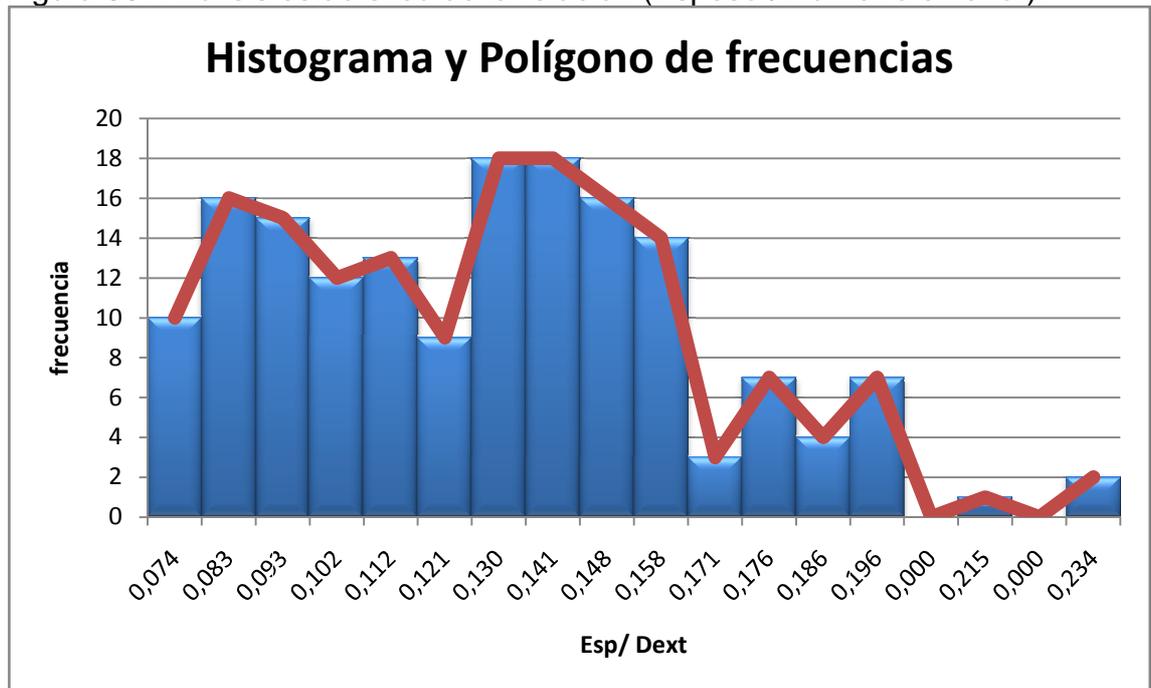
Figura 29: Análisis estadístico de la longitud de entrenudo de la caña guadúa.



Fuente: Pedro Córdova

**3.5.2 Análisis estadístico de las relaciones geométricas de la caña guadúa como el espesor contra diámetro exterior (Esp/Dext), diámetro interior contra diámetro exterior (Dint/Dext), diámetro exterior contra longitud de entrenudo (Dext/S. Int).**

Figura 30: Análisis estadístico de la relación (Espesor/Diámetro exterior).



Fuente: Pedro Córdova

Tabla 9: Análisis estadístico de la relación (Esp/Dext) de las cañas guadúa.

<b>Esp/Dext Media =</b>	<b>0.129</b>
<b>Desviacion estandar (S) =</b>	<b>0.036</b>
<b>(Esp/Dext)k =</b>	<b>0.070</b>
<b>S/Esp/Dext Media =</b>	<b>0.280</b>

Fuente: Pedro Córdova

Por lo tanto resulta que el valor característico de (Esp/Dext) con 5% de probabilidad de no ser sobrepasada es: **Fratil = 0.070**

Sin embargo, teniendo en cuenta el gran número de serie y la distribución real de las muestras, también se puede tomar por (Esp/Dext) el valor:

**(Esp/Dext) = 0.0823.** Para este punto, podemos proporcionar todas las propiedades geométricas y mecánicas reportadas en la Tabla N°10.

Tabla 10: Propiedades geométricas y mecánicas de la caña guadúa de acuerdo a la relación (Esp/Dext) = 0.0823 con un fratil del 5%.

Dext (cm)	Esp (cm)	A (cm <sup>2</sup> )	I (cm <sup>4</sup> )	W (cm <sup>3</sup> )	K (cm <sup>2</sup> )	r (cm)
8.00	0.66	15.19	103.13	25.78	6.79	2.61
8.25	0.68	16.15	116.64	28.28	7.22	2.69
8.50	0.70	17.14	131.44	30.93	7.67	2.77
8.75	0.72	18.17	147.60	33.74	8.12	2.85
9.00	0.74	19.22	165.20	36.71	8.60	2.93
9.25	0.76	20.30	184.34	39.86	9.08	3.01
9.50	0.78	21.41	205.09	43.18	9.58	3.09
9.75	0.80	22.56	227.54	46.68	10.09	3.18
10.00	0.82	23.73	251.79	50.36	10.61	3.26
10.25	0.84	24.93	277.93	54.23	11.15	3.34
10.50	0.86	26.16	306.05	58.30	11.70	3.42
10.75	0.88	27.42	336.26	62.56	12.26	3.50
11.00	0.91	28.71	368.65	67.03	12.84	3.58
11.25	0.93	30.03	403.32	71.70	13.43	3.66
11.50	0.95	31.38	440.39	76.59	14.03	3.75
11.75	0.97	32.76	479.95	81.69	14.65	3.83
12.00	0.99	34.17	522.12	87.02	15.28	3.91
12.25	1.01	35.61	567.00	92.57	15.92	3.99
12.50	1.03	37.07	614.73	98.36	16.58	4.07
12.75	1.05	38.57	665.40	104.38	17.25	4.15
13.00	1.07	40.10	719.14	110.64	17.93	4.23
13.25	1.09	41.66	776.08	117.14	18.63	4.32
13.50	1.11	43.24	836.33	123.90	19.34	4.40
13.75	1.13	44.86	900.02	130.91	20.06	4.48
14.00	1.15	46.51	967.28	138.18	20.80	4.56
14.25	1.17	48.18	1038.25	145.72	21.55	4.64
14.50	1.19	49.89	1113.05	153.52	22.31	4.72
14.75	1.21	51.62	1191.82	161.60	23.09	4.80
15.00	1.23	53.39	1274.70	169.96	23.88	4.89

Fuente: Pedro Córdova

Siendo:

Dext = diámetro externo.

Esp = espesor característico con probabilidad del 5% de ser menor.

A = Área.

I = Momento de inercia.

W = Modulo de resistencia de flexión.

K = Modulo de resistencia al cortante.

r = radio de inercia.

Tabla 11: Propiedades geométricas y mecánicas de la caña guadúa de acuerdo a la relación (Esp/Dext) = 0.070 con un fratil del 5%.

Dext (cm)	Esp (cm)	A (cm <sup>2</sup> )	I (cm <sup>4</sup> )	W (cm <sup>3</sup> )	K (cm <sup>2</sup> )	r (cm)
8.00	0.56	13.01	90.60	22.65	6.96	2.64
8.25	0.57	13.83	102.46	24.84	7.41	2.72
8.50	0.59	14.68	115.46	27.17	7.86	2.80
8.75	0.61	15.56	129.65	29.63	8.33	2.89
9.00	0.63	16.46	145.12	32.25	8.81	2.97
9.25	0.64	17.39	161.92	35.01	9.31	3.05
9.50	0.66	18.34	180.15	37.93	9.82	3.13
9.75	0.68	19.32	199.88	41.00	10.35	3.22
10.00	0.70	20.32	221.18	44.24	10.88	3.30
10.25	0.71	21.35	244.14	47.64	11.43	3.38
10.50	0.73	22.41	268.84	51.21	12.00	3.46
10.75	0.75	23.49	295.38	54.95	12.58	3.55
11.00	0.76	24.59	323.83	58.88	13.17	3.63
11.25	0.78	25.72	354.29	62.98	13.77	3.71
11.50	0.80	26.88	386.84	67.28	14.39	3.79
11.75	0.82	28.06	421.60	71.76	15.02	3.88
12.00	0.83	29.27	458.64	76.44	15.67	3.96
12.25	0.85	30.50	498.07	81.32	16.33	4.04
12.50	0.87	31.76	539.99	86.40	17.00	4.12
12.75	0.89	33.04	584.50	91.69	17.69	4.21
13.00	0.90	34.35	631.71	97.19	18.39	4.29
13.25	0.92	35.68	681.72	102.90	19.11	4.37
13.50	0.94	37.04	734.65	108.84	19.83	4.45
13.75	0.96	38.43	790.60	115.00	20.58	4.54
14.00	0.97	39.84	849.68	121.38	21.33	4.62
14.25	0.99	41.27	912.02	128.00	22.10	4.70
14.50	1.01	42.73	977.72	134.86	22.88	4.78
14.75	1.03	44.22	1046.92	141.95	23.68	4.87
15.00	1.04	45.73	1119.72	149.30	24.49	4.95

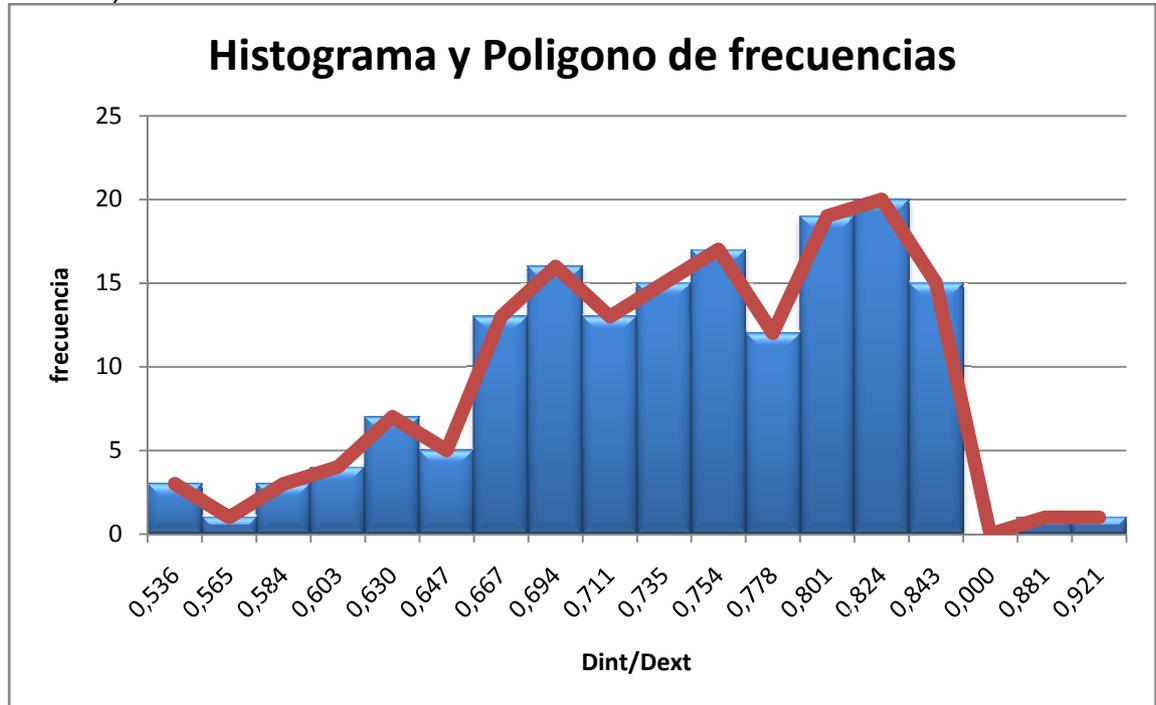
Fuente: Pedro Córdova

Tabla 12: Análisis estadístico de la relación (Dint/Dext) de las cañas guadúa.

<b>Dint/Dext Media =</b>	<b>0.741</b>
<b>Desviacion estandar (S) =</b>	<b>0.078</b>
<b>(Dint/Dext)k =</b>	<b>0.613</b>
<b>S/Dint/Dext Media =</b>	<b>0.105</b>

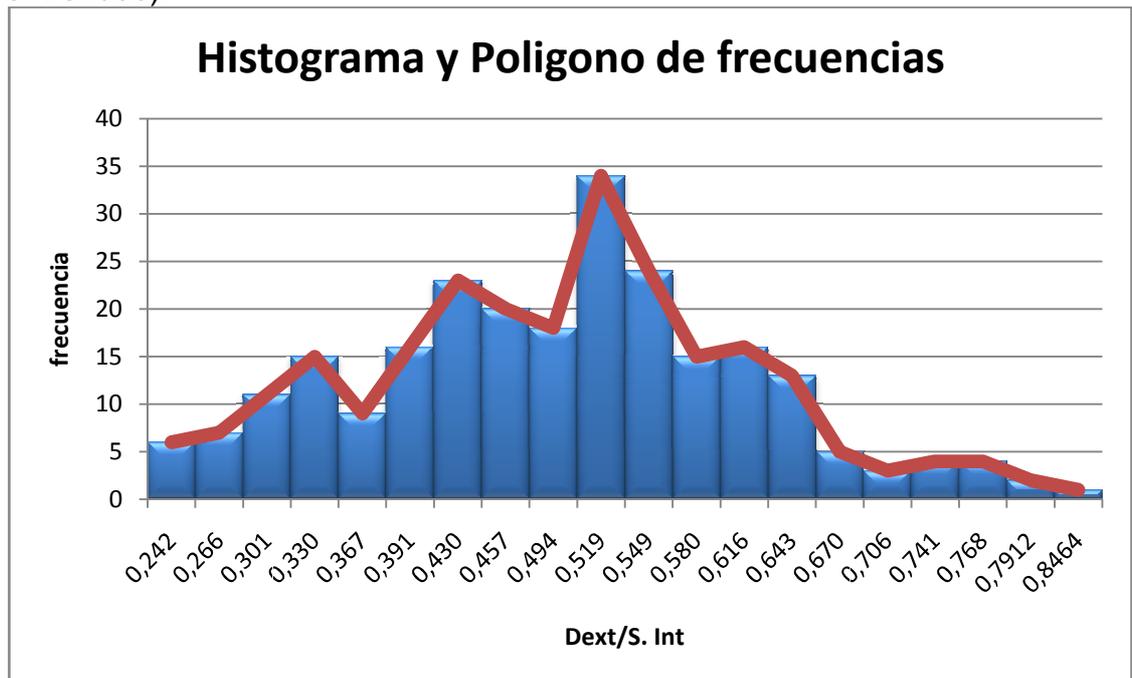
Fuente: Pedro Córdova

Figura 31: Análisis estadístico de la relación (Diámetro interior/Diámetro exterior).



Fuente: Pedro Córdova

Figura 32: Análisis estadístico de la relación (Diámetro exterior/Longitud de entrenudo).



Fuente: Pedro Córdova

Tabla 13: Análisis estadístico de la relación (Dext/S. Int) de las cañas guadúa.

Dext/S. Int Media =	0.491
Desviacion estandar (S) =	0.126
(Dext/S. Int)k =	0.284
S/(Dext/S. Int Media) =	0.257

Fuente: Pedro Córdova

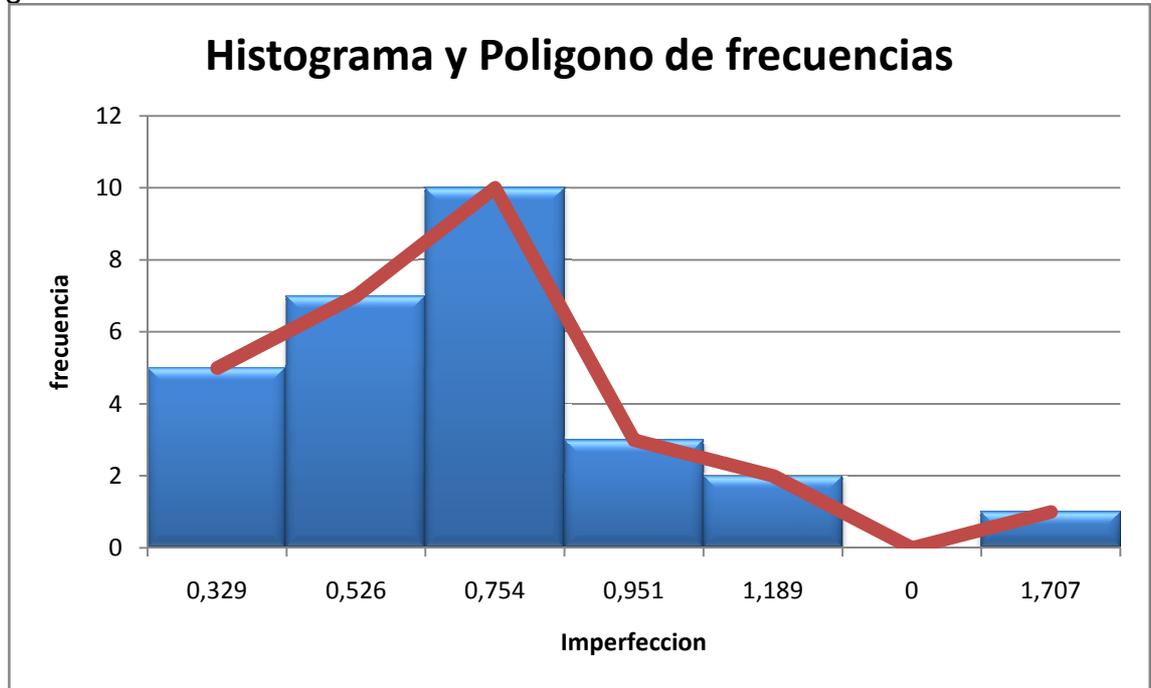
### 3.5.3 Análisis estadístico de la imperfección vertical de las cañas guadúa

Tabla 14: Muestras para el análisis de la imperfección natural de la no verticalidad que tienen las cañas guadúa.

Nro. De muestra	Diametro exterior (cm)	Diametro interior (cm)	Espesor (cm)	S. Internudo (cm)	Deformacion natural (cm)	Longitud (m)	Imperfeccion (%)
1	9.17	5.92	1.41	16.75	5.14	6.14	0.837
2	9.83	5.66	1.83	18.2	10.41	6.1	1.707
3	9.78	7.63	1.4	22.5	4.08	6.1	0.669
4	12.2	8.37	1.77	19	7.09	6.14	1.155
5	10.03	8.39	0.71	31.25	4.48	6	0.747
6	10.97	6.53	2.06	16.75	2.8	6.06	0.462
7	13.57	10.08	1.97	17.75	4.16	5.97	0.697
8	10.22	7.92	1.51	19.75	5.93	6.03	0.983
9	9.91	5.99	1.78	19	2.83	5	0.566
10	10.82	8.49	1.35	25	3.45	6.2	0.556
11	10.6	8	1.21	23.75	5.87	6.08	0.965
12	10.57	7.5	1.39	20.25	2.34	6	0.390
13	12.92	7.1	2.55	18.25	4.93	6.08	0.811
14	11.14	9.21	1.37	29.25	4.94	6.21	0.795
15	11.61	9.61	0.93	38	1.36	6.2	0.219
16	12.87	10.38	1.3	30.25	7.34	6	1.223
17	12.3	9.72	1.25	24.75	4.6	6.2	0.742
18	10.1	5.71	1.94	18	3.77	6.1	0.618
19	11.365	8.45	1.46	26.075	2.78	3.8	0.732
20	11.215	8.915	1.24	31.25	1.01	4.065	0.248
21	11.84	9.26	1.355	29	1.95	3.65	0.534
22	10.45	8.615	0.825	37.625	1.90	3.72	0.511
23	11.595	9.365	1.1	27.125	3.18	3.78	0.841
24	11.39	8.2	1.575	27.625	1.64	4	0.410
25	11.08	8.885	1.17	26.75	1.69	3.87	0.437
26	10.735	8.27	1.26	27.625	3.34	3.7	0.903
27	10.53	8.015	1.345	23.875	2.50	3.76	0.665
28	10.86	8.775	1.065	27.1875	1.44	3.8	0.379

Fuente: Pedro Córdova

Figura 33: Análisis estadístico de la imperfección vertical de las cañas guadúa.



Fuente: Pedro Córdova

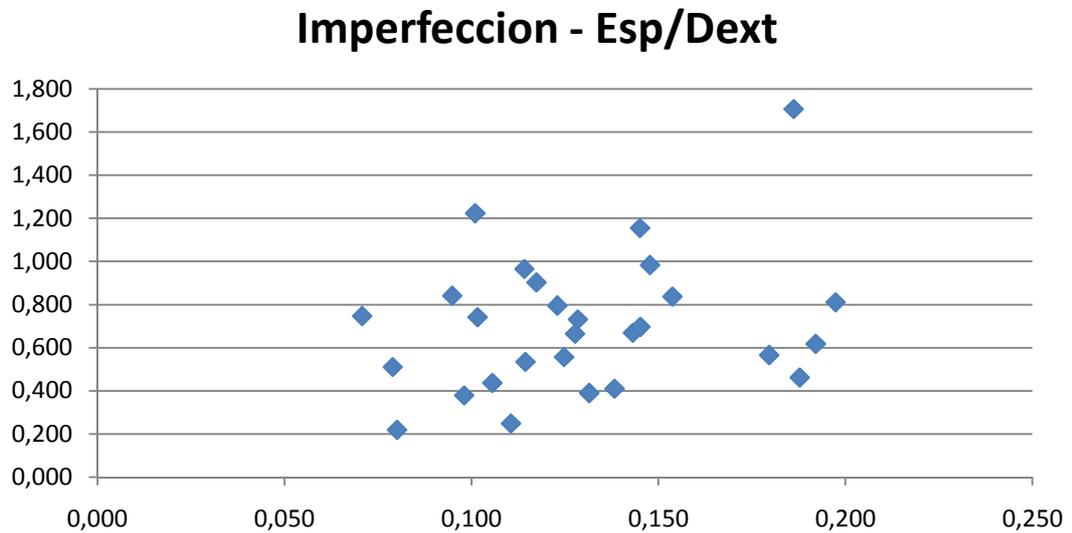
Tabla 15: Análisis estadístico de la imperfección vertical de las cañas guadúa.

<b>Imperfeccion Media =</b>	<b>0.707</b>
<b>Desviacion estandar (S) =</b>	<b>0.316</b>
<b>Imperfeccionk =</b>	<b>0.187</b>
<b>Imperfeccion Media =</b>	<b>0.447</b>

Fuente: Pedro Córdova

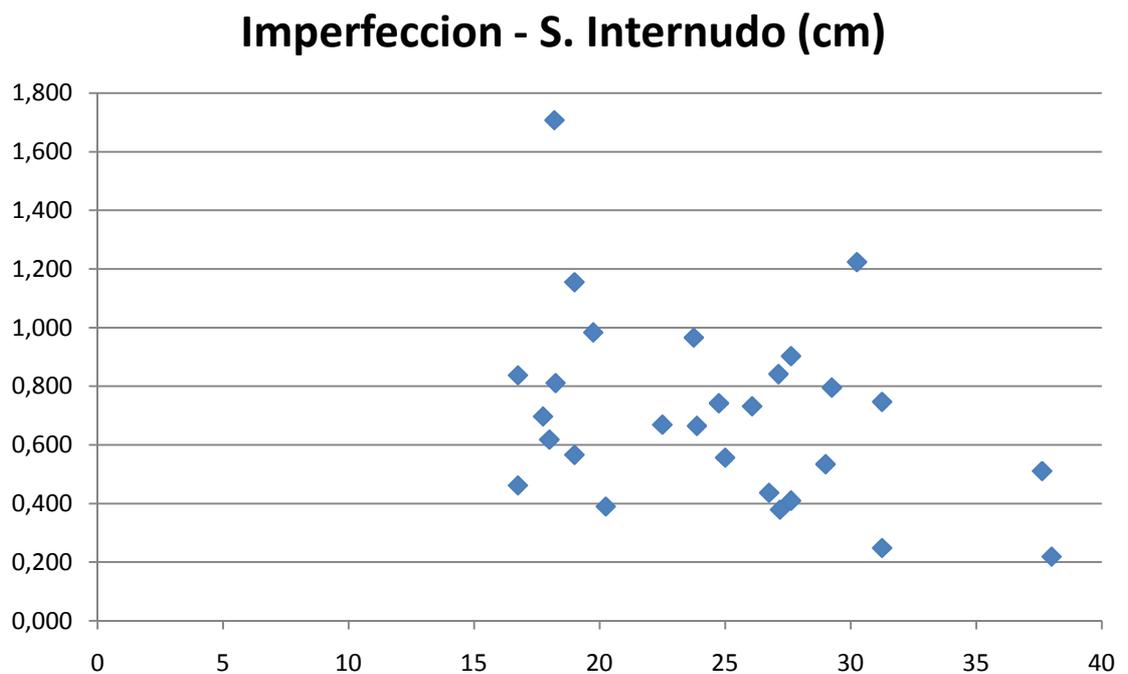
Se determinó de la población de 28 muestras que el porcentaje de imperfección máximo que existió fue de 1.7%, el cual es casi 2%, el límite para el cual se puede tener una influencia notable de las imperfecciones en fenómenos como pandeo de columnas esbeltas. El promedio fue de 0.7%, el cual es bastante aceptable. En las figuras 34, 35, 36, 37, 38 y 39 se analiza la variación que tiene las imperfecciones naturales de la caña guadúa respecto a las propiedades y relaciones geométricas de ésta.

Figura 34: Variación de la relación imperfección vertical de la caña guadúa vs. la relación (Espesor/Diámetro exterior).



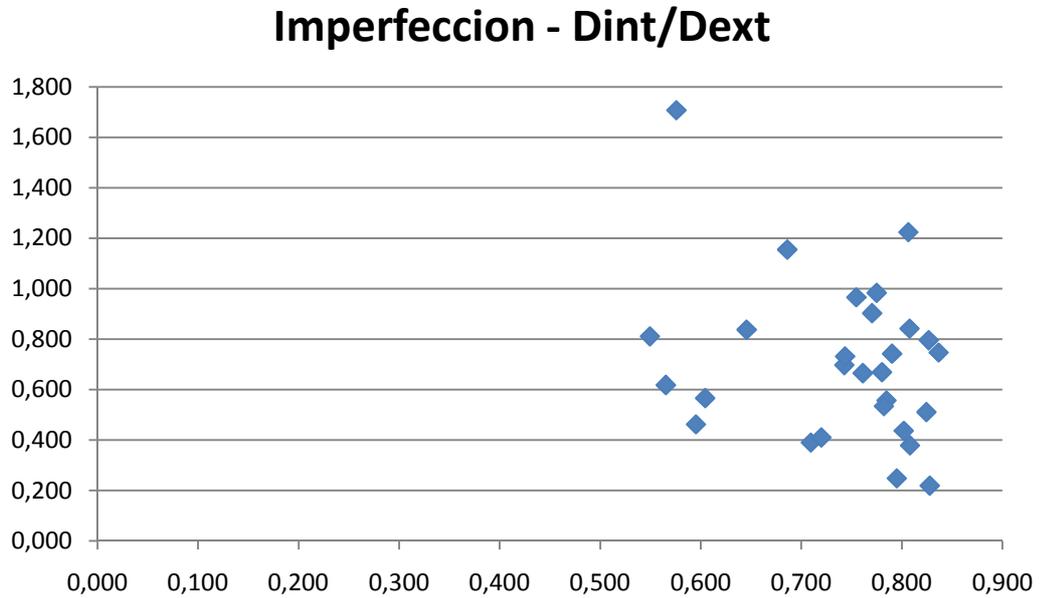
Fuente: Pedro Córdoba

Figura 35: Variación de la relación imperfección vertical de la caña guadúa vs. la longitud de entrenudos. A medida que aumenta la longitud de entrenudos disminuye la imperfección vertical de la caña guadúa.



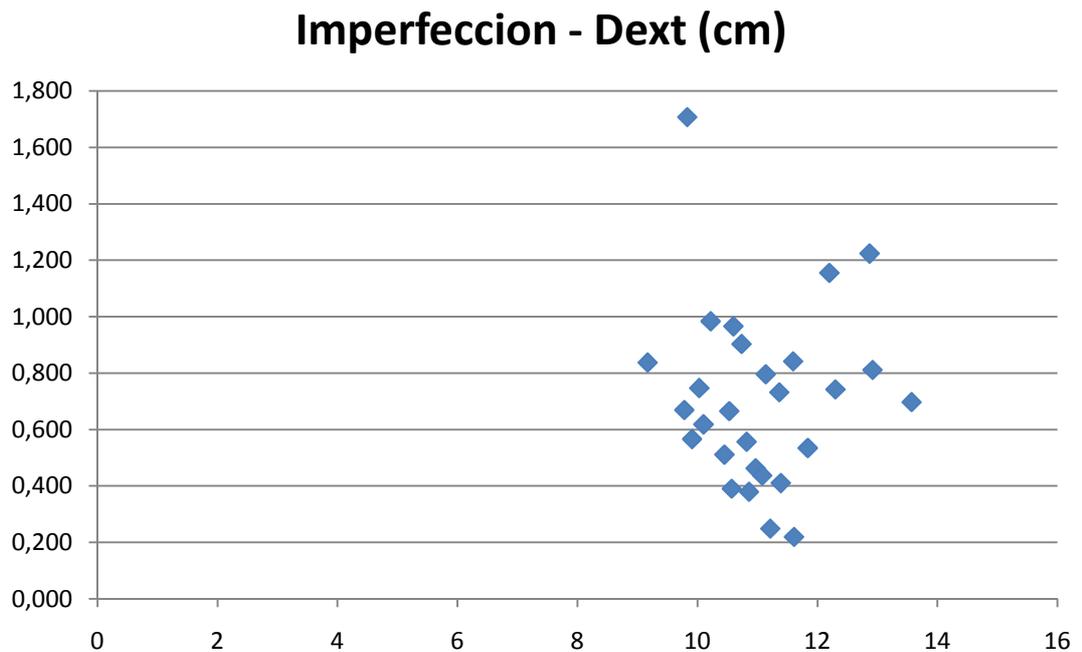
Fuente: Pedro Córdoba

Figura 36: Variación de la relación imperfección vertical de la caña guadúa vs. la relación (Diámetro interior/Diámetro exterior).



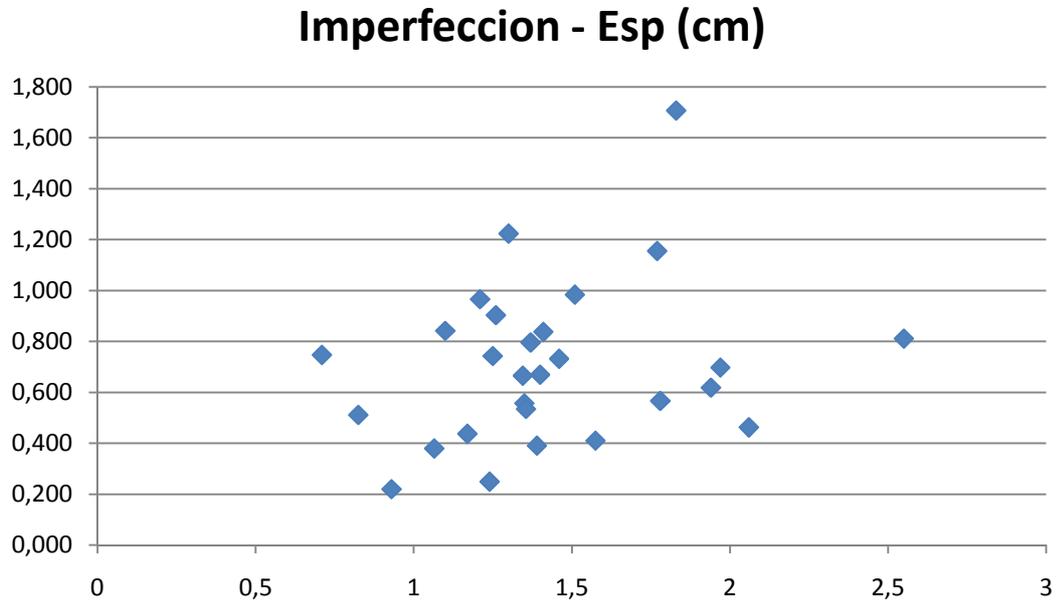
Fuente: Pedro Córdova

Figura 37: Variación de la relación imperfección vertical de la caña guadúa vs. el diámetro exterior.



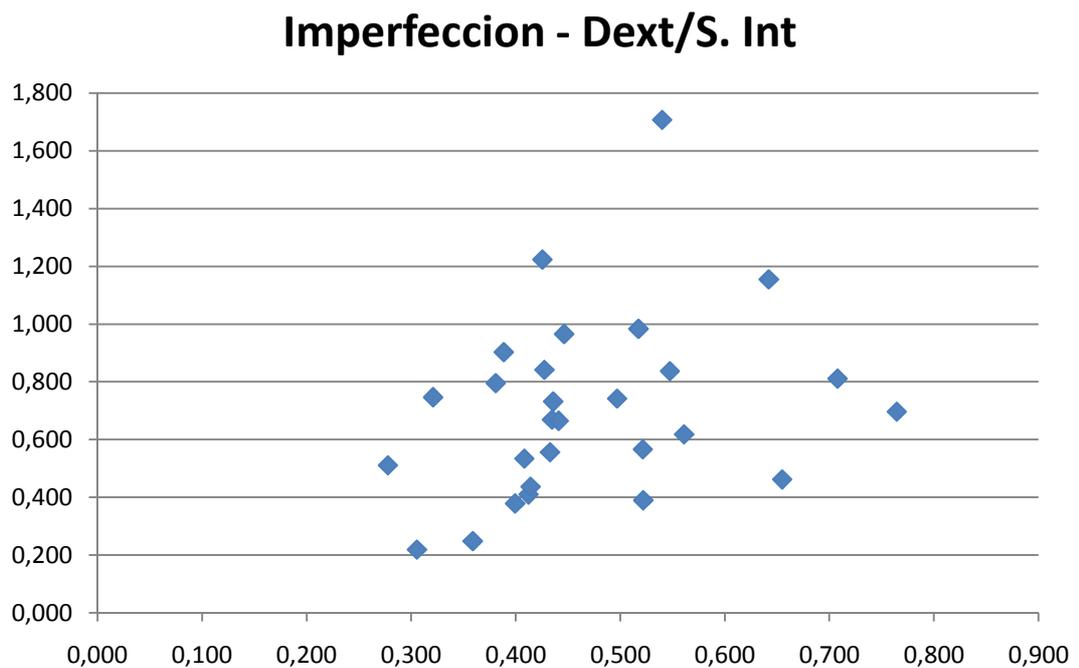
Fuente: Pedro Córdova

Figura 38: Variación de la relación imperfección vertical de la caña guadúa vs. el espesor de la pared de la caña.



Fuente: Pedro Córdova

Figura 39: Variación de la relación imperfección vertical de la caña guadúa vs. la relación (Diámetro exterior/Longitud de entrenudo).



Fuente: Pedro Córdova

Figura 40: cañas guadúa en Quevedo para las mediciones de las propiedades geométricas.



Fuente: Pedro Córdova

Figura 41: cañas guadúa en Bucay para las mediciones de las propiedades geométricas.



Fuente: Pedro Córdova

Figura 42: cañas guadúa en Bucay para las mediciones de las propiedades geométricas.



Fuente: Pedro Córdova

Figuras 43 y 44: mediciones de propiedades geométricas de las cañas guadúa en La Mana, provincia de Cotopaxi.



Fuente: Pedro Córdova.

Figura 45: mediciones de propiedades geométricas de las cañas guadúa en La Mana, provincia de Cotopaxi con calibrador Vernier.



Fuente: Pedro Córdova

## **CAPÍTULO 4: PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA CAÑA** **GUADÚA**

### **4.1 MARCO TEÓRICO**

Es necesario establecer un marco teórico como herramienta para evaluar la calidad de la capacidad estructural para un diseño de la caña guadúa, ésta debe cumplir con los parámetros de durabilidad y servicio. Para que ella logre ser usada como un material ingenieril o elemento estructural se debe estudiarla científicamente para determinar con seguridad sus propiedades físicas y mecánicas.

En Ecuador todas las construcciones se deben ceñir a las Normas del NEC, (Norma Ecuatoriana de la Construcción) y de INEN (Instituto Ecuatoriano de Normalización), Estas normas muestran los requisitos mínimos para garantizar que se cumpla el objetivo de proteger a las vidas humanas y que la estructura tenga serviciabilidad. La responsabilidad recae sobre los profesionales bajo cuya firma se elaboran los diseños y se extiende a constructores e interventores que velen por el cumplimiento del diseño y la calidad de la construcción.

Debemos determinar las propiedades mecánicas de la caña guadúa para evaluar su capacidad para resistir su propio peso y otras cargas y acciones producidas durante su periodo de diseño, tratando de responder de la mejor manera a desastres naturales como sismos o vientos fuertes.

Es muy importante que la caña guadúa cumpla con una buena capacidad para soportar cargas y acciones externas e internas de la estructura manteniendo desplazamientos o deformaciones internas tolerables mientras

las resiste y que la estructura se mantenga estable sin que las columnas se pandeen.

Se debe tener un conocimiento apropiado del material de la caña guadúa para determinar su resistencia, sus ventajas y sus modos de falla y limitaciones. Es necesario determinar todas sus propiedades mecánicas para poder utilizarla específicamente de la manera apropiada, entendiendo su comportamiento, para poder aprovechar sus ventajas en resistencia y rigidez y evadir sus debilidades.

Las cargas que puede resistir la caña guadúa deben ser definidas con un grado de precisión y seguridad para poder establecer bajo ciertos criterios el comportamiento para las diferentes cargas.

Cálculos ingenieriles deben hacerse para una estructura. La mayoría de los materiales de construcción son totalmente rectos y poseen una sección transversal constante y simple. La caña guadúa es cónica, tiene nudos y es irregular en algunos intervalos de su longitud, y su sección transversal no es un círculo perfecto. La mayoría de las cañas guadúa también posee curvaturas a lo largo de su altura, así que se debe hacer cálculos muy seguros para usar este material en la construcción.

A través de los ensayos se tratará de simular la realidad física de las cañas guadúa en una estructura para poder obtener sus propiedades mecánicas correctamente. El comportamiento de la caña guadúa es elástico y la sección transversal de la caña permanece plana por el teorema de Bernoulli.

Las muestras de caña guadúa para los ensayos deben ser representativas para poder aplicar métodos estadísticos para obtener un 5% de fratil. Obteniendo resultados de los ensayos permitirá que se utilice óptimamente el material y poder entender su capacidad estructural.

Normalmente de los materiales no es importante determinar su resistencia máxima a la falla, sino cuanto se puede cargar de tal forma que la deformación y la seguridad sea aceptable, este valor se conoce como esfuerzo admisible, valor que determinan los códigos. Somos los estudiantes e ingenieros especializados en estructuras, los encargados de chequear estos niveles de deformación y seguridad.

Como material orgánico heterogéneo natural, la caña guadúa tiene grandes variaciones evidentes de las propiedades físicas, en toda su longitud: los diámetros externos e internos, el espesor de la pared. Mientras que los ingenieros esperan también este tipo de variaciones en las propiedades mecánicas del bambú, también tienden a aceptar que las propiedades mecánicas del bambú es probable que sean más consistentes que las de hormigón, probablemente similar a la madera.

Algunos de estos parámetros físicos pueden variar significativamente en toda la longitud de los tallos de bambú, dependiendo de la muestra. Para la aplicación estructural, es importante establecer las propiedades mecánicas de las cañas guadúa, y también cualquier correlación entre sus propiedades físicas y mecánicas.

A pesar de las grandes variaciones en el diámetro exterior y el espesor, algunos valores representativos de las propiedades mecánicas pueden obtenerse de los ensayos.

Un estudio de la caña guadúa se debe llevar a cabo para examinar la variación de la resistencia a la compresión, tomando en cuenta las grandes variaciones en el diámetro exterior y el espesor, obteniendo valores representativos de las propiedades mecánicas a través de las pruebas. Entre todas las propiedades geométricas se debe determinar la más influyente en las propiedades mecánicas.

Por otra parte, también se debería ejecutar una serie de programas de ensayos de calificación de calidad para generar datos de factores de seguridad en las propiedades mecánicas del bambú para el diseño estructural.

Luna, Lozano, Takeuchi, (2013) presentaron la metodología experimental utilizada para la determinación de los valores característicos de resistencia mecánica a flexión longitudinal, compresión, corte y tracción paralela a la fibra, torsión, y compresión perpendicular a la fibra y módulos elásticos de la Guadúa *Angustifolia*. Los autores realizaron ensayos en probetas tomadas de la parte inferior, media y superior de culmos de guadúas provenientes de tres Departamentos diferentes de Colombia y se establecieron los valores característicos de la resistencia a compresión, tensión y corte paralelos a la fibra, flexión longitudinal, torsión y compresión perpendicular así como valores de módulo de elasticidad longitudinal y circunferencial.

Osorio, Vélez, Ciro, (2007) caracterizaron la Guadúa *Angustifolia* Kunth (GAK) en su estructura interna, y encontraron la incidencia que presenta ésta en la resistencia a flexión y a tensión. Establecieron que la resistencia a la flexión disminuye de la capa externa a la interna, debido a la reducción de la cantidad de células de fibras en ese sentido ya que los valores de resistencia a flexión, en la GAK, disminuyen con la presencia de nudos debido a la discontinuidad de las fibras en esa parte del material, y al igual que la de flexión, la resistencia a la tensión disminuye de la capa externa a la interna; aspecto que se relaciona con que la cantidad de las células de fibra disminuyen hacia la capa interna.

*Cely, Hernández, Gutiérrez, (2012)* realizaron una serie de pruebas a la planta para determinar ciertos rasgos innatos de la guadúa cultivada en el Municipio de Miraflores (Boyacá). Además, se tomaron en cuenta los parámetros ambientales ideales del eje cafetero y, se compararon con los de la zona de estudio, con el fin de observar las diferencias entre los dos. Respecto a los ensayos practicados a la guadúa se siguieron los lineamientos propuestos en la Norma Técnica Colombiana NTC 5525 y el Reglamento Sismo Resistente de Colombia NSR-10 Título G. Los ensayos realizados fueron Físicos (Humedad y Densidad en secciones Cepa, Basa y Sobrebasa) y Mecánicos (Compresión paralela a la fibra, Tensión paralela a la fibra, Cortante paralelo a la fibra, Flexión estática con cuatro puntos de aplicación de la carga y Módulos de elasticidad a Compresión, Tensión y Flexión obtenidos de forma directa e indirecta). Y se determinó que la guadúa es apta para ser utilizada como material de construcciones sismorresistentes, debido a que cumple con los valores de esfuerzos admisibles propuestos en la normatividad colombiana.

*Dávila (2013)* realizó un estudio con la finalidad de determinar los usos y el estado actual de los guaduales establecidos en las riveras de la cuenca alta del río Portoviejo. Se muestrearon 20 manchas de guaduales, con los datos obtenidos se evaluó la calidad del material vegetal existente y se elaboró un plan de manejo.

*Quispe (2010)* estudió el comportamiento de dos tijerales, dos viguetas y dos vigas construidas con *Guadúa Angustifolia* (que fueron construidos en el Laboratorio de Ensayos de Materiales), cuya procedencia fue de tres bosques diferentes; además estableció resultados de cada ensayo que permitieron compararlos y relacionarlos para poder recomendar valores de resistencia y deformaciones que se puedan utilizar en el diseño. Luego de los ensayos determinó que los esfuerzos para los cuales fueron diseñados los elementos del tijeral no fueron sobrepasados durante el proceso de carga, debido a que las fallas que se presentaron fueron por corte o fallas de pernos en los nudos; quedando algunos elementos del tijeral casi intactos. Además comprobó que el Módulo de Rotura de las viguetas es mayor que el de las vigas debido a la presencia de conectores en estas últimas, que fueron necesarios para unir las cañas de la sección compuesta. Con estos y otros resultados del trabajo de investigación, el autor esperaba aportar a la formalización de la nueva norma peruana de bambú.

Takeuchi, González (2007) y el grupo de investigación Análisis, Diseño y Materiales, GIES, de la Universidad Nacional de Colombia, realizaron estudios para la determinación de la resistencia a corte, paralela a la fibra y tensión perpendicular a la fibra de la *guadúa angustifolia*. Como continuación de dichos estudios, en el año 2006 se encontraron estas propiedades mecánicas a partir de ensayos con *Guadúa angustifolia* proveniente de los Departamentos de Quindío y Caldas. Establecieron la

resistencia a la compresión paralela a la fibra, el esfuerzo admisible para el diseño de elementos a compresión bajo diferentes combinaciones de carga y del módulo de elasticidad para la Guadúa Angustifolia.

Saraz, Castrillón, Marín, Alonso (2010) dio a conocer a los ingenieros, constructores, arquitectos, tecnólogos y a todos aquellos profesionales relacionados con el área de la construcción, los principales parámetros de diseño de elementos con guadúa sometidos a diferentes esfuerzos, con los cuales se puede diseñar estructuras.

Moreno, Osorio, Trujillo (2006) determinaron las propiedades mecánicas de los haces de fibra de Guadúa angustifolia en función de tres factores: edad del culmo, altura del culmo y espesor de pared, y establecieron la posibilidad de que dichos haces puedan ser utilizados como fase de refuerzo en materiales compuestos. Utilizaron el ensayo de tensión y obtuvieron los siguientes resultados: resistencia a la tensión máxima promedio, 642,58 MPa, módulo de elasticidad promedio, 26,61 GPa, porcentaje de elongación promedio, 2,4. Los haces de fibra que presentaron mayor resistencia a la tensión promedio fueron los intermedios para todas las edades, el mayor módulo de elasticidad promedio se presentó en haces de fibra exteriores de culmos maduros y el menor porcentaje de elongación se presentó en haces de fibra exteriores del culmo.

Gutiérrez (2011) estudio la variación de la resistencia a tracción del bambú Guadúa Angustifolia Kunth en función del contenido de humedad se tomaron muestras de 3 regiones diferentes de la República de Colombia. De cada región seleccionó 10 culmos y de cada culmo seleccionó tres tramos de las diferentes partes de la guadúa en altura: cepa, basa y sobrebasa. De

cada tramo extrajo y ensayó como mínimo siete probetas, las cuales tendrían características muy similares ya que provienen de la misma porción de bambú, pero con diferente contenido de humedad. La determinación de la resistencia a tensión paralela a la fibra y el contenido de humedad del material, la hizo siguiendo los procedimientos de la Norma técnica colombiana NTC 5525 "Métodos de ensayo para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la Guadúa Angustifolia Kunth". Realizó ensayos de resistencia a tensión en un rango de contenido de humedad entre el 6% y el 35 %. Los resultados mostraron que la resistencia a tensión paralela a la fibra no disminuye cuando el contenido de humedad se encuentra entre el 10% y el 21%, rango en el cual el material es utilizado como elemento estructural.

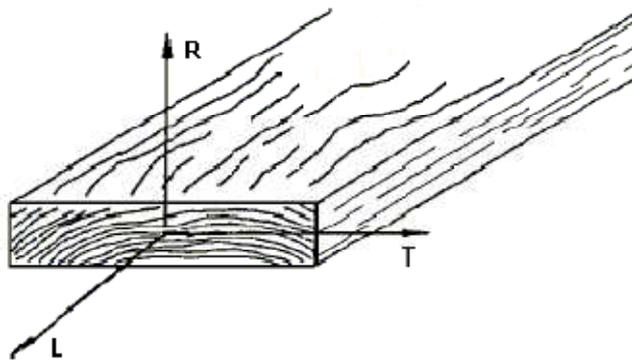
Luna, Takeuchi, Granados, Lamus, Lozano, (2011) desarrollaron la metodología de diseño estructural para estructuras de guadúa establecidas durante la ejecución del proyecto " Validación de la Guadúa Angustifolia como material estructural para el diseño, por el método de las tensiones admisibles ", por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia) y llevado a cabo por la Universidad Nacional de Colombia, desde agosto de 2008, cuando no existían normas para el diseño con bambú en bruto . La metodología de diseño se basa en la mecánica estructural, la ISO 22156 Diseño Estructural de Bambú y diferentes trabajos de investigación a nivel nacional e internacional.

#### **4.2 NATURALEZA ORTOTRÓPICA DE LA CAÑA GUADÚA**

La caña guadúa puede ser definida como un material ortotrópico. Tiene propiedades mecánicas independientes en tres planos mutuamente perpendiculares: longitudinal, radia y tangencial. El eje longitudinal (L) es paralelo a la fibra de la pared de la caña, el eje radial (R) es perpendicular a

la fibra y a los nudos, y el eje tangencial (T) es perpendicular a la fibra, pero es tangente a los nudos.

Figura 46: naturaleza orto trópica de la caña guadúa.



Fuente: Ing. Luis Felipe López, 2000

### 4.3 MÓDULO DE ELASTICIDAD

La caña guadúa se comporta elásticamente, esto se puede comprobar al deformarla y luego liberarla, instantáneamente recuperará su posición inicial. Cuando a un material se le aplican cargas que no excedan su límite proporcional, todas las deformaciones son recuperables. En un diagrama de esfuerzo vs deformación, esta región de la curva del material representa la región elástica lineal del material y la Ley de Hooke puede ser aplicada para calcular el modulo de elasticidad deseado (E), como la relación entre el esfuerzo y la deformación unitaria en ese primer tramo. Cuando la carga que se le aplica a un material excede el límite proporcional, deformaciones plásticas empiezan a ocurrir y resulta en cambios permanentes en la estructura del material. Los tres módulos de elasticidad se encuentran en los ejes longitudinal, radial y tangencial de la caña respectivamente.

El módulo de elasticidad de la caña guadúa resulta siendo la constante de proporcionalidad entre esfuerzo y deformación. Las pruebas que se realizarán en este trabajo son ensayos de resistencias últimas; por lo tanto no se podrá comprobar si la estructura se comporta de ésta manera, ya que sería necesario realizar ensayos detallados en los que se tomen deformaciones exactas, con medios electrónicos, para profundizar un poco en caracterizar el material.

#### 4.4 PROPIEDADES MECÁNICAS COMUNES DE LOS MATERIALES

Los materiales de construcción poseen características mecánicas de resistencia a la acción de las fuerzas que se les impone. Las principales acciones que se imponen a los elementos de la estructura son: tensión, compresión, flexión.

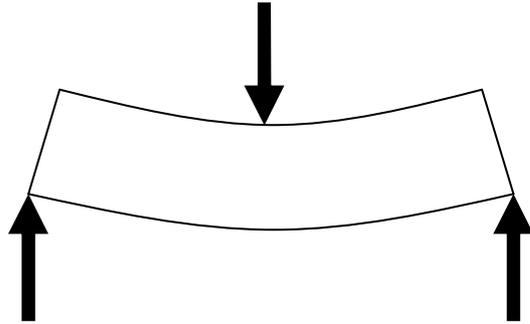
La tensión es la acción mecánica que alarga el elemento, debido a la aplicación de sollicitaciones en sentidos contrarios, que tiende a estirar dicho elemento.



La compresión es la acción mecánica que acorta el elemento debido a que las sollicitaciones que se aplican sobre el elemento, ejercen presiones sobre las caras del mismo, produciendo el acortamiento.



La flexión es la acción mecánica que pandea el elemento deformando su estado natural debido a las cargas aplicadas.



Las características propias de cada material le permiten una capacidad de respuesta a cada una de las acciones mecánicas, así tendremos:

- Resistencia o capacidad del material a la tracción.
- Resistencia o capacidad del material a la compresión.
- Resistencia o capacidad del material a la flexión, etc.
- Módulo elástico del material (nos indica qué tan rígido o flexible es)

La siguiente terminología intenta definir las propiedades mecánicas deseadas de la caña guadúa. Los límites de estas propiedades deben ser definidos para poder añadir a la caña guadúa como un material de construcción de acuerdo a los estándares ISO. Estas propiedades son muy usadas en la ingeniería para la clasificación de los materiales con respecto a la rigidez de la estructura y la capacidad de carga.

**Resistencia a la compresión paralela a la fibra:** Esfuerzo máximo a compresión soportado por una muestra en la dirección paralela a la fibra de la pared de la caña guadúa de la muestra.

**Resistencia a la tensión paralela a la fibra:** El esfuerzo máximo a tensión soportado en dirección paralela a la fibra de la caña guadúa.

#### **4.5 ENSAYOS DE FLEXION**

En el ensayo de flexión se hace necesario deducir con base en el análisis estructural y la resistencia de materiales, las ecuaciones que permitan el cálculo preciso de las variables estudiadas, teniendo en cuenta que cada probeta tiene sus propias dimensiones, y que se aplicará cargas puntuales sobre nudos centrales consecutivos, cuya distancia es variable. Se aplicarán las cargas sobre los nudos hasta llegar a su máxima deformación y se calculará la máxima resistencia a la flexión y su módulo de elasticidad. Los ensayos deben ser hechos con acoples de madera entre las placas metálicas que aplican las cargas de la maquina y la caña guadúa, estos acoples de madera deben ser puestos en los nudos.

Un ensayo de flexión en una muestra de caña guadúa la somete a esfuerzos de compresión en la parte superior paralela a las fibras; pero, en el sentido perpendicular a la fibras, ésta compresión causa tensión entre las fibras afectando a la lignina que es débil, esforzándosela a la tensión, siendo éste el punto débil de la caña guadúa como viga. Al comprimirse en su parte superior, se acortará; causando que la caña se engrose en el sentido perpendicular a las cargas. Estos esfuerzos de tensión en la lignina hará que la sección transversal tome otra forma, causando un cambio de inercia, debido a que, aunque exista una falla, las fibras de la caña guadúa van a estar todavía en buena condición y cuando se retiren las cargas la caña guadúa volverá a su forma inicial.

La resistencia a la flexión de una viga de caña guadúa será determinada por los esfuerzos flectores o por los esfuerzos cortantes a los que la caña este sometida. Durante un ensayo a flexión, esfuerzos cortantes actúan en el plano neutral y será soportado por las paredes de la caña. Un patrón típico de falla, al someterse a esfuerzos cortantes, se da cuando la caña se rompe

en cuatro partes. La resistencia al cortante va a estar dado por el espesor de la pared de la caña.

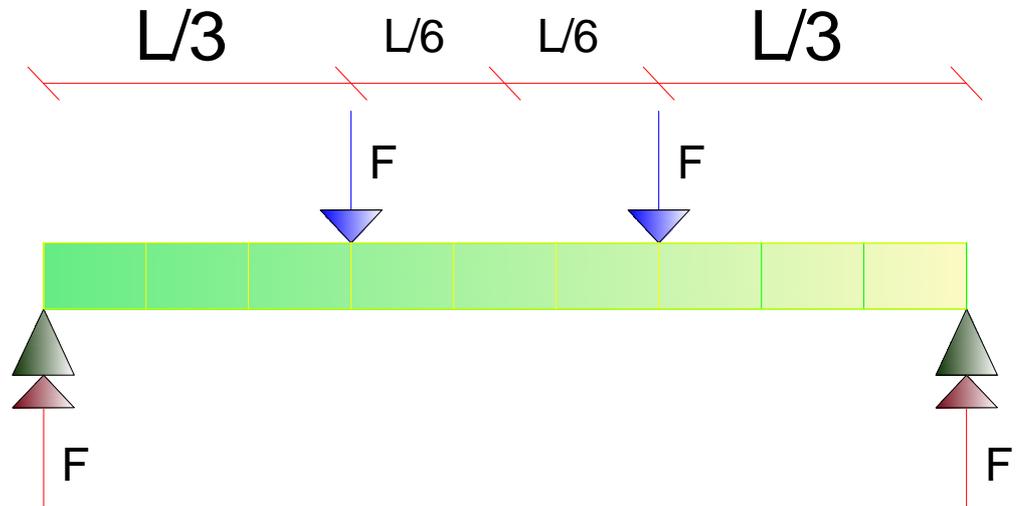
Para evaluar el tipo de falla que tendrá una caña en un ensayo de flexión; es decir, falla por flexión o falla por cortante, hay que evaluar las condiciones en las cuales la caña trabajará, en flexión pura o en cortante puro, esto depende mucho de la longitud de la luz. En el caso de una caña de luz pequeña, ésta no actúa como una viga porque trabaja como un arco, y las fuerzas transversales serán las que hagan fallar la caña. En el caso de una caña de luz grande o larga que se la somete a un ensayo de flexión, con algunos puntos de carga, la caña trabajará como una viga y su resistencia será dada por su resistencia a la flexión pura.

Existe una longitud límite para la cual, mientras más corta la caña, trabajará con esfuerzos cortantes y, mientras más larga la caña, trabajará con esfuerzos de flexión. Más allá de esta longitud límite, la resistencia máxima será la flexión y con una menor longitud se trabajará con la resistencia máxima a cortante. Esta longitud límite debe ser evaluada entre relaciones de fuerza transversal y flexión pura, derivando un modelo matemático. Si se tiene una caña guadúa de longitud  $L$ , en una prueba de flexión, como se tiene en la figura 47:

Si se tiene flexión pura, se tiene:

$$M = F \left( \frac{L}{3} + \frac{L}{6} \right) - F \left( \frac{L}{6} \right) = M = F \left( \frac{L}{3} \right)$$
$$M = \left( \frac{\sigma I}{R} \right)$$

Figura 47: esquema del ensayo a flexión.



Fuente: Pedro Córdova

Donde:

M = Momento flector

F = cada carga

L = longitud

$\sigma$  = esfuerzo flector

I = momento de inercia

R = radio exterior de la caña

$$M = F \left( \frac{L}{3} \right) = \left( \frac{\sigma I}{R} \right)$$

$$F = 3 \left( \frac{\sigma I}{LR} \right)$$

Con t = espesor de la caña:

$$I = \frac{(\pi)(t)(2R - t)^3}{8}$$

$$F = \frac{3\pi}{8} \left( \frac{(\sigma)(t)(2R - t)^3}{LR} \right)$$

Siendo esta la carga para tener en un ensayo de flexión un comportamiento de flexión pura. Evaluando la fuerza transversal para el esfuerzo cortante critico:

$$\tau_{crit} = \frac{2F}{A}$$

$$\frac{(\tau_{crit})(A)}{2} = F = \frac{\pi}{2} [(\tau_{crit})(t)(2R - t)]$$

Igualando estos dos valores de fuerzas se podrá encontrar el valor de longitud límite entre flexión y cortante.

$$\frac{3\pi}{8} \left( \frac{(\sigma)(t)(2R - t)^3}{LR} \right) = \frac{\pi}{2} [(\tau_{crit})(t)(2R - t)]$$

$$\frac{3}{2} \left[ \frac{(D - t)^2}{D} \right] \left[ \frac{(\sigma)}{(\tau_{crit})} \right] = L_{LIM}$$

Si la longitud de la luz es menor que  $L_{LIM}$  la caña fallará por cortante por acción de las fuerzas transversales; entonces, si se quiere un comportamiento por falla de flexión la longitud debe ser mayor que  $L_{LIM}$ .

Una evaluación más exacta se necesita para comprender correctamente este fenómeno. En un ensayo de flexión los nudos con el diafragma actúan como si fueran rotulas plásticas, lo que ocasiona que exista una mayor deformación. Pero en un ensayo con luces cortas, los nudos y el diafragma le dan más resistencia a la caña en el comportamiento como arco lo que ocasiona una menor deformación.

#### **4.6 ENSAYOS DE COMPRESIÓN**

Al igual que en el caso de la flexión en cañas guadúas, la lignina por su baja resistencia a la tensión será la que determine la resistencia última a compresión. El porcentaje de celulosa y fibras no serán tan importantes.

En las pruebas de compresión las dimensiones de los diámetros interno y externo de las probetas así como la longitud de entrenudos serán variables, pero con la misma longitud de probeta. Las cargas deben estar uniformemente distribuidas sobre los extremos de la probeta. Se aplicará una carga hasta llegar a la máxima deformación y se calculará la máxima resistencia a compresión y su módulo de elasticidad.

La sección transversal hueca de la caña guadúa complica el ensayo a compresión. La pared de las fibras de la caña guadúa, en la prueba de compresión, está separada del centro una distancia igual al radio interior. Al realizar el ensayo de compresión va a haber acortamiento longitudinal en el sentido paralelo a las fibras y en consecuencia, tensión lateral por el efecto de Poisson. En el centro va a ocurrir engrosamiento de la muestra. Debido a la gran distancia de la pared de la caña al centro este efecto va a ser muy importante en el comportamiento de la caña guadúa sometida a compresión.

En un ensayo a compresión no se debería usar placas metálicas en los extremos de la muestra debido a que ocasionarían fricción con los bordes de la probeta de caña guadúa, haciéndola más resistente a la caña debido a que en los bordes no se podrá apreciar realmente el efecto de la tensión entre las fibras, en consecuencia este efecto de la tensión en las fibras será

visible solo en el centro de la muestra, lo que podría llevar a falsos resultados de la resistencia a la compresión.

Para que los ensayos a compresión den resultados seguros, se debe ensayar usando placas de acero con superficie sin fricción; como por ejemplo, los recubiertos con teflón o cera; es decir, placas metálicas que permitan el movimiento radial de la caña guadúa. Este tipo de ensayo permitirá fallar a la caña guadúa en su resistencia última a la compresión real causando el rompimiento tanto en los lados superior e inferior, así como en el centro de la muestra. Se debe tener en cuenta que las cañas guadúa van a actuar a compresión cuando sean usadas en columnas o como miembros estructurales de cerchas, y no se encontrarán entre placas metálicas; por lo tanto, es importante saber predecir este comportamiento correctamente.

#### **4.7 ENSAYOS DE TENSIÓN**

La prueba de tensión es uno de los ensayos más comunes para determinar las propiedades mecánicas de un material de construcción. Pero, para la caña guadúa no es muy común, porque cuando se la ha estudiado, siempre se la ha hecho acerca del comportamiento de la caña completa, y se tiene la dificultad de sujetar la caña para halar de ella sin que los efectos locales del mecanismo de sujeción la dañen. Probablemente ese sea el motivo por el que casi no se cuenta con registros de datos de ensayos a tensión; por lo tanto, se opta por hacer el ensayo con pedazos de guadúa, y en este trabajo de grado, con muestras de guadúa ahusadas para facilitar el agarre en los extremos.

Con el uso de estas últimas probetas, se proporciona una buena zona de agarre y además se induce a que la falla ocurra hacia el centro de la probeta, donde las tensiones son más uniformes y fáciles de calcular.

En ensayos a tensión de guadúa, no se puede hablar de esfuerzo normal uniforme, no solamente por la exactitud en la aplicación de las cargas sobre los centroides de las secciones, que es un efecto que podría despreciarse, sino porque no se está tratando con un material homogéneo; lo que sí se puede asegurar es que al calcular  $\sigma = P/A$  se está hallando el esfuerzo normal medio en una pieza prismática.

#### 4.8 VARIABLES DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS

Tabla 16: Variables que se obtendrán producto de los ensayos:

Variable	Definición Conceptual	Dimensiones
Independientes	De cada variable	De cada variable
Resistencia a la compresión de la caña guadúa	Es la resistencia máxima que tiene la caña guadúa cuando está sometida a cargas de compresión paralela a las fibras.	$\sigma = \frac{P}{A}$
Resistencia a la tensión de la caña guadúa	Es la resistencia máxima que tiene la caña guadúa cuando está sometida a cargas de tensión paralela a las fibras.	$\sigma = \frac{P}{A}$
Módulo de Elasticidad de compresión y tensión	Está determinado por la pendiente de la parte lineal del diagrama de deformación unitaria frente al esfuerzo.	$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$
Resistencia al esfuerzo cortante de la caña guadúa	Es la resistencia máxima que tiene la caña guadúa cuando está sometida a cargas de corte paralela a las fibras.	$\tau = \frac{P}{((\Sigma t) \times L)}$
Resistencia a la flexión de la caña guadúa	Capacidad a la flexión de las cañas en ensayos de flexión de 4 puntos de carga.	$\sigma = \frac{(P)(L)(D/2)}{6(I)}$
Módulo de Elasticidad de flexión	Está determinado por la pendiente de la parte lineal del diagrama de deformación frente a la carga.	$E = \frac{(23)(P)(L^3)}{1296(\delta)(I)}$
Dependientes	De cada variable	De cada variable
Área	Área de la sección transversal de la caña guadúa	$L^2$
Longitud	Longitud de la muestra de caña guadúa	L
t	Espesor de la pared de la caña guadúa	L
P	Carga máxima a la cual falla la muestra de caña guadúa	P
D	Diámetro externo de la muestra de caña guadúa	L
I	Momento de inercia de la muestra de caña guadúa	$L^4$

Fuente: Pedro Córdova

## **CAPÍTULO 5: METODOLOGÍA DE LOS ENSAYOS**

### **5.1 NORMAS ISO 22157-1:2004**

La poca información que existe, sobre las propiedades mecánicas de caña Guadúa Angustifolia Kunth de Ecuador, es difícil de comparar porque se han utilizado diferentes procedimientos para los ensayos, por diferentes autores. Estandarizar los procedimientos de los ensayos es esencial para eventualmente poder realizar un código o norma de diseño estructural.

Variaciones en las propiedades mecánicas entre las muestras son comunes para todos los materiales, por sus influencias externas únicas en sus estructuras internas. Debido a que la caña guadúa es un material biológico, y está sujeta constantemente a numerosas variables, como el contenido de humedad, las condiciones del suelo, las condiciones del clima, el lugar donde creció; es concebible que las propiedades de la caña guadúa pueden variar considerablemente incluso en muestras estandarizadas.

El objetivo de esta investigación se trata de proveer información documentada sobre la naturaleza y magnitud de la desviación estándar en las propiedades mecánicas de la caña guadúa. Esta investigación inspirará discusión en cómo estos resultados pueden ser implementados en estándares ingenieriles.

La Organización Internacional de Normalización (ISO) ya tiene estándares para la construcción de estructuras de bambú (ISO 22157, 2004). Debido a la necesidad de poder comparar los resultados obtenidos en esta investigación con los resultados de otros países, se procederá a utilizar la norma ISO para ensayos de bambú elaboradas por el Dr. Jules Janssen.

DOCUMENTO DE REFERENCIA: INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Bamboo - Determination of physical and mechanical properties - Part 1: Requirements. Geneva: ISO, 2004, 19 p (ISO 22157-1:2004), elaboradas por el Dr. Jules Janssen.

## **5.1.1 COMPRESIÓN**

### **5.1.1.1 Objeto y campo de aplicación**

Esta sección especifica un método para los ensayos de compresión, paralela al eje, en especímenes de culmos de bambú.

### **5.1.1.2 Principio**

Determinación de:

- el esfuerzo máximo de compresión de los especímenes provenientes de los culmos;
- el módulo nominal de elasticidad.

### **5.1.1.3 Equipo**

Los ensayos se deben realizar en una máquina adecuada para ellos. Al menos una platina de la máquina debe tener un apoyo hemisférico para obtener una distribución uniforme de la carga en los extremos del espécimen, como se ilustra en la Figura 1. Entre las dos platinas de acero de la máquina y los dos extremos de la muestra se debe aplicar una capa intermedia para reducir al mínimo la fricción.

Ejemplo: Véase Figura 2, la cual ilustra una combinación de cuñas de placas de acero delgadas, teflón y cera.

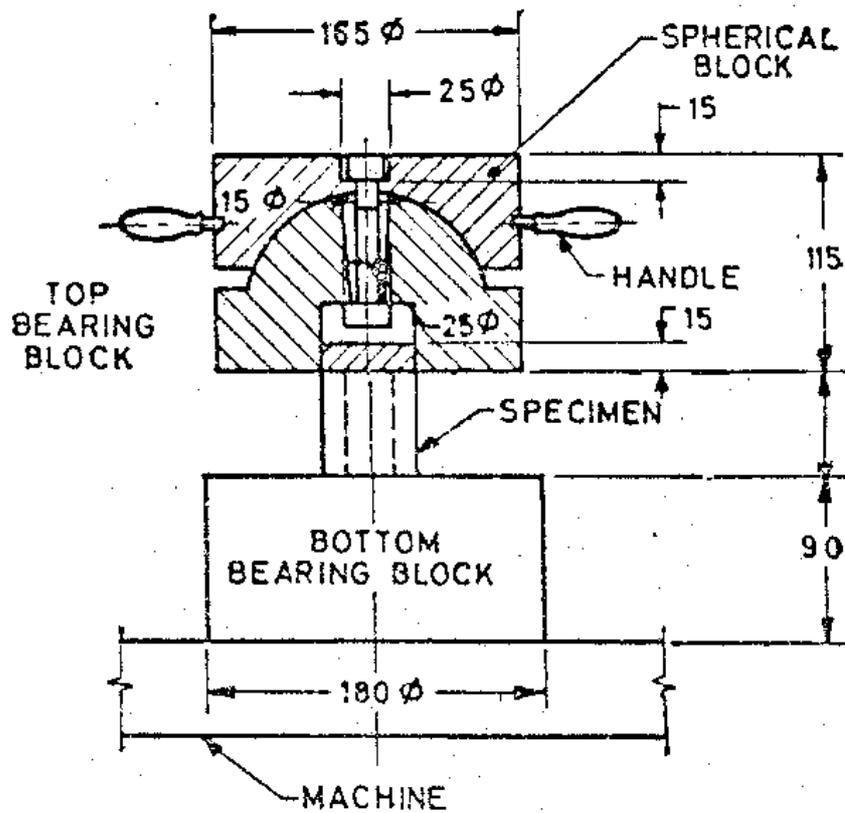


Figura 1. Máquina para compresión. (Dimensiones en mm)



Figura 2. Capa intermedia.

#### **5.1.1.4 Preparación de los especímenes de ensayo**

**5.1.1.4.1** Los especímenes se deben tomar de las partes inferior, media y superior de cada culmo. Estas muestras se deben marcar con las letras I, M, S respectivamente.

**5.1.1.4.2** Los ensayos de compresión paralela al eje se deben llevar a cabo en especímenes sin nudos y cuya longitud debe ser igual al diámetro externo; no obstante, si éste es de 20 mm o menos, la altura debe ser el doble del diámetro externo. Estas limitaciones son válidas en el caso de ensayos con propósitos comerciales; en el caso de los ensayos para investigación científica, existe libertad para determinar algo diferente.

**5.1.1.4.3** Las superficies de los extremos del espécimen deben estar en ángulo recto perfecto con la longitud de éste; deben ser planos, con una desviación máxima de 0,2 mm.

**5.1.1.4.4** Para determinar el módulo de elasticidad  $E$ , se debe usar celdas de carga, mínimo dos por espécimen, cada una de ellas en el lado opuesto del espécimen.

#### **5.1.1.5 Procedimiento**

**5.1.1.5.1** El espécimen se debe colocar de modo tal que el centro del cabezal móvil esté verticalmente sobre el centro de la sección transversal del espécimen; inicialmente se aplica al conjunto del espécimen una carga pequeña no superior a 1kN.

**5.1.1.5.2** La carga se debe aplicar continuamente durante el ensayo para hacer que el cabezal móvil de la máquina de ensayo se desplace a una velocidad constante de 0,01 mm / s.

**5.1.1.5.3** Cuando sea aplicable, se deben realizar lecturas de las celdas de carga la cantidad suficiente de veces para poder hacer un diagrama suficientemente exacto de la deformación frente a la carga, a partir de la cual se determina el valor de  $E$ .

**5.1.1.5.4** Se debe registrar la lectura final de la carga máxima en la cual falla la muestra.

### **5.1.1.6 Cálculo y expresión de los resultados**

**5.1.1.6.1** El esfuerzo máximo de compresión se debe determinar con la siguiente fórmula:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = F_{m\acute{a}x} / A$$

donde

$\sigma_{m\acute{a}x}$  es el esfuerzo máximo de compresión, en MPa (o N / mm<sup>2</sup>), redondeado con aproximación de 0,5 MPa.

$F_{m\acute{a}x}$  es la carga máxima en la cual falla la muestra, en N.

$A$  es el área de la sección transversal (2.3), en mm<sup>2</sup>.

**5.1.1.6.2** El módulo de elasticidad  $E$  se debe calcular a partir del valor medio de las lecturas de las celdas de carga como relación lineal entre el esfuerzo y la deformación, entre el 20% y el 80% de  $F_{m\acute{a}x}$ .

**5.1.1.6.3** El esfuerzo máximo medio de los especímenes sometidos a ensayo se debe calcular con aproximación de 0,5 MPa como la media aritmética de los resultados de ensayo de las muestras individuales.

#### **5.1.1.7 Informe del ensayo**

El informe del ensayo se debe hacer según el numeral 5.7; el contenido de humedad y la masa por volumen se deben determinar según las secciones 6 y 7 respectivamente.

### **5.1.2 FLEXIÓN**

#### **5.1.2.1 Objeto y campo de aplicación**

Esta sección especifica un método para los ensayos de flexión en los culmos de bambú.

#### **5.1.2.2 Principio**

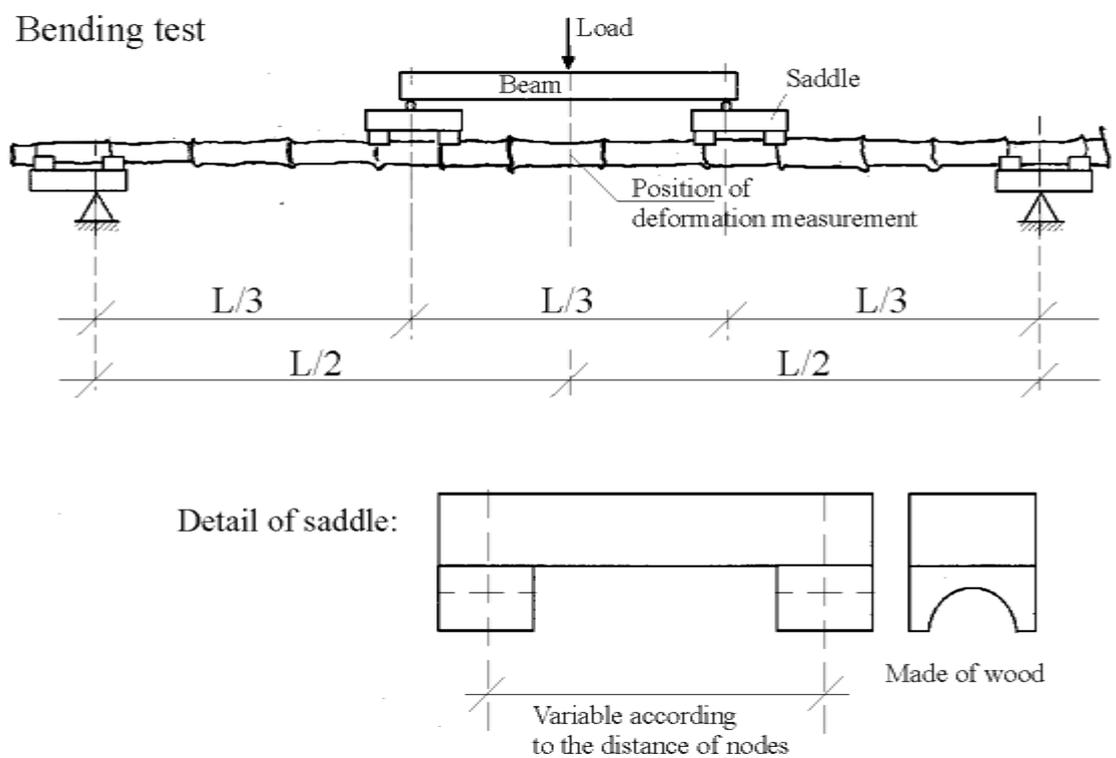
Determinación de:

- la capacidad de flexión de los culmos usando un ensayo de flexión de cuatro puntos, tal como se describe en el numeral 10.5;
- la curva de carga frente a la deflexión vertical;
- el módulo nominal de elasticidad del culmo.

#### **5.1.2.3 Equipo**

**5.1.2.3.1 Máquina de ensayo**, con capacidad para medir la carga con aproximación de 1% y la deflexión con aproximación de mm.

**5.1.2.3.2 Dispositivo para flexionar el culmo,** aplicando una carga en la distancia media entre los centros de los soportes del dispositivo. El ensayo debe ser de flexión de cuatro puntos. La carga se debe dividir en dos mitades mediante una viga apropiada. Para evitar el aplastamiento del culmo, las mitades de las cargas y las fuerzas de reacción en los soportes se deben aplicar en los nudos mediante los dispositivos apropiados. En los soportes, se debe permitir que el culmo de bambú rote libremente. Véase Figura 3.



**Figura 3. Esquema del ensayo a flexión.**

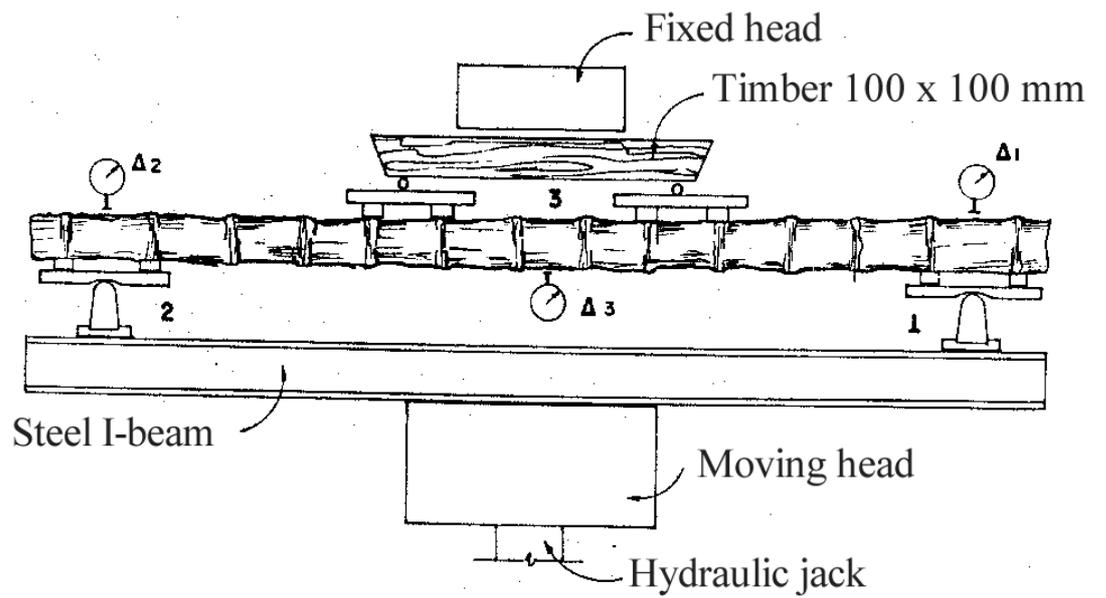
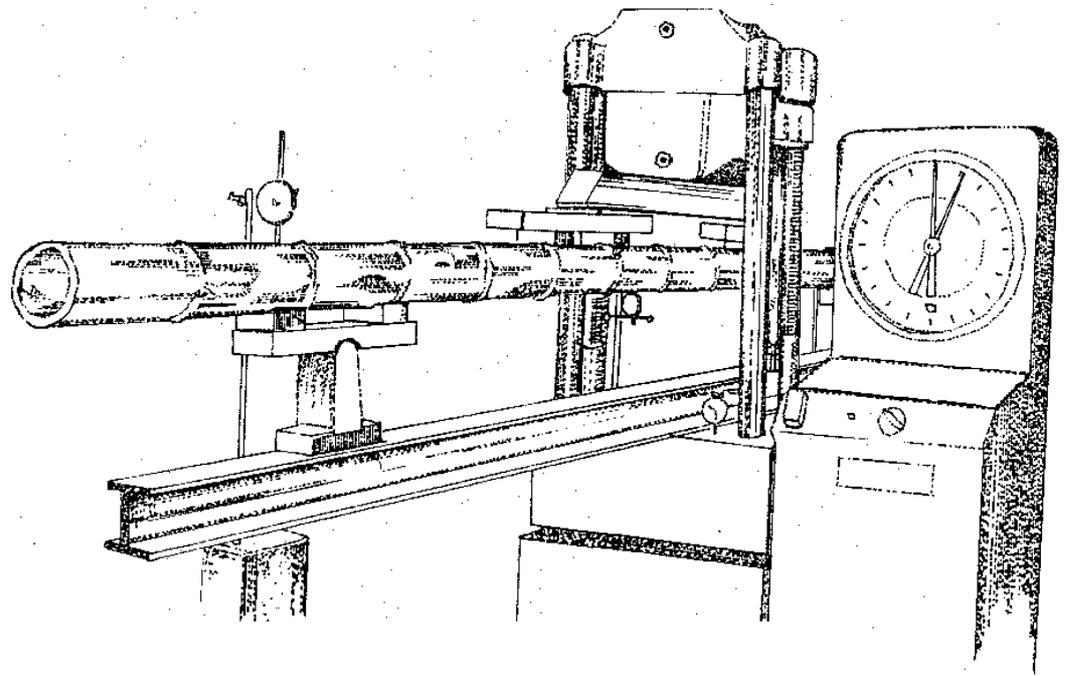


Figura 11: Una máquina para flexión. (Sotela 1990).

#### **5.1.2.4 Preparación de los culmos de ensayo**

Los culmos de ensayo no deben tener defectos visibles. Para lograr una falla en flexión, el espacio libre debe ser al menos  $30 \times D$ , donde  $D$  es el diámetro externo como se indicó en el numeral 4.2.1.

La longitud total del culmo debe ser por lo menos esta longitud libre más, en cada extremo, la mitad de la longitud del espacio entre los nudos.

#### **5.1.2.5 Procedimiento**

**5.1.2.5.1** Determine el valor medio del diámetro externo  $D$  y del espesor de la pared  $t$ , según lo indicado en el numeral 4.2.1. Calcule el segundo momento del área:

$$I_B = \pi / 64 \times [D^4 - (D-2t)^4]$$

Nota. Este valor de  $I_B$  se usa para predecir el comportamiento durante el ensayo.

**5.1.2.5.2** Coloque el culmo en su lugar en la máquina de ensayo, apoyado sobre dos dispositivos en los dos soportes, permitiendo que el culmo encuentre su propia posición. Enseguida ubique los dos dispositivos y la viga (que divide la carga) en la parte superior del culmo y permita nuevamente que el culmo encuentre su posición, alinee visualmente el culmo, los cuatro dispositivos, la carga y los soportes en un plano vertical.

**5.1.2.5.3** La aplicación de la carga al culmo se debe hacer uniformemente y a velocidad constante. La velocidad de ensayo debe ser de  $0,5 \text{ mm / s}$  (preferiblemente a velocidad constante de movimiento del cabezal de carga de la máquina, de otro modo, a velocidad constante de la

carga). La carga máxima se debe determinar con la exactitud indicada en el numeral 10.3.1. Observe las grietas y describa la forma de la falla. Diagrame la deflexión con relación a la carga.

**5.1.2.5.4** Después del ensayo determine nuevamente el diámetro externo  $D$  y el espesor de la pared  $t$ , lo más cerca posible de los puntos de carga. El promedio de los valores de diámetro y de los espesores de pared se debe usar para calcular el segundo momento de área  $I_B$ , con la fórmula del numeral 10.5.1.

**5.1.2.5.5** Determine el contenido de humedad de acuerdo con el texto de la sección 6 con una muestra proveniente del punto cerca de la falla.

### **5.1.2.6 Cálculo y expresión de los resultados**

**5.1.2.6.1** La resistencia máxima,  $\sigma_{m\acute{a}x}$ , en MPa (o N / mm<sup>2</sup>), en la flexión estática con el contenido de humedad en el momento del ensayo está determinado por la siguiente fórmula:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = F \times L \times D/2 / 6 \times I_B$$

donde:

$F$  es la carga máxima aplicada, en N (la carga total aplicada en los dos puntos de carga).

$L$  es el espacio libre, en mm (o espacio de separación)

$D$  es el diámetro externo, en mm, tal como se indica en 10.5.4.

$I_B$  es el segundo momento del área, en mm<sup>4</sup>, tal como se indica en 10.5.4.

Expresar los resultados con una exactitud de 1 MPa (o N / mm<sup>2</sup>).

**5.1.2.6.2** El módulo de elasticidad (módulo de Young) está determinado por la pendiente de la parte lineal del diagrama de deformación frente a carga.

El módulo de elasticidad  $E$ , en MPa, se calcula usando la siguiente fórmula:

$$E = 23 \times F \times L^3 / 1296 \times \delta \times I_B$$

donde:

$F$ ,  $L$  y  $I_B$  son igual que en 10.6.1.

$\delta$  es el espacio libre medio de la deflexión, en mm

Diagrame la deflexión frente a la carga.

**5.1.2.6.3** Si hay suficientes datos (acerca de la relación entre las propiedades mecánicas y el contenido de humedad), la resistencia máxima en la flexión estática se debe ajustar hasta 12% del contenido de humedad, con una exactitud de 1 MPa.

**5.1.2.6.4** La resistencia máxima media de la muestra y su desviación estándar se deben calcular con una exactitud de 1 MPa partiendo de los resultados de los culmos individuales de la muestra.

### **5.1.2.7 Informe del ensayo**

El informe del ensayo se debe hacer según el numeral 5.7. El informe también debe incluir la siguiente información:

- los resultados del ensayo tal como se calcularon en 10.6;
- las dimensiones de los culmos y el espacio libre;
- los diagramas de deflexión frente a la carga;
- los valores para  $\sigma_{m\acute{a}x}$  y  $E$  para cada culmo.

El contenido de humedad y la masa por volumen se deben determinar de acuerdo con las secciones 6 y 7.

### **5.1.3 CORTE**

#### **5.1.3.1 Objeto y campo de aplicación**

Esta sección especifica un método para los ensayos de corte, paralelo a las fibras, en especímenes de culmos de bambú.

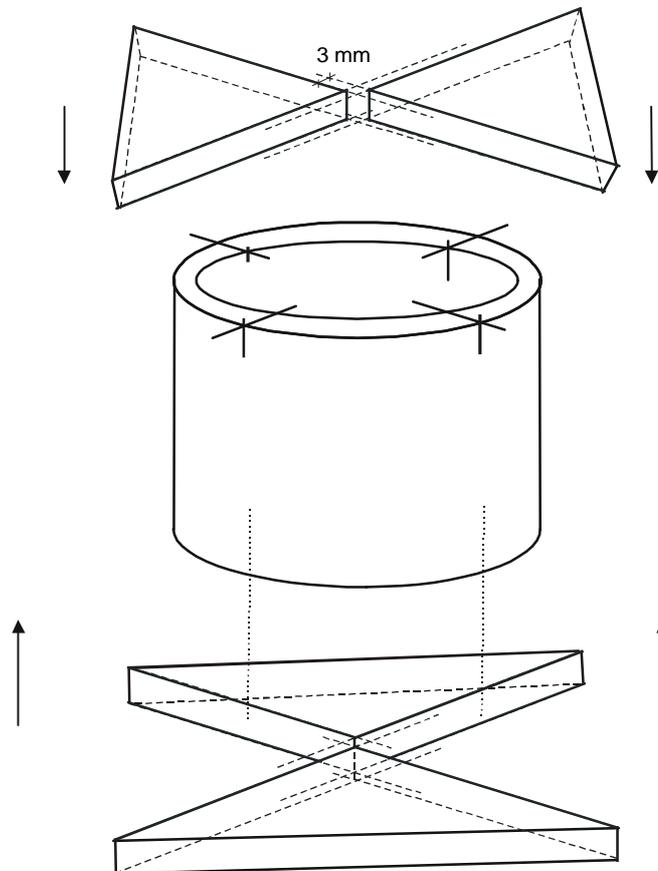
#### **5.1.3.2 Principio**

Determinación de la resistencia máxima de corte de especímenes de culmos.

#### **5.1.3.3 Equipo**

Los ensayos se deben realizar en una máquina de compresión tal como se indicó en la sección 9, sin las capas intermedias descritas en el numeral 9.3. En su lugar, el espécimen se debe apoyar en el extremo inferior, sobre dos de sus cuartos de superficie, opuestos entre sí; y se debe aplicar la carga en el extremo superior, sobre los dos cuartos que no están apoyados; véase Figura 4. Esta forma de apoyar y aplicar la carga al espécimen produce cuatro áreas de corte.





**Figura 4. Ensayo de corte.** Dimensiones en mm.

#### **5.1.3.4 Preparación de los especímenes de ensayo**

**5.1.3.4.1** Los especímenes se deben tomar de las partes inferior, media y superior de cada culmo. Estas muestras se deben marcar con las letras I, M y S respectivamente.

**5.1.3.4.2** Los ensayos de corte paralelos a la fibra se deben hacer en especímenes que sean 50% con nudo y 50% sin nudo, cuya longitud sea igual al diámetro. Estas limitaciones son válidas en caso de ensayos con propósitos comerciales; en caso de investigación científica, existe libertad para determinar algo diferente.

**5.1.3.4.3** Las superficies de los extremos del espécimen deben estar en ángulo recto con la longitud de éste; estas superficies deben ser planas.

**5.1.3.4.4** El espesor de la pared  $t$  y la altura  $L$  de la muestra se deben tomar en las cuatro áreas de corte

### **5.1.3.5 Procedimiento**

**5.1.3.5.1** El espécimen se debe colocar de manera tal que el centro del cabezal móvil esté verticalmente sobre el centro de la sección transversal del espécimen. El espécimen también debe estar centrado con relación a los cuartos de soporte y de carga. Inicialmente se aplica al conjunto de muestra una carga pequeña no superior a 1 kN.

**5.1.3.5.2** La carga se debe aplicar continuamente durante el ensayo para hacer que el cabezal móvil de la máquina de ensayo se desplace a una velocidad constante de 0,01 mm / s.

**5.1.3.5.3** Se debe registrar la lectura final de la carga máxima en la cual falló la muestra, así como la cantidad de áreas que fallaron.

### **5.1.3.6 Cálculo y expresión de los resultados**

La resistencia máxima de corte se debe calcular con la siguiente fórmula:

$$\tau_{m\acute{a}x} = F_{m\acute{a}x} / \sum (t \times L)$$

donde:

$\tau_{m\acute{a}x}$  es la resistencia máxima de corte, en MPa, redondeada con aproximación de 0,1 MPa

$F_{m\acute{a}x}$  es la carga máxima en la cual falla la muestra, en N

$\sum (t \times L)$  es la suma de los cuatro productos de  $t$  y  $L$ .

### **5.1.3.7 Informe del ensayo**

El informe del ensayo se debe hacer según el numeral 5.7; el contenido de humedad y la masa por volumen se deben determinar según las secciones 6 y 7.

## **5.1.4 TENSIÓN**

### **5.1.4.1 Objeto y campo de aplicación**

Esta sección especifica un método para los ensayos de tensión paralela a la fibra en bandas hechas con culmos de bambú.

### **5.1.4.2 Principio**

Determinación de la resistencia máxima de tensión paralela a la fibra, aplicando una carga gradualmente creciente sobre la muestra de ensayo.

### **5.1.4.3 Equipo**

**5.1.4.3.1** Los sujetadores de la máquina de ensayo deben asegurar que la carga se aplique a lo largo del eje longitudinal de la muestra de ensayo y deben evitar la torsión longitudinal de ésta. Los sujetadores deben sostener la muestra perpendicular a las fibras y en dirección radial.

**5.1.4.3.2** La carga se debe aplicar continuamente durante todo el ensayo a una velocidad de movimiento de la cruceta (crosshead) móvil de 0,01 mm / s. La carga se debe medir hasta 1%.

**5.1.4.3.3** Las dimensiones de la sección transversal de la porción de medición de la muestra de ensayo se deben medir con una exactitud de 0,1 mm.

**5.1.4.4 Preparación de los especímenes de ensayo**

**5.1.4.4.1** Los especímenes se deben tomar de las partes inferior, media y superior de cada culmo. Estas muestras se deben marcar con las letras I, M y S.

**5.1.4.4.2** Los ensayos de tensión paralela a las fibras se deben hacer en especímenes con un nudo, que deben estar en la sección de medición. Esta limitación es válida en caso de ensayos con propósitos comerciales; en caso de investigación científica, existe libertad para determinar algo diferente.

**5.1.4.4.3** La dirección general de las fibras debe ser paralela al eje longitudinal de la porción de medición de la muestra de ensayo. La porción de medición debe tener una sección transversal rectangular cuyas dimensiones sean iguales al espesor de la pared o menor en la dirección radial; y de 10 mm a 20 mm en la dirección tangencial. La longitud para la medición debe estar entre 50 mm y 100 mm.

**5.1.4.4.4** Los extremos de las muestras de ensayo deben tener la forma que garantice que la falla se produce en la porción de medición y que minimice la concentración del esfuerzo en el área de transición. Se permite usar muestras de ensayo con extremos laminados.

**5.1.4.4.5** Para determinar el módulo de elasticidad  $E$ , se deben usar celdas de carga, dos por muestra, cada una en el lado opuesto de la muestra de ensayo.

#### **5.1.4.5 Procedimiento**

**5.1.4.5.1** Mida las dimensiones de la sección transversal de la porción de medición de la muestra de ensayo con una exactitud de 0,1 mm, en tres lugares de la porción de medición, y calcule el valor medio.

**5.1.4.5.2** Asegure los extremos de la muestra entre los sujetadores de la máquina de ensayo, a una distancia segura desde la porción de medición. Aplique la carga a velocidad constante. Lea la carga máxima. Deseche los resultados obtenidos en muestras de ensayo cuya falla se produzca fuera de la porción de medición. Después del ensayo, determine el contenido de humedad.

**5.1.4.5.3** Cuando sea aplicable, se deben realizar lecturas de las celdas de carga la cantidad suficiente de veces para poder hacer un diagrama suficientemente exacto de la deformación frente a la carga, a partir de la cual se calcula el valor de  $E$ .

#### **5.1.4.6 Cálculo y expresión de los resultados**

**5.1.4.6.1** La resistencia máxima de tensión se debe determinar con la siguiente fórmula:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = F_{m\acute{a}x} / A$$

donde

$\sigma_{m\acute{a}x}$  es el esfuerzo máximo de tensi3n, en MPa (o N / mm<sup>2</sup>), redondeado con una aproximaci3n de un MPa entero.

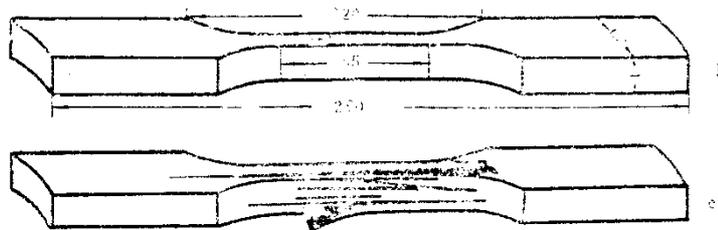
$F_{m\acute{a}x}$  es la carga máxima en la cual falla la muestra, en N.

$A$  es el área media de la secci3n transversal de la porci3n de medici3n, en mm<sup>2</sup>.

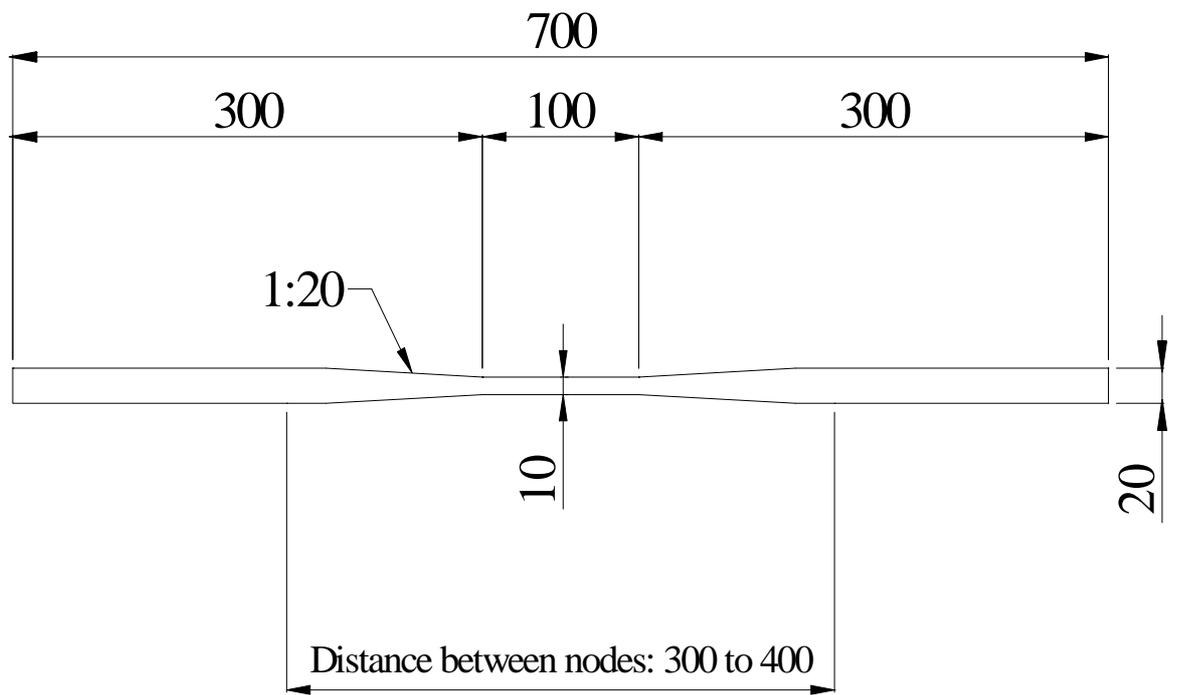
**5.1.4.6.2** El m3dulo de elasticidad  $E$  se debe calcular a partir del valor medio de las lecturas de las celdas de carga como relaci3n lineal entre el esfuerzo y la deformaci3n entre el 20% y el 80% de  $F_{m\acute{a}x}$ .

#### **5.1.4.7 Informe del ensayo**

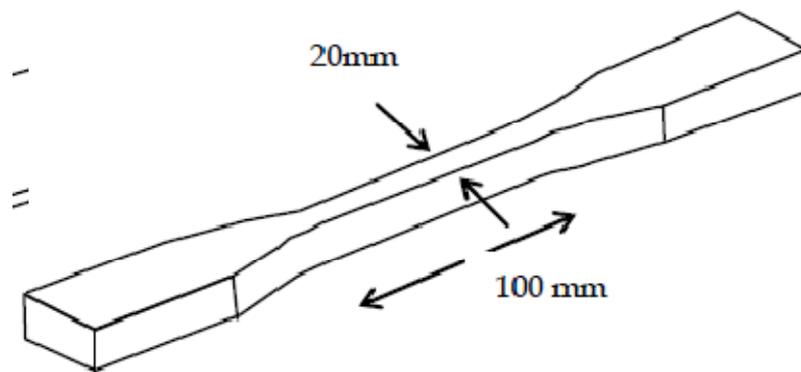
El informe del ensayo se debe elaborar seg3n el numeral 5.7; el contenido de humedad y la masa por volumen se deben determinar en la porci3n de medici3n y seg3n las secciones 6 y 7.



**Figura 13 Muestra de caña guadúa para ensayo a tensi3n.**



**Figura 15. Muestra de ensayo de tensión.**  
**Dimensiones en mm.**



## **CAPITULO 6: ENSAYOS**

### **6.1 INTRODUCCIÓN**

Cañas guadúa angustifolia Kunth de Ecuador fueron usadas en los ensayos. Estas cañas fueron traídas desde plantaciones de caña guadúa cercanas al cantón Valencia en la provincia de Los Ríos. Otros detalles sobre el origen de estas cañas son desconocidos y ya estaban cortadas en longitudes de aproximadamente seis metros. Habían sido tratadas en soluciones químicas con bórax y ácido bórico y sometidas a procedimientos de secado para mejorar su durabilidad. Estas cañas estaban almacenadas en bodegas de almacenamiento en los galpones de la Planta de Ecomateriales de la UCSG en Duran.

De una población de alrededor de 170 cañas guadúa, aparentemente tallos sanos sin ningún tipo de ataque por insectos o de hongos, huecos o imperfecciones; de éstas se seleccionaron arbitrariamente más de diez cañas para hacer las muestras para los ensayos.

Para las pruebas de flexión se elaboraron diez muestras, para las muestras de tensión se elaboraron doce muestras, para las pruebas de compresión se elaboraron catorce muestras y para las pruebas de corte se elaboraron quince muestras.

Las pruebas de los ensayos se realizaron en el laboratorio de estructuras de la Facultad de Ingeniería de la UCSG, en el edificio del CEINVES. Se tuvieron que hacer algunas adaptaciones a los equipos que existen ahí, debido a que fue la primera vez que se hacían este tipo de pruebas en el país.

Figuras 48 y 49: Cañas guadúa angustifolia Kunth de Quevedo, Ecuador almacenadas en la planta de Ecomateriales de la UCSG en Duran, Guayas.



Fuente: Pedro Córdova

Figura 50: Cañas guadúa angustifolia Kunth de Quevedo, Ecuador almacenadas en la planta de Ecomateriales de la UCSG en Duran, Guayas.



Fuente: Pedro Córdova.

Figuras 51, 52 y 53: Cañas guadúa angustifolia Kunth de Quevedo, Ecuador almacenadas en la planta de Ecomateriales de la UCSG en Duran, Guayas.



Fuente: Pedro Córdova

## 6.2 PREPARACIÓN DE EQUIPOS DE ENSAYOS DE CORTE

Se elaboraron quince muestras de caña guadúa para estos ensayos, la altura de cada muestra era igual a su medida de diámetro externo, es decir una relación 1:1, se elaboraron diez muestras de caña guadúa con un nudo, y se elaboraron cinco muestras de caña guadúa sin nudo.

El ensayo consiste en aplicar fuerzas de corte a los extremos de las muestras a través de dos placas huecas que formen los planos de falla en las muestras.

En la máquina de compresión se aplican fuerzas de compresión a las placas, las cuales transmiten fuerzas de corte a la muestra de caña guadúa paralelas a la fibra.

Figura 54: Muestras de caña guadúa ensayadas en los equipos de corte, con nudo y sin nudo.



Fuente: Pedro Córdova

Figura 55: Placas huecas en cuadrantes opuestos para formar los planos de falla en el ensayo de corte.



Fuente: Pedro Córdova

Figura 56: Ensayo de corte en la máquina de compresión simple. La muestra debe estar centrada.



Fuente: Pedro Córdova

Figuras 57 y 58: Mecanismo de falla del ensayo de corte al llegar a la resistencia última al esfuerzo cortante.



Fuente: Pedro Córdova

### 6.3 PREPARACIÓN DE EQUIPOS DE ENSAYOS DE COMPRESIÓN

Se elaboraron catorce muestras de caña guadúa para estos ensayos, la altura de cada muestra era igual a su medida de diámetro externo, es decir una relación 1:1, se elaboraron las catorce muestras de caña guadúa sin nudo.

Figura 59: Elaboración de una muestra de caña guadúa sin nudo para el ensayo de compresión paralela a la fibra.



Fuente: Pedro Córdova

El ensayo consiste en aplicar fuerzas de compresión paralela a la fibra de la caña guadúa en los extremos de las muestras a través de dos placas solidas. En la máquina de compresión se aplican fuerzas de compresión a las placas, las cuales se componen por una placa de hierro de 1 pulgada, sobre la cual se asienta un disco de teflón de 1/16 de pulgada sobre el cual se aplica una capa fina de grasa grafitada sobre la cual se asientan cunas de lata de espesor pequeño. Todo esto se elabora para que en los extremos de la muestra no haya fricción y no ocurra el fenómeno de confinamiento, es decir pueda existir desplazamiento horizontal al existir libre deslizamiento.

Figuras 60 y 61: Placa elaborada para el ensayo de compresión libre de fricción en la muestra y ocurra el deslizamiento horizontal.



Fuente: Pedro Córdova

Figuras 62 y 63: Ensayo de compresión simple paralela a la fibra.



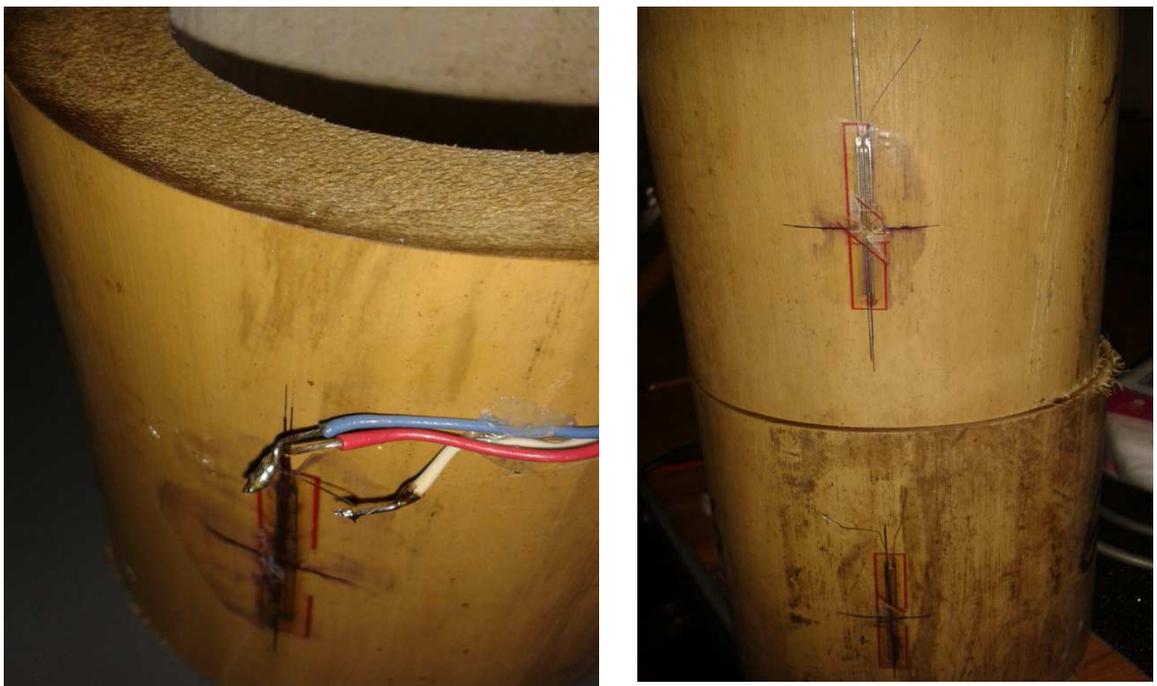
Fuente: Pedro Córdova

Figuras 64 y 65: Mecanismo de falla del ensayo de compresión al llegar a la resistencia ultima a la compresión paralela a la fibra.



Fuente: Pedro Córdova

Figuras 66 y 67: Strain gauge instalados en las muestras de compresión para poder medir la deformación a medida que se aumenta la carga y poder determinar el modulo de elasticidad de la caña guadúa.



Fuente: Pedro Córdova

#### **6.4 PREPARACIÓN DE EQUIPOS DE ENSAYOS DE FLEXIÓN**

Se elaboraron diez muestras de caña guadúa para estos ensayos, la longitud de cada muestra era mayor de treinta veces de su medida del diámetro externo, es decir una relación 30:1. Se requiere estas dimensiones ( $L \geq 30D$ ) para la muestra para poder ensayar a la caña y que se obtenga flexión pura sin esfuerzos ocasionados por fuerzas cortantes.

El ensayo consiste de una caña simplemente apoyada en sus extremos, aplicándole cargas puntuales aproximadamente en  $L/3$  medido desde los extremos. Los apoyos de los extremos deben ser articulados para que permitan la rotación, y no exista ni desplazamiento vertical ni horizontal en esos puntos de apoyo. La carga  $P$  del gato se aplica sobre una viga metálica, la cual descansa sobre los puntos de aplicación de las cargas. Es una prueba de flexión de 4 puntos.

Se colocaron tres deformímetros, uno en el centro para poder medir la deformación que sufre la caña guadúa a medida que se aumenta la carga aplicada. También se colocaron un deformímetro a cada extremo para saber cuánto se asentaba la caña debido a que estaba apoyada sobre cauchos sobre los apoyos para tener mayor estabilidad. A la medida del deformímetro central se le resta el promedio de las medidas de los deformímetros de los extremos para poder determinar la medida exacta de la deformación que ocasiona la flexión por la carga aplicada en los 4 puntos.

Figuras 68 y 69: Apoyos articulados en los extremos.



Fuente Pedro Córdova

Figuras 70 y 71: Apoyos centrales en los cuales se distribuye la aplicación de la carga del gato.



Fuente: Pedro Córdova

Figuras 72 y 73: Ensayo de flexión de 4 puntos de carga puntual en una caña guadúa. El gato aplica una fuerza  $P$  que se transmite a la viga metálica y se divide en fuerzas  $P/2$  sobre los apoyos centrales de aplicación de las cargas. Se utilizaron los deformímetros para poder medir las deformaciones a medida que se aumenta la carga aplicada a la caña guadúa y poder medir su deformación máxima cuando se llega al máximo esfuerzo por flexión.



Fuente: Pedro Córdova

Figura 74: Caña guadúa pandeada antes de llegar a la falla debido a las cargas de flexión.



Fuente: Pedro Córdova

Figura 75: Mecanismo de falla a flexión de la caña guadúa. Existe una falla por compresión de las fibras superiores debido a que la lignina que une las fibras falla. No fallan las fibras sometidas a tensión debido a que son más resistentes.



Fuente Pedro Córdova

## 6.5 PREPARACIÓN DE EQUIPOS DE ENSAYOS DE TENSIÓN

En las pruebas de tensión se utilizaron muestras de caña guadúa ahusadas de 70 cm de largo; se ensayaron 12 muestras con dichas características y además se midieron las propiedades de la sección de cada guadúa de donde se extrajo la probeta. La sección de medición tenía un área compuesta por el espesor de la pared de la caña y un ancho mayor a 1 cm, además la longitud de la sección de medición era de 10 cm. Todas las muestras tuvieron un nudo en la sección de medición. En la sección de medición se colocaron strain gauges para obtener las deformaciones que sufría la muestra a medida que se la sometía a la carga.

Figura 76: Muestras de tiras de caña guadúa, con una reducción de su área en el centro, para el ensayo de tensión.

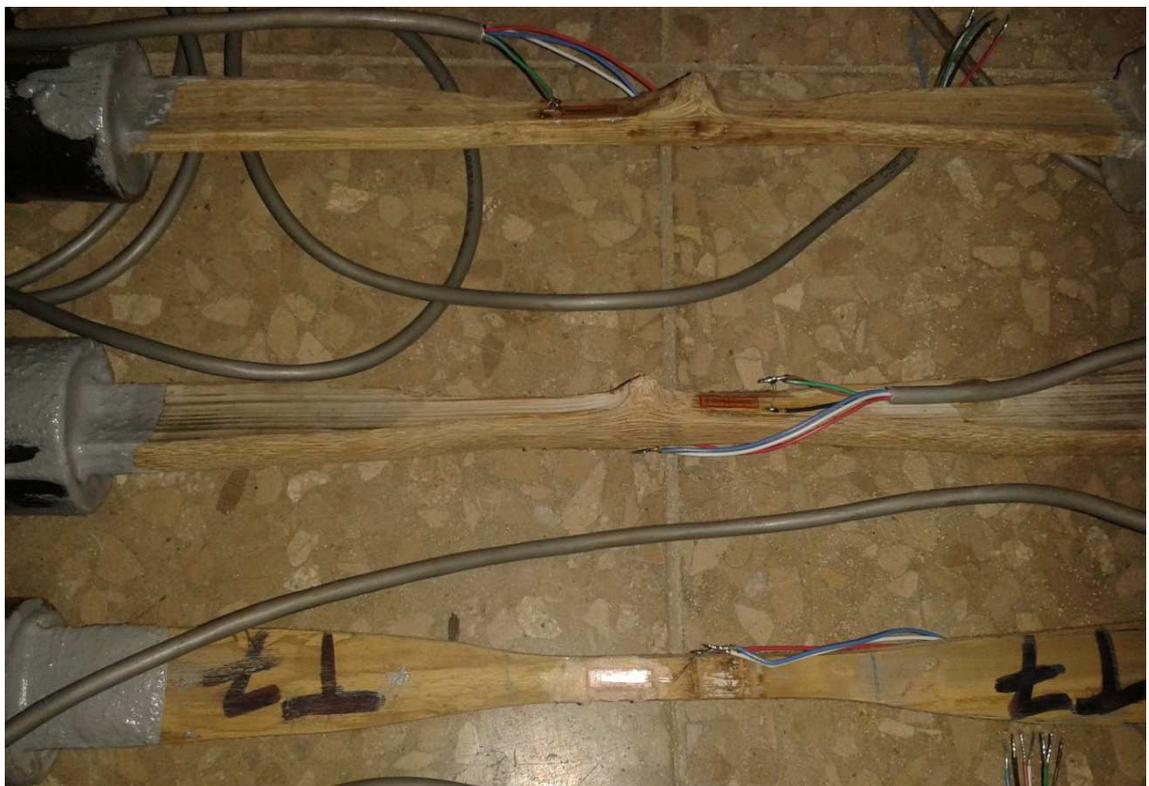


Fuente: Pedro Córdova.

En los extremos se tuvieron que elaborar los agarres para poder jalar la muestra desde ambos extremos y poder ejecutar el ensayo de tensión. Al

principio se elaboraron agarres que consistían en apretar los extremos de las muestras con placas metálicas empernadas y crear fricción entre la caña y las placas pegándoles lijas, se esperaba que la resistencia a la tensión de la caña sea menor que la fricción que ocurría en los extremos entre la lija pegaba a la caña y la lija pegada a las placas, pero no fue así. Entonces se ideó otra forma de agarre, el cual consistía en tuberías metálicas de 20 cm de largo, a las cuales se les soldó una abrazadera en cada extremo. Los extremos de las muestras fueron tallados para crear fricción y no sean de superficie lisa. Los extremos de las muestras fueron insertados dentro del tubo y se vertió en el interior un epóxico para anclajes de Sika. Estos agarres dieron mejores resultados en las pruebas, siendo más resistentes a la tensión que la resistencia que otorgaba la muestra de caña en su sección de medición.

Figura 77: Strain gauges colocados en la sección de medición.



Fuente: Pedro Córdova.

Figura 78 y 79: Elaboración de los agarres en los extremos de las muestras.



Fuente: Pedro Córdova.

Figuras 80, 81, 82, 83 y 84: Ensayo de tensión paralela a la fibra.



Fuente: Pedro Córdova.

A través de una celda de carga se obtienen las lecturas de la carga que se le va aplicando a la muestra, y con los strain gauges se obtienen las lecturas de las deformaciones cuando se le aplican esas cargas. Ambos extremos de las muestras se agarran con abrazaderas para poder jalar aplicando la carga de tensión a través de una polea de 3 toneladas de

capacidad. Se aplica cargas sucesivamente hasta llegar a la falla de rotura por tracción. Todas las muestras fallaron en la sección de medición como se tenía previsto por tener las menores dimensiones, además se vio que era una falla frágil, es decir instantánea, las fibras se rompían bruscamente, y se lograba escuchar cómo iban rompiéndose las primeras fibras para después desgarrarse bruscamente.

Figura 85: Mecanismo de falla de muestras de caña guadúa a tensión.



Fuente: Pedro Córdova.

## **CAPITULO 7: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS**

### **7.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS**

En este análisis se pondrá énfasis en determinar las relaciones estadísticas que pueda existir entre las variables, con el objetivo de determinar las propiedades mecánicas. Las diferentes propiedades mecánicas fueron analizadas estadísticamente. Correlaciones entre las propiedades mecánicas fueron determinadas.

### **7.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE CORTE**

Tabla 17: Muestras de los resultados de los ensayos y cálculo del esfuerzo cortante de muestras de caña guadúa.

Muestra n	D ext (cm)	D int (cm)	Esp (cm)	Altura de muestra (cm)	Peso (g)	Area de corte (cm2)	P (kN)	$\tau_{ult}$ (Mpa)
1 (nudo)	11.55	8.21	1.62	11.55	664.5	74.844	65.4	8.738
2 (nudo)	11.39	7.85	1.62	11.39	667.9	73.8072	59.5	8.062
3 (nudo)	11.65	8.71	1.31	11.65	512.3	61.046	54.4	8.911
4 (nudo)	9.76	6.3	1.47	9.76	303.1	57.3888	60.6	10.560
5 (nudo)	10.16	8.45	0.82	10.16	251.7	33.3248	35.6	10.683
6 (nudo)	10.64	9.03	0.81	10.64	273.4	34.4736	40.8	11.835
7 (nudo)	9.97	8.18	0.97	9.97	245.4	38.6836	35.6	9.203
8	10.24	8.54	0.84	10.24	198.9	34.4064	33.4	9.707
9	11.42	9.29	1.07	11.42	324.3	48.8776	41.7	8.532
10 (nudo)	9.86	8.15	0.74	9.86	175.5	29.1856	25.5	8.737
11 (nudo)	9.67	6.5	1.41	9.67	274.9	54.5388	42.65	7.820
12 (nudo)	10.04	8	1.11	10.04	271.8	44.5776	49.4	11.082
13	9.71	6.37	1.42	9.71	272.2	55.1528	62.8	11.387
14	10.22	8.63	0.74	10.22	180.1	30.2512	29	9.586
15	9.9	8.14	0.88	9.9	221.1	34.848	32.98	9.464

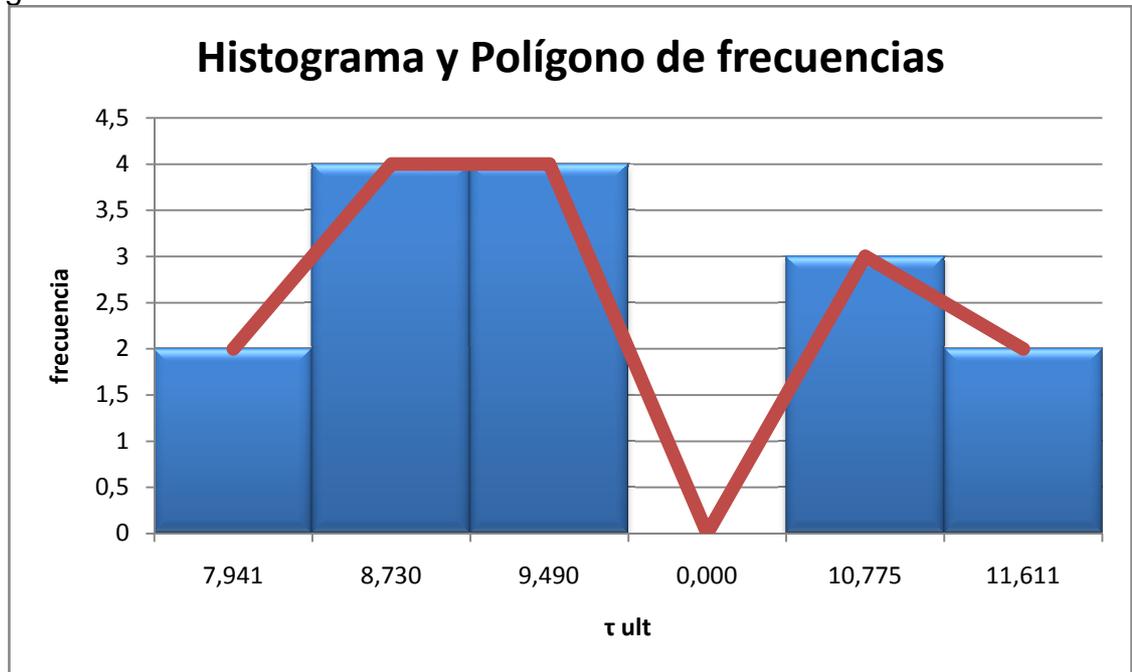
Fuente: Pedro Córdova

Tabla 18: Análisis estadístico del esfuerzo último de fuerzas cortantes.

$\tau_{ult}$ Media =	<b>9.620 Mpa</b>
Desviacion estandar (S) =	<b>1.233 Mpa</b>
$\tau_k$ =	<b>7.592 Mpa</b>
$S/\tau_{ult}$ Media =	<b>0.128</b>

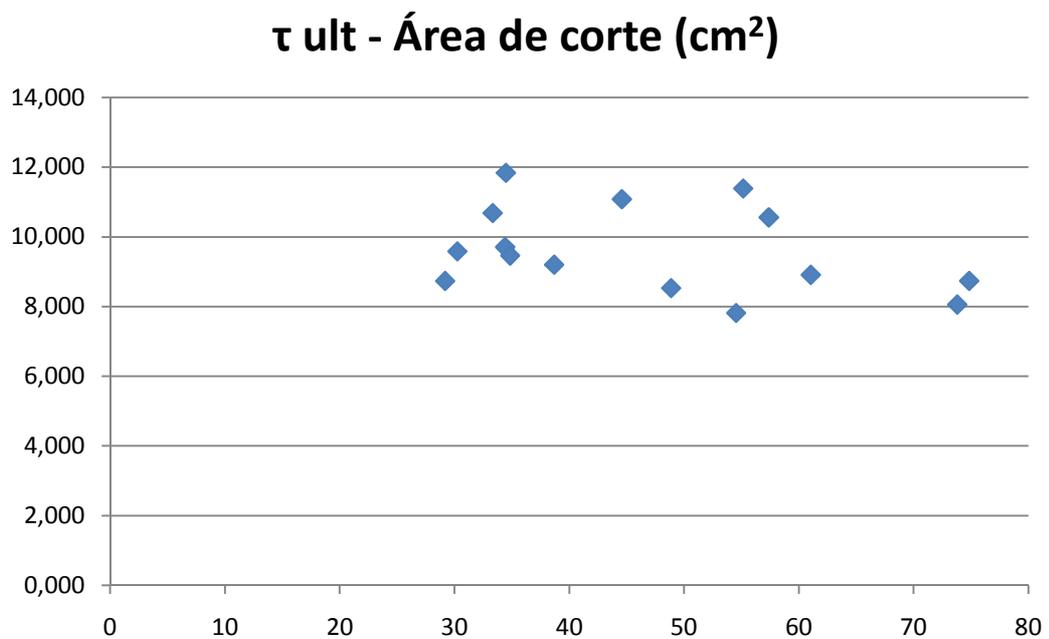
Fuente: Pedro Córdova

Figura 86: Análisis estadístico del esfuerzo cortante último de la caña guadúa.



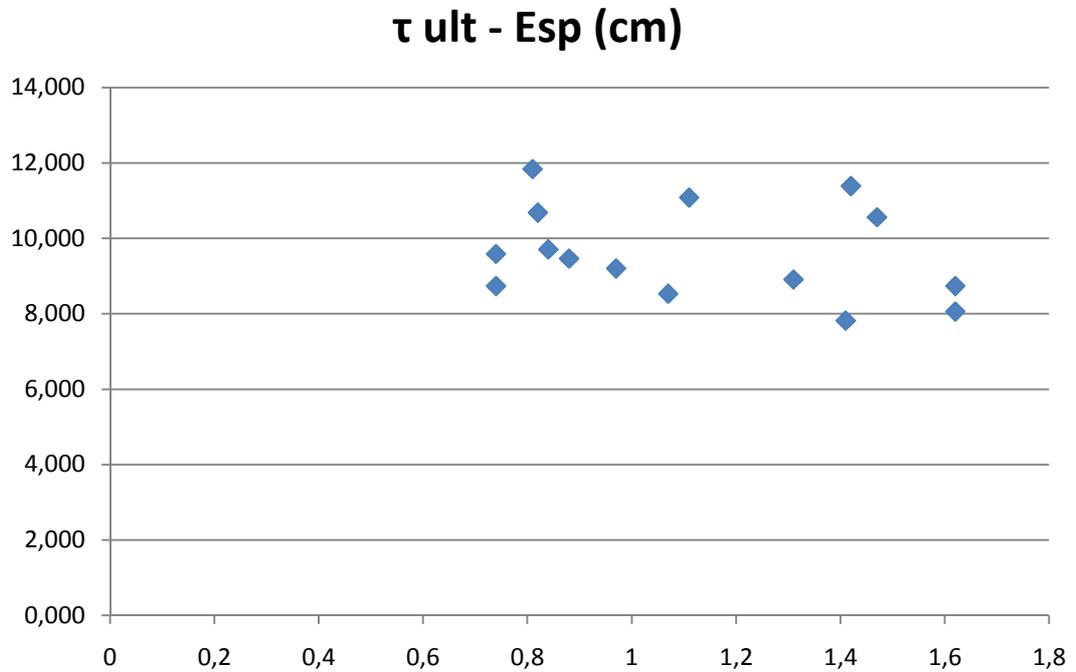
Fuente: Pedro Córdova

Figura 87: Variación del esfuerzo cortante último de la caña guadúa vs. el área sometida a corte. A medida que aumenta el área de corte, disminuye el esfuerzo cortante en la caña.



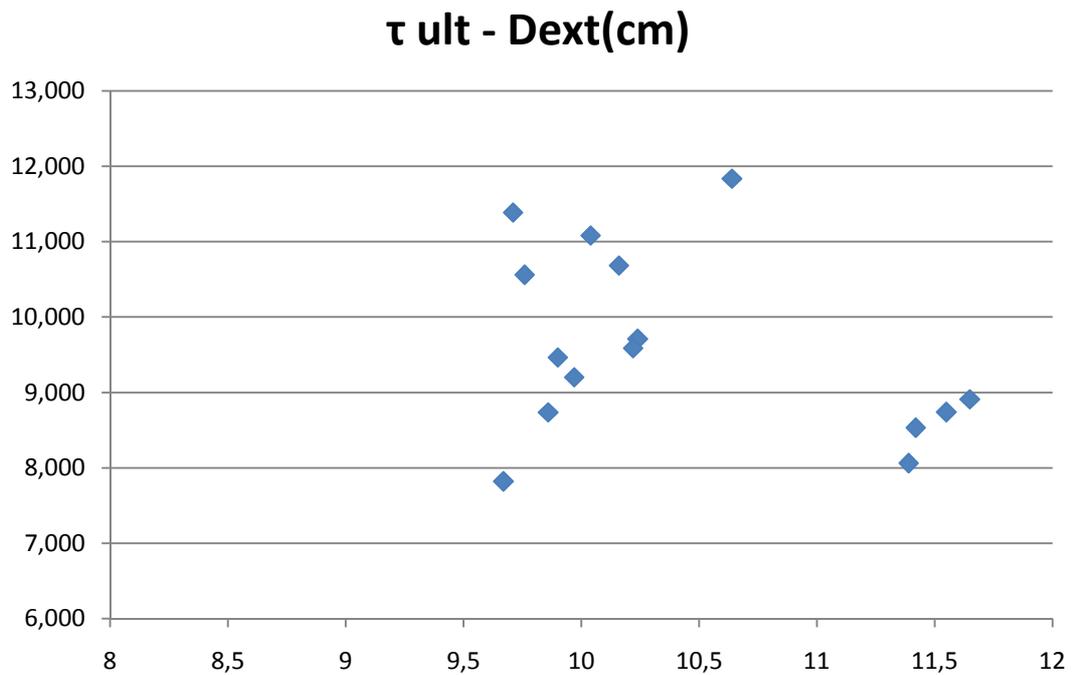
Fuente: Pedro Córdova

Figura 88: Variación del esfuerzo cortante último de la caña guadúa vs. el espesor de la pared de la caña. A medida que aumenta el espesor se tiene un menor esfuerzo cortante en la caña.



Fuente: Pedro Córdoba

Figura 89: Variación del esfuerzo cortante último de la caña guadúa vs. el diámetro exterior de la caña.



Fuente: Pedro Córdoba

### 7.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE COMPRESIÓN PARALELA A LA FIBRA

Tabla 19: Muestras de los resultados de los ensayos y cálculo del esfuerzo de compresión último de caña guadúa.

Muestra n	Dext (cm)	Dint (cm)	Esp (cm)	Peso (g)	Area (cm <sup>2</sup> )	P (kN)	$\sigma_{ult}$ (MPa)	Esp/Dext	Dm (cm)
1	9.84	6.49	1.59	269.8	42.966	169.5	39.450	0.1616	8.165
2	10.23	8.55	0.88	189.1	24.780	127.6	51.494	0.0860	9.39
3	9.65	8.05	0.8	176.1	22.242	127.3	57.233	0.0829	8.85
4	10.84	9.23	0.76	229.2	25.378	127.1	50.082	0.0701	10.035
5	9.83	8.19	0.77	202	23.211	123.7	53.294	0.0783	9.01
6	10.69	9.06	0.85	221.2	25.284	132.8	52.523	0.0795	9.875
7	9.81	8.12	0.82	173.7	23.799	112.1	47.103	0.0836	8.965
8	11.19	9.05	1	265.6	34.018	168.7	49.591	0.0894	10.12
9	10.44	8.81	0.85	187.1	24.644	106	43.013	0.0814	9.625
10	10.06	8.25	0.83	182.7	26.029	122.7	47.140	0.0825	9.155
11	10.14	7.11	1.45	268.4	41.051	185.5	45.188	0.1430	8.625
12	9.8	8.16	0.9	188	23.133	114.5	49.495	0.0918	8.98
13	9.64	6.82	1.4	243.9	36.456	171.5	47.043	0.1452	8.23
14	10.32	6.87	1.56	290.9	46.578	182.8	39.246	0.1512	8.595

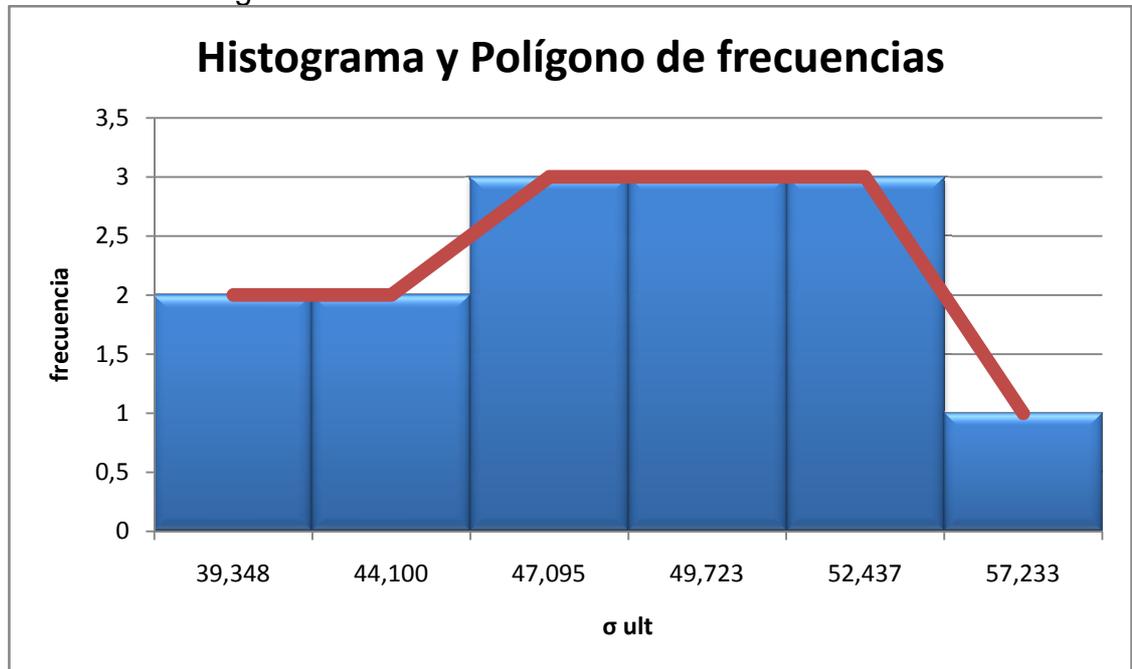
Fuente: Pedro Córdova

Tabla 20: Análisis estadístico del esfuerzo de compresión último de caña guadúa.

$\sigma_{ult}$ Media =	47.993 Mpa
Desviacion estandar (S) =	5.114 Mpa
$\sigma_k$ =	39.580 Mpa
S/ $\sigma_{ult}$ Media =	0.107

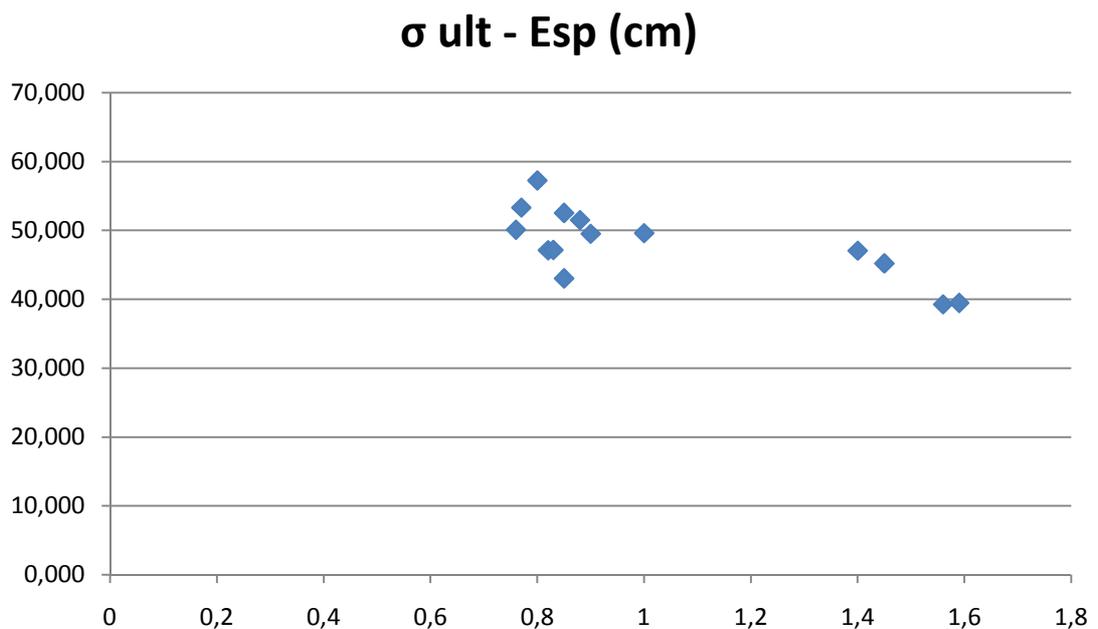
Fuente: Pedro Córdova

Figura 90: Análisis estadístico del esfuerzo último a compresión paralela a la fibra de la caña guadúa.



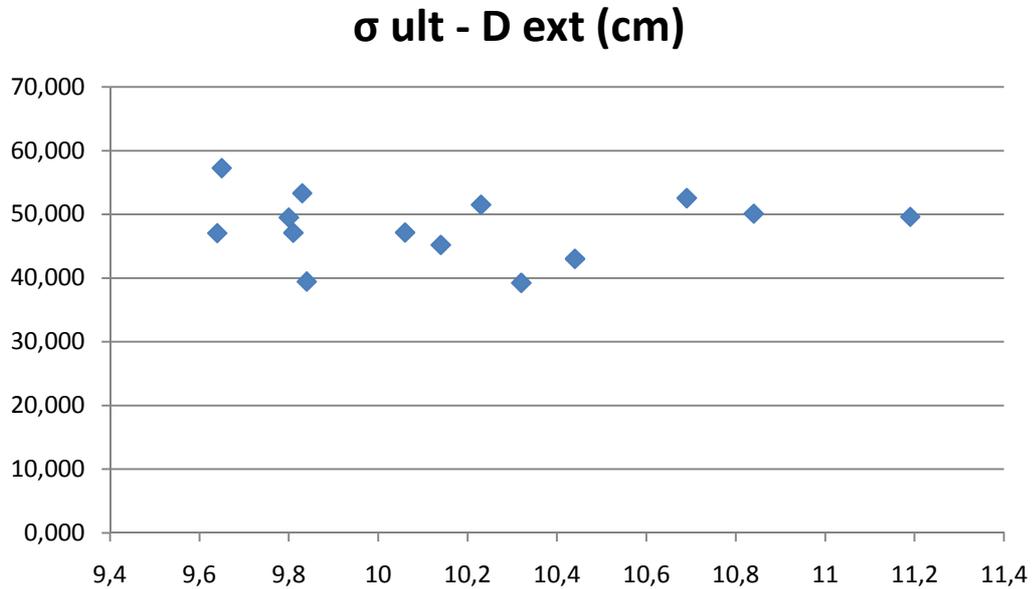
Fuente: Pedro Córdova.

Figura 91: Variación del esfuerzo a compresión paralela a la fibra último de la caña guadúa vs. el espesor de la pared de la caña. A medida que aumenta el espesor de la pared de la caña, aumenta la resistencia a compresión.



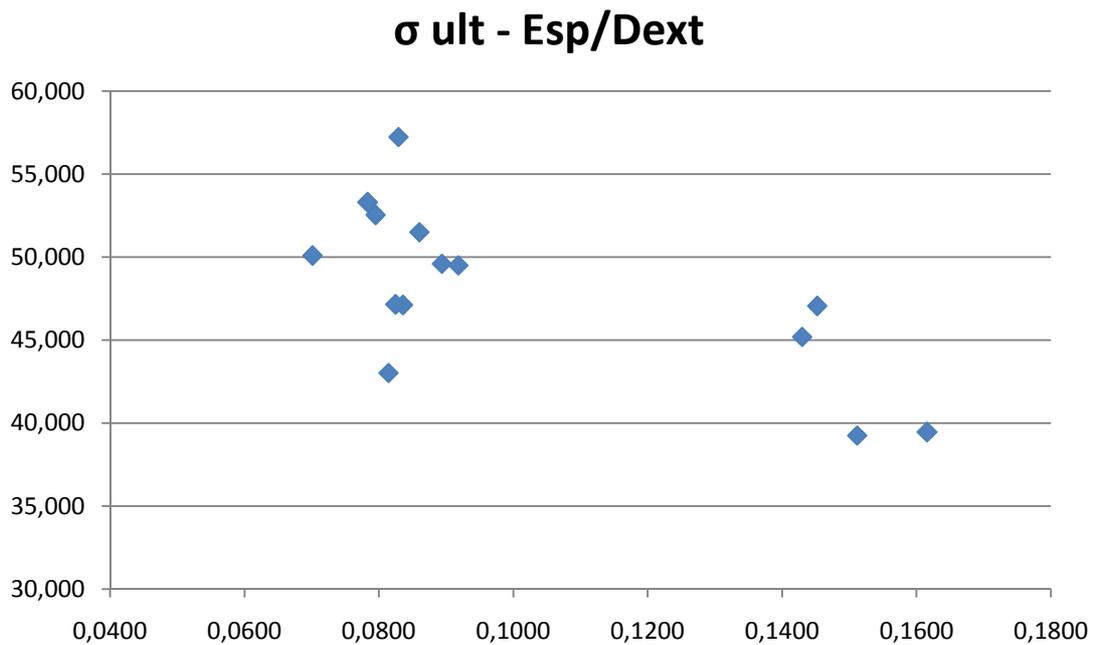
Fuente: Pedro Córdova.

Figura 92: Variación del esfuerzo a compresión paralela a la fibra último de la caña guadúa vs. el diámetro exterior de la caña.



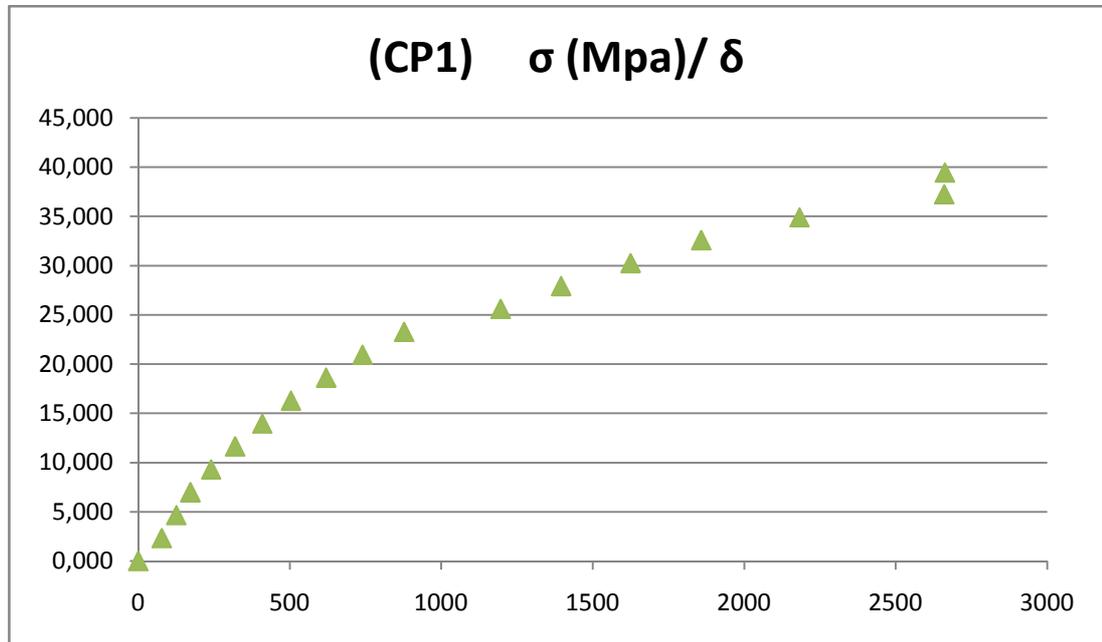
Fuente: Pedro Córdova.

Figura 93: Variación del esfuerzo a compresión paralela a la fibra último de la caña guadúa vs. la relación entre el espesor y el diámetro exterior de la caña.



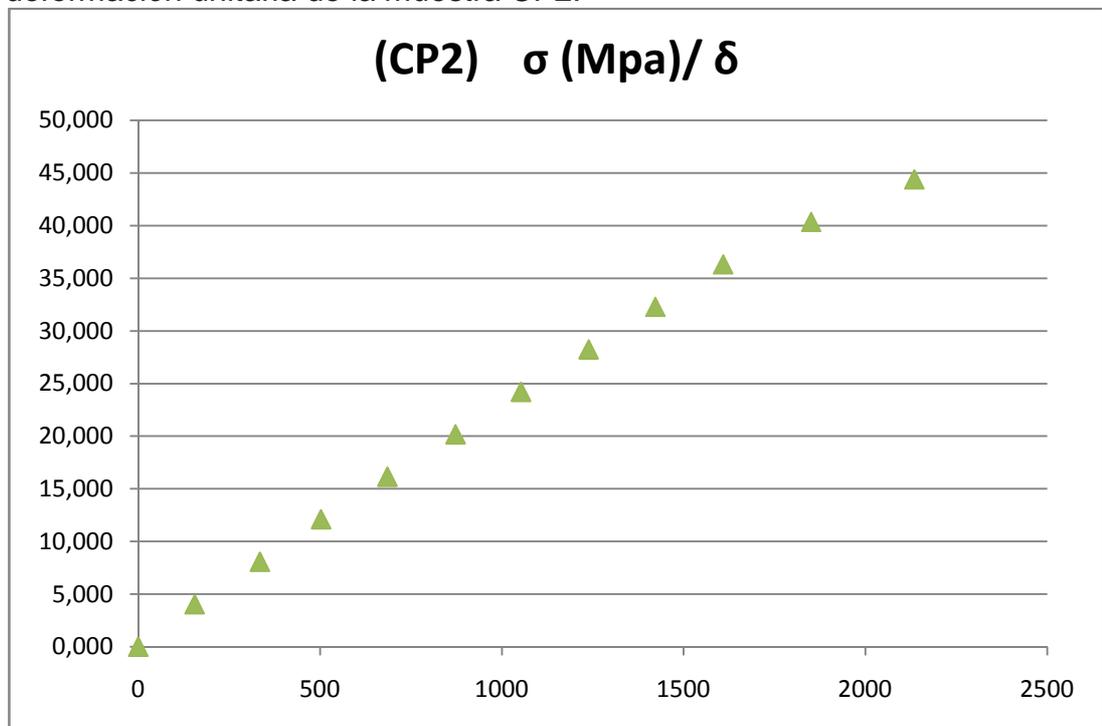
Fuente: Pedro Córdova.

Figura 94: Curva del esfuerzo de compresión paralela a la fibra vs. la deformación unitaria de la muestra CP1.



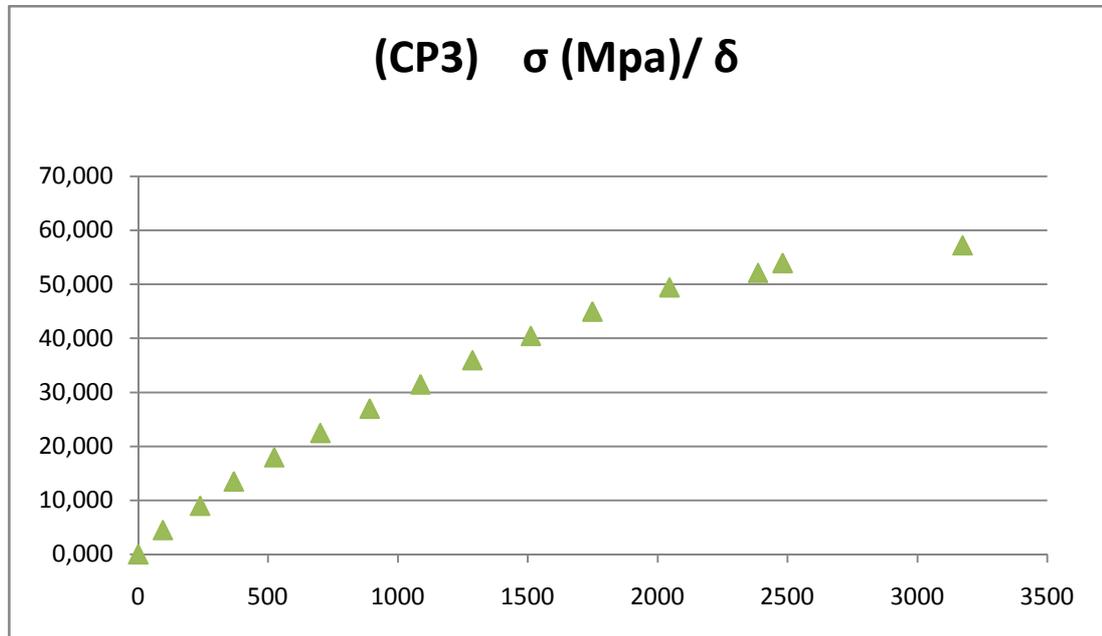
Fuente: Pedro Córdova.

Figura 95: Curva del esfuerzo de compresión paralela a la fibra vs. la deformación unitaria de la muestra CP2.



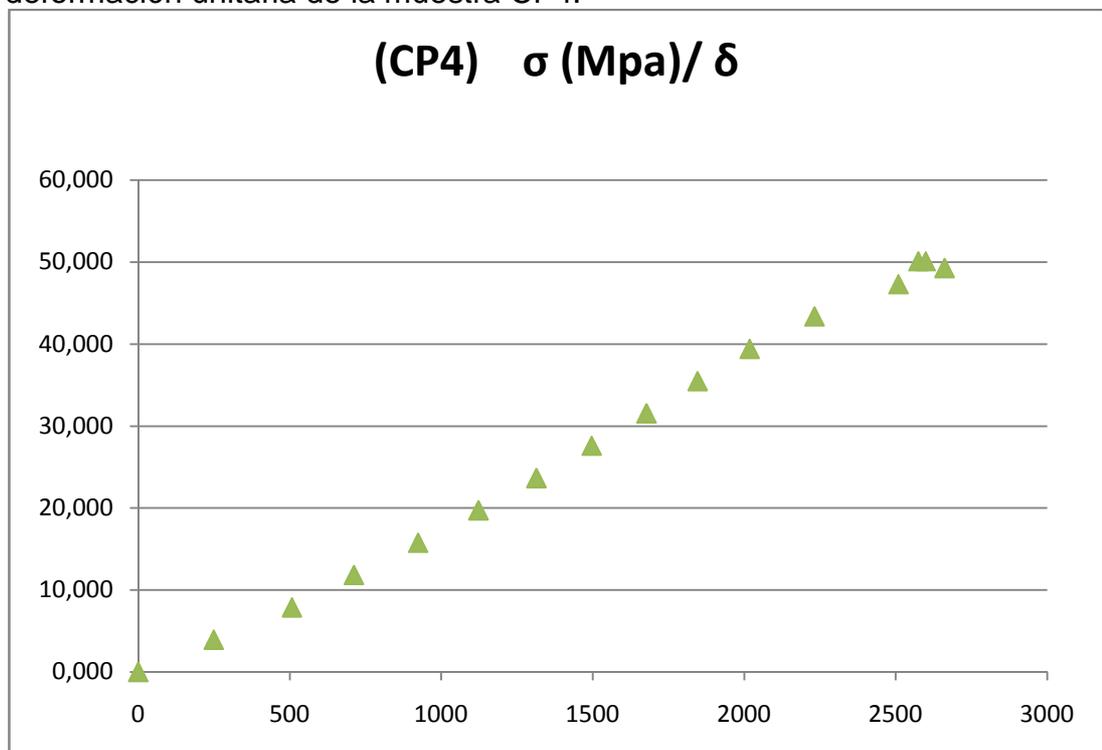
Fuente: Pedro Córdova.

Figura 96: Curva del esfuerzo de compresión paralela a la fibra vs. la deformación unitaria de la muestra CP3.



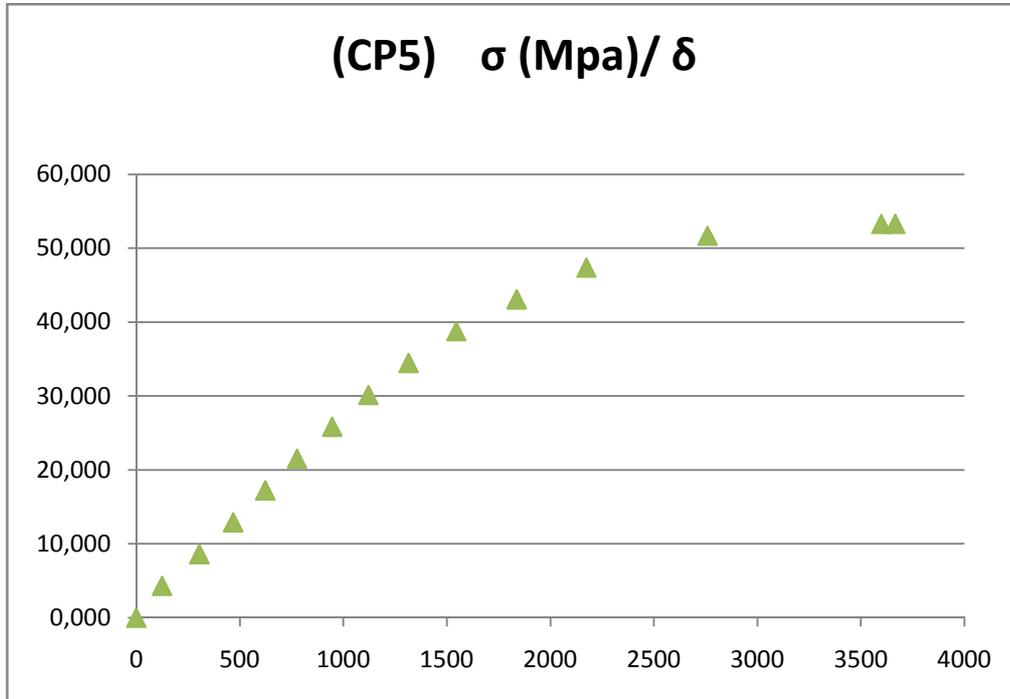
Fuente: Pedro Córdova.

Figura 97: Curva del esfuerzo de compresión paralela a la fibra vs. la deformación unitaria de la muestra CP4.



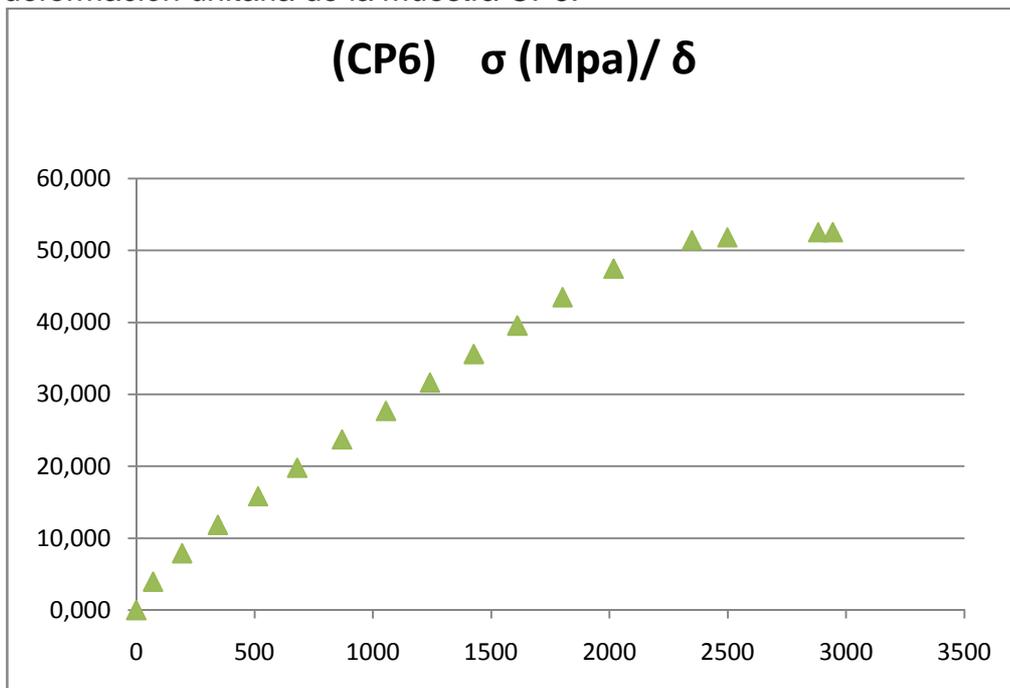
Fuente: Pedro Córdova.

Figura 98: Curva del esfuerzo de compresión paralela a la fibra vs. la deformación unitaria de la muestra CP5.



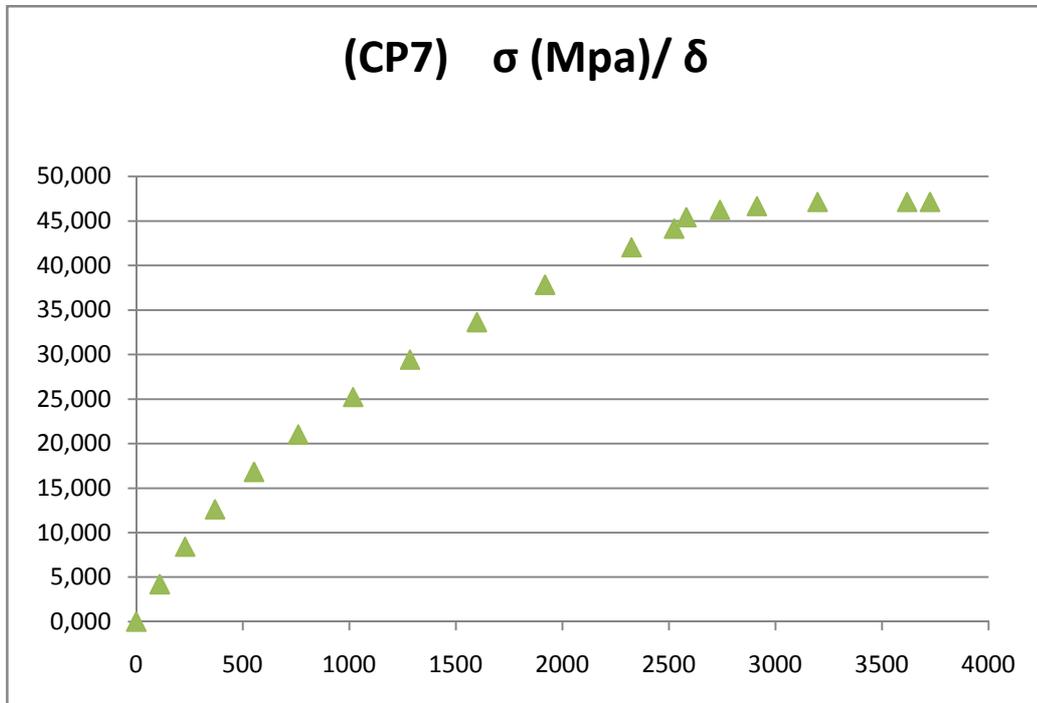
Fuente: Pedro Córdova.

Figura 99: Curva del esfuerzo de compresión paralela a la fibra vs. la deformación unitaria de la muestra CP6.



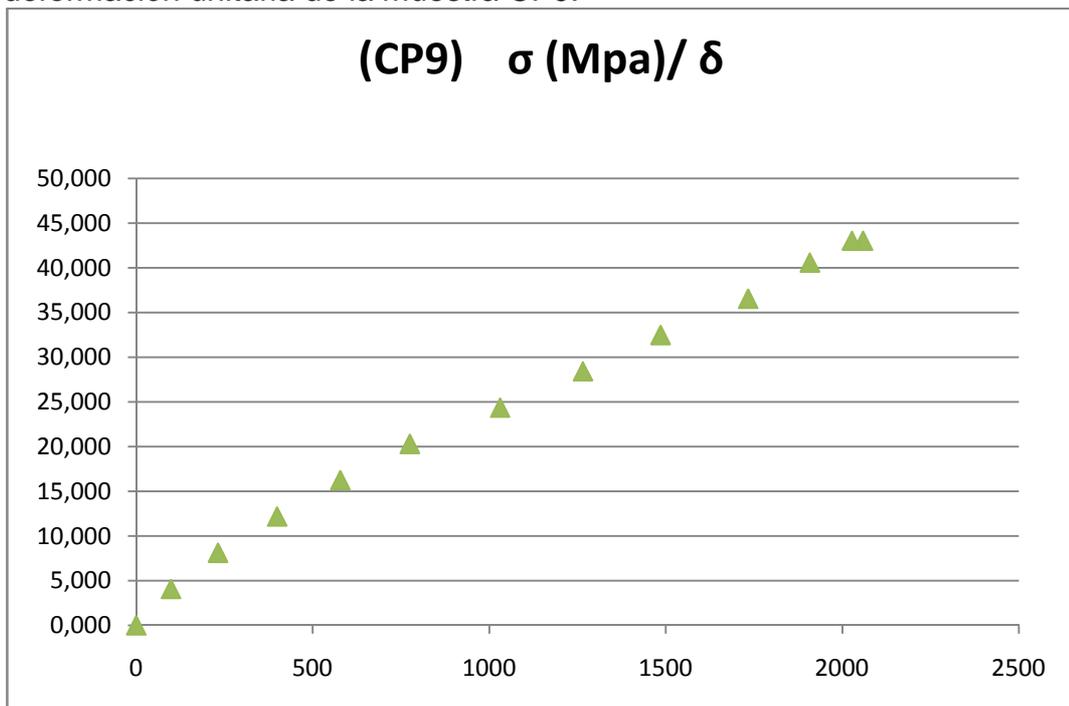
Fuente: Pedro Córdova.

Figura 100: Curva del esfuerzo de compresión paralela a la fibra vs. la deformación unitaria de la muestra CP7.



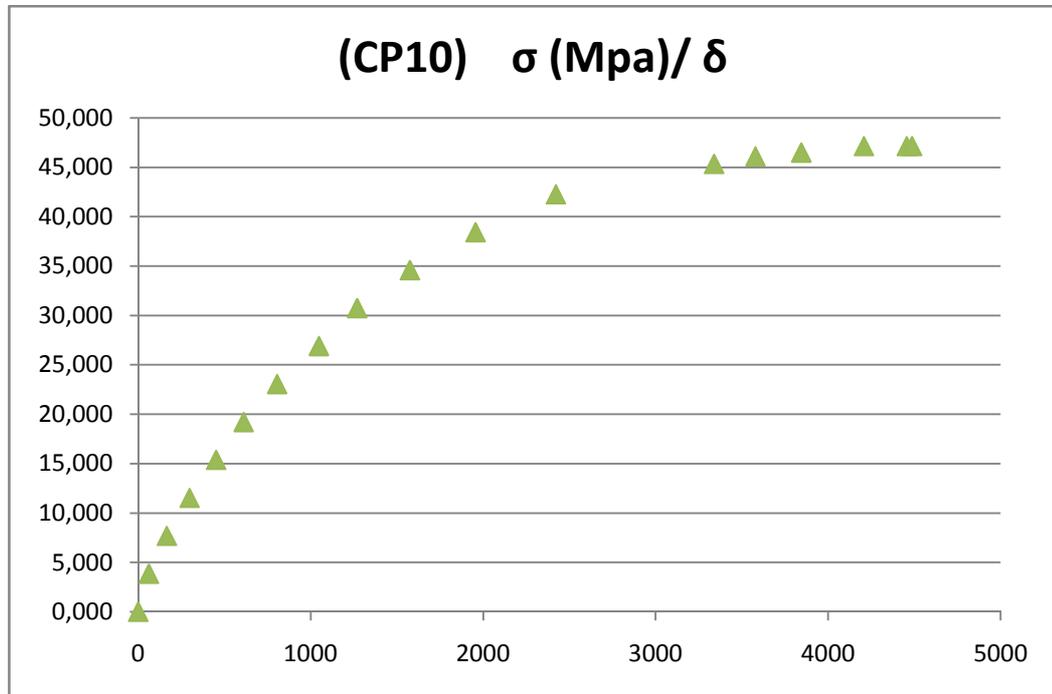
Fuente: Pedro Córdoba.

Figura 101: Curva del esfuerzo de compresión paralela a la fibra vs. la deformación unitaria de la muestra CP9.



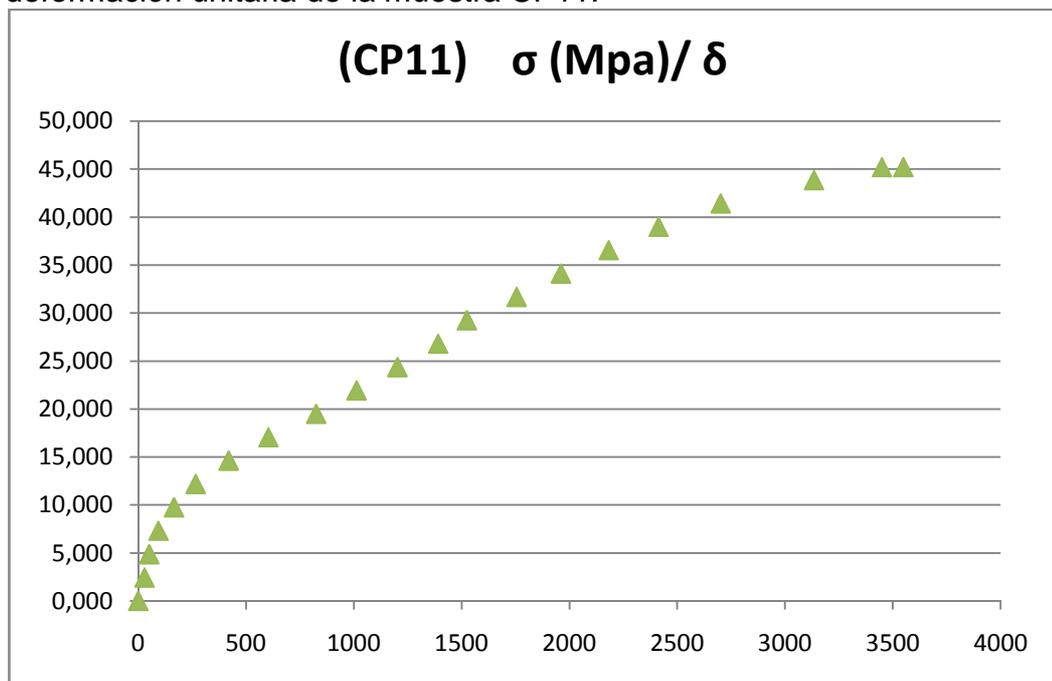
Fuente: Pedro Córdoba.

Figura 102: Curva del esfuerzo de compresión paralela a la fibra vs. la deformación unitaria de la muestra CP10.



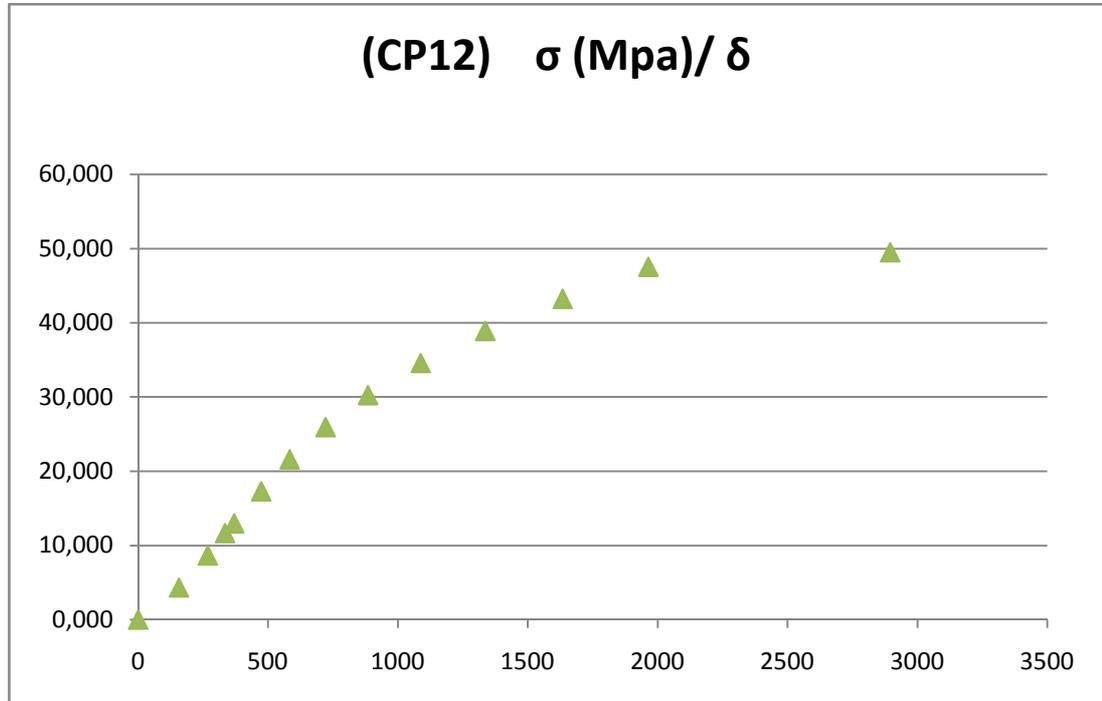
Fuente: Pedro Córdoba.

Figura 103: Curva del esfuerzo de compresión paralela a la fibra vs. la deformación unitaria de la muestra CP11.



Fuente: Pedro Córdoba.

Figura 104: Curva del esfuerzo de compresión paralela a la fibra vs. la deformación unitaria de la muestra CP12.



Fuente: Pedro Córdova.

Tabla 21: Cálculo del módulo de elasticidad de caña guadúa sometida a compresión paralela a la fibra.

Muestra n	0.5 $\sigma$ ult (MPa)	$\mu\epsilon$ (0.5 $\sigma$ ult)	E = (0.5 $\sigma$ ult)/( $\epsilon$ (0.5 $\sigma$ ult) ) (GPa)
1	19.725	677	29.136
2	25.747	1123	22.923
3	28.616	962	29.736
4	25.041	1379	18.162
5	26.647	978	27.236
6	26.262	988	26.575
7	23.552	916	25.717
9	21.506	852	25.248
10	23.570	838	28.135
11	22.594	1065	21.223
12	24.748	683	36.231
14	19.623	1229	15.973

Fuente: Pedro Córdova

Tabla 22: Análisis estadístico del módulo de elasticidad de caña guadúa de compresión paralela a la fibra.

<b>E Media =</b>		<b>25.525 GPa</b>
<b>Desviación estandar (S) =</b>		<b>5.453 GPa</b>
<b>Ek =</b>		<b>16.554 GPa</b>
<b>S/E Media =</b>		<b>0.214</b>

Fuente: Pedro Córdova.

Mediante los ensayos hemos determinado una resistencia última característica a la compresión de cana guadúa valorada en 39.58 MPa, lo que da igual a 403.61 kg/cm<sup>2</sup>. Este valor es muy importante, puesto que si se lo compara con la resistencia del hormigón común de 280 kg/cm<sup>2</sup>, podemos concluir que la caña guadúa es un material de construcción muy resistente, que es 1.44 veces más resistente a compresión que el hormigón común. Esto es muy positivo puesto que se obtiene mucha resistencia a muy bajo peso propio del material, lo que nos permite bajar la carga muerta en la estructura.

Se obtuvo las curvas esfuerzo-deformación unitaria de doce muestras sometidas a compresión paralela a la fibra; de estas curvas podemos concluir que la caña guadúa sometida a compresión paralela a la fibra se comporta como un material elástico. Calculamos su módulo de elasticidad al 50% de la carga última, resultando en 16554 MPa, el cual es aceptable comparándolo con el MOE del hormigón común, 24787 MPa.

Se obtuvieron resultados bastante uniformes para ser un material natural y primitivo cultivado y cosechado en haciendas sin ningún tipo de desarrollo tecnológico para mejorar la resistencia de la caña o darle uniformidad a los resultados finales obtenidos. Se deben seguir haciendo estudios para un mayor número de muestras. Un aspecto geométrico a destacar es que a medida que aumenta el espesor se aumenta la resistencia a la compresión.

## 7.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE TENSIÓN PARALELA A LA FIBRA

Tabla 23: Muestras de los resultados de los ensayos y cálculo del esfuerzo de tensión última de caña guadúa.

Muestra n	Espesor (cm)	Ancho (cm)	Area seccion (cm <sup>2</sup> )	P (kN)	$\sigma$ ult (MPa)
1	1.41	1.15	1.62	23.23	143.26
2	1.31	1.24	1.62	22.48	138.39
3	1.45	1.15	1.67	23.50	140.93
4	0.97	1.17	1.13	15.48	136.40
5	0.78	1.13	0.88	11.41	129.45
6	1.1	1.13	1.24	17.24	138.70
7	1.2	1.08	1.30	16.02	123.61
8	0.99	1.18	1.17	18.84	161.27
9	1.11	1.62	1.80	26.49	147.30
10	1.24	1.09	1.35	17.37	128.51
11	1.16	1.12	1.30	16.97	130.62
12	1.18	1.14	1.35	19.93	148.16

Fuente: Pedro Córdova.

Tabla 24: Análisis estadístico del esfuerzo de tensión última de caña guadúa.

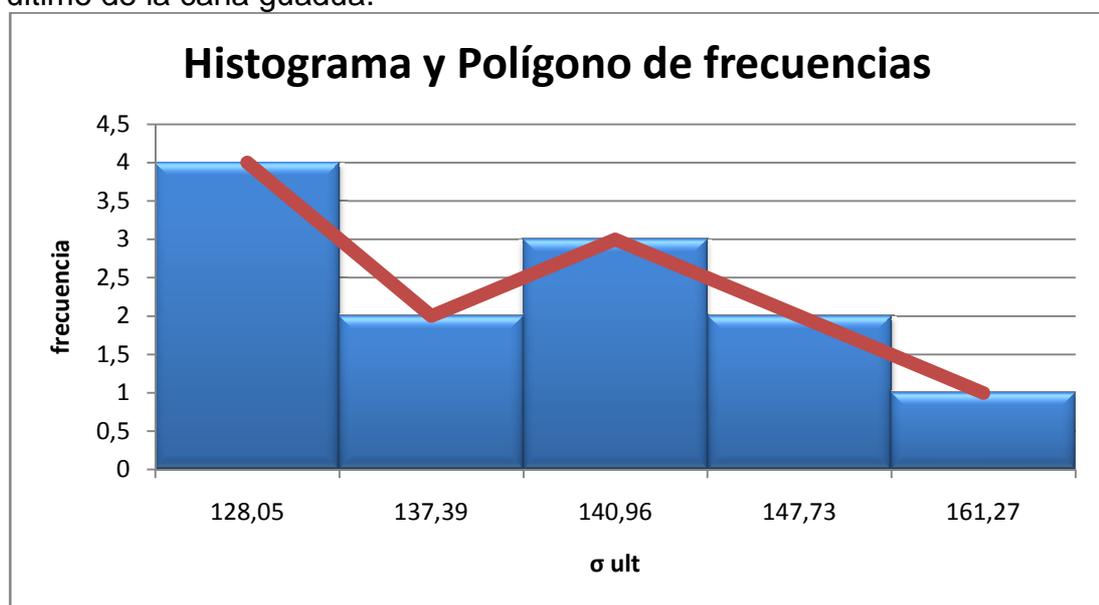
$\sigma$ ult Media =	138.884 Mpa
Desviacion estandar (S) =	10.383 Mpa
$\sigma_k$ =	121.803 Mpa
S/ $\sigma$ ult Media =	0.075

Fuente: Pedro Córdova.

Mediante ensayos se ha determinado la resistencia última característica a la tensión de la caña guadúa valorada en 121.8 MPa; es decir, 1241 kg/cm<sup>2</sup>, el cual comparándolo con el esfuerzo de fluencia del acero, 4200 kg/cm<sup>2</sup>, resulta en que es aproximadamente 3.4 veces menos fuerte que el acero a tensión, pero esto es muy positivo porque el acero es hecho de manera

industrial por normas de calidad, además que pasa por algunos procesos y necesita de mucha materia prima y mano de obra para poder ser elaborado, además se debe considerar que en la caña guadua se obtiene una alta resistencia a la tracción con un bajo peso propio y además a un bajo costo.

Figura 105: Análisis estadístico del esfuerzo a tensión paralela a la fibra último de la caña guadúa.



Fuente: Pedro Córdoba.

Se obtuvo las curvas esfuerzo-deformación unitaria de diez muestras sometidas a tensión paralela a la fibra; de estas curvas podemos concluir que la caña guadúa sometida a tensión paralela a la fibra se comporta como un material elástico. Calculamos su módulo de elasticidad al 50% de la carga última, resultando en 10497 MPa, el cual es muy bajo comparándolo con el MOE del acero, 206010 MPa. El acero cuando está sometido a tensión con una carga igual a 121.8 MPa, sufre una deformación unitaria igual a 0.00059, mientras que cuando la caña guadúa está sometida a su carga característica última a tensión, 121.8 MPa, sufre una deformación unitaria igual a 0.011, lo que quiere decir que la caña sufre mayor

deformación para la misma carga. Por esta razón se debe prestar mucha atención a las deformaciones cuando se vaya a diseñar estructuras de caña guadúa, puesto que van a sufrir muchas deformaciones cuando soporten cargas excesivamente pesadas. En la determinación del MOE se obtuvo una gran variedad de valores dispersos.

Tabla 25: Cálculo del módulo de elasticidad de caña guadúa sometida a tensión paralela a la fibra.

Muestra n	0.5 $\sigma$ ult (MPa)	$\mu\epsilon$ (0.5 $\sigma$ ult)	E = (0.5 $\sigma$ ult)/( $\epsilon$ (0.5 $\sigma$ ult) ) (GPa)
1	71.631	5042	14.206
2	69.195	4774	14.495
3	70.465	4236	16.635
4	68.200	5440	12.537
6	69.348	3313	20.930
7	61.806	2297	26.910
8	80.637	3373	23.910
10	64.257	3482	18.452
11	65.309	4586	14.242
12	74.078	3400	21.788

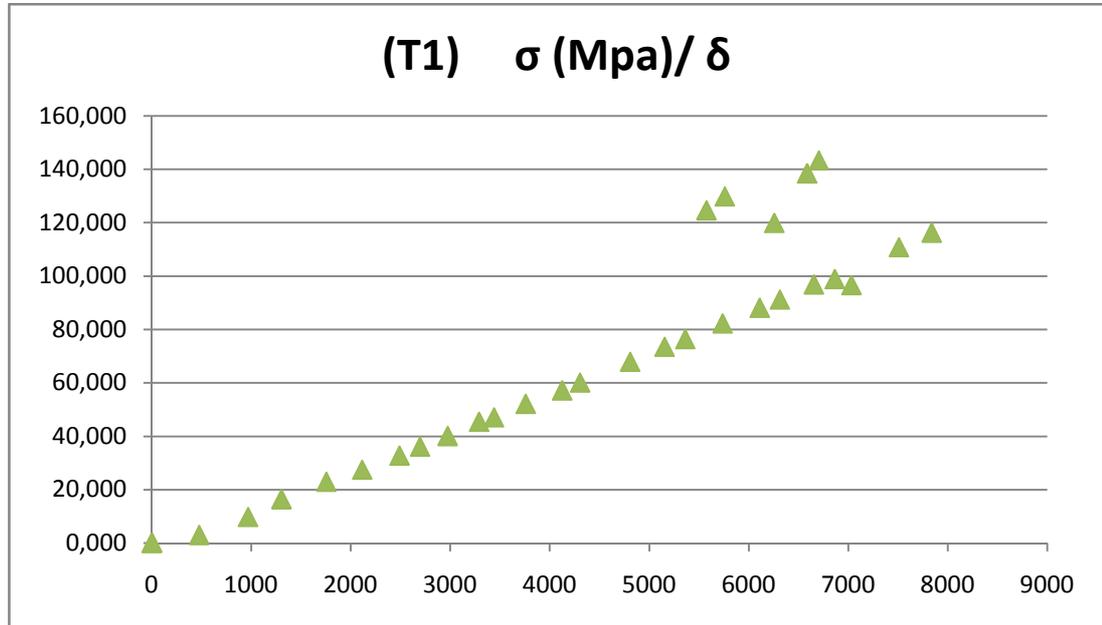
Fuente: Pedro Córdova.

Tabla 26: Análisis estadístico del módulo de elasticidad de caña guadúa de tensión paralela a la fibra.

E Media =		<b>18.410 GPa</b>
Desviación estandar (S) =		<b>4.811 GPa</b>
Ek =		<b>10.497 GPa</b>
S/E Media =		<b>0.261</b>

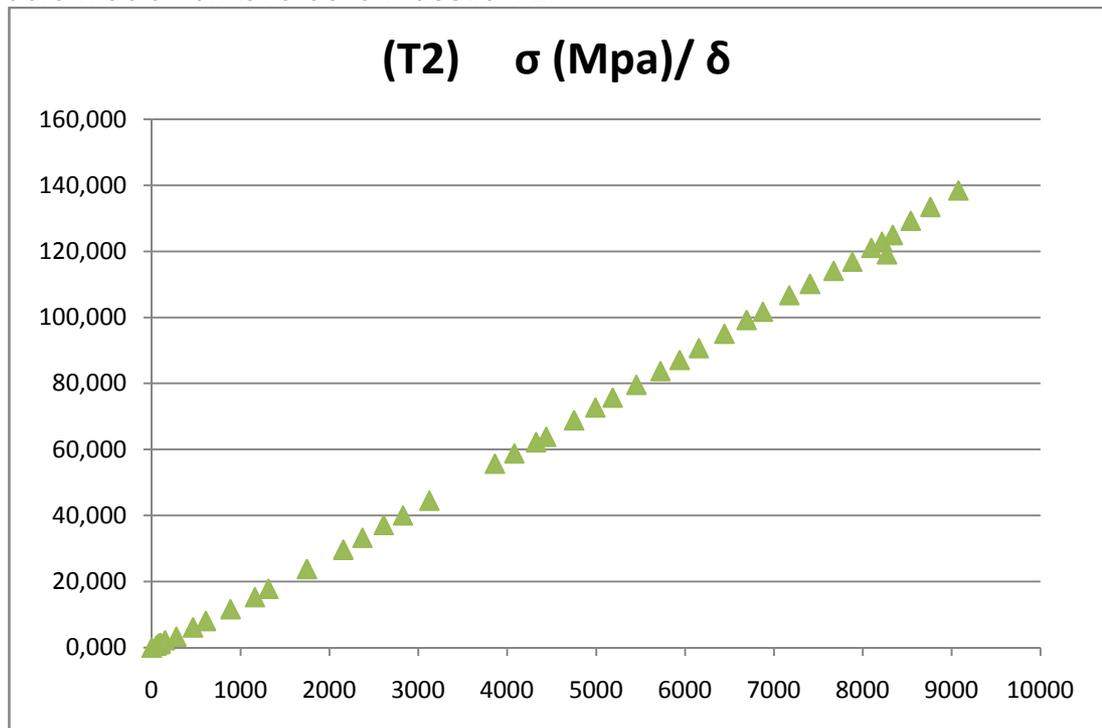
Fuente: Pedro Córdova.

Figura 106: Curva del esfuerzo de tensión paralela a la fibra vs. la deformación unitaria de la muestra T1.



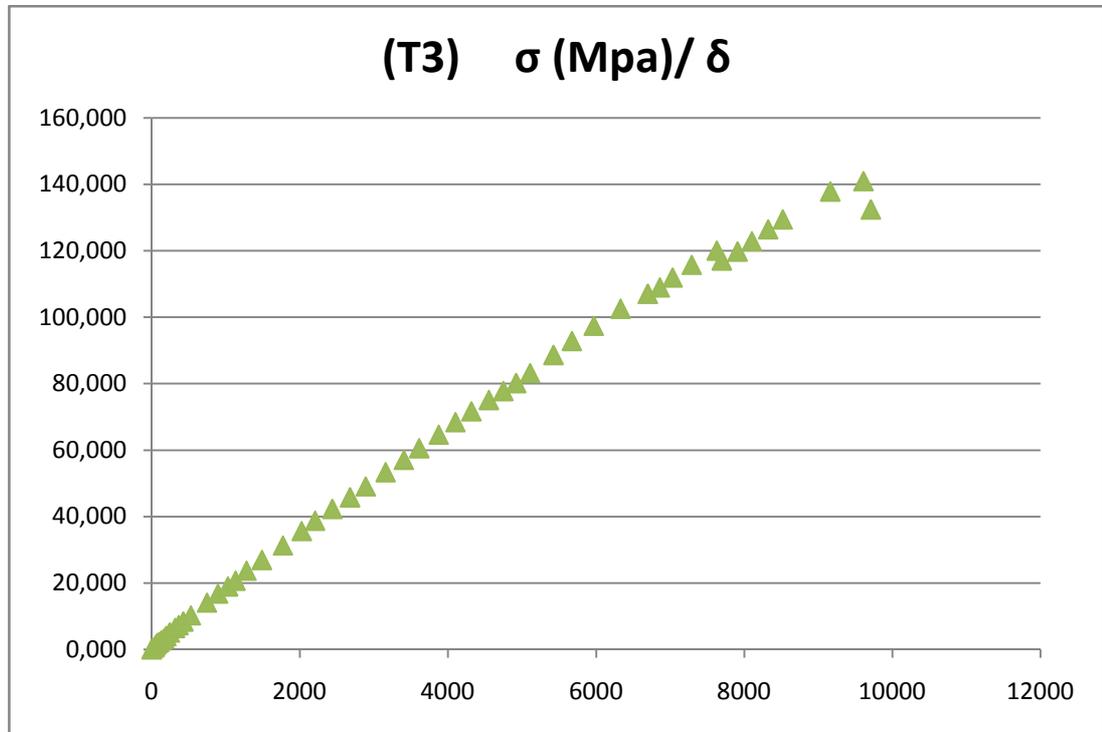
Fuente: Pedro Córdoba.

Figura 107: Curva del esfuerzo de tensión paralela a la fibra vs. la deformación unitaria de la muestra T2.



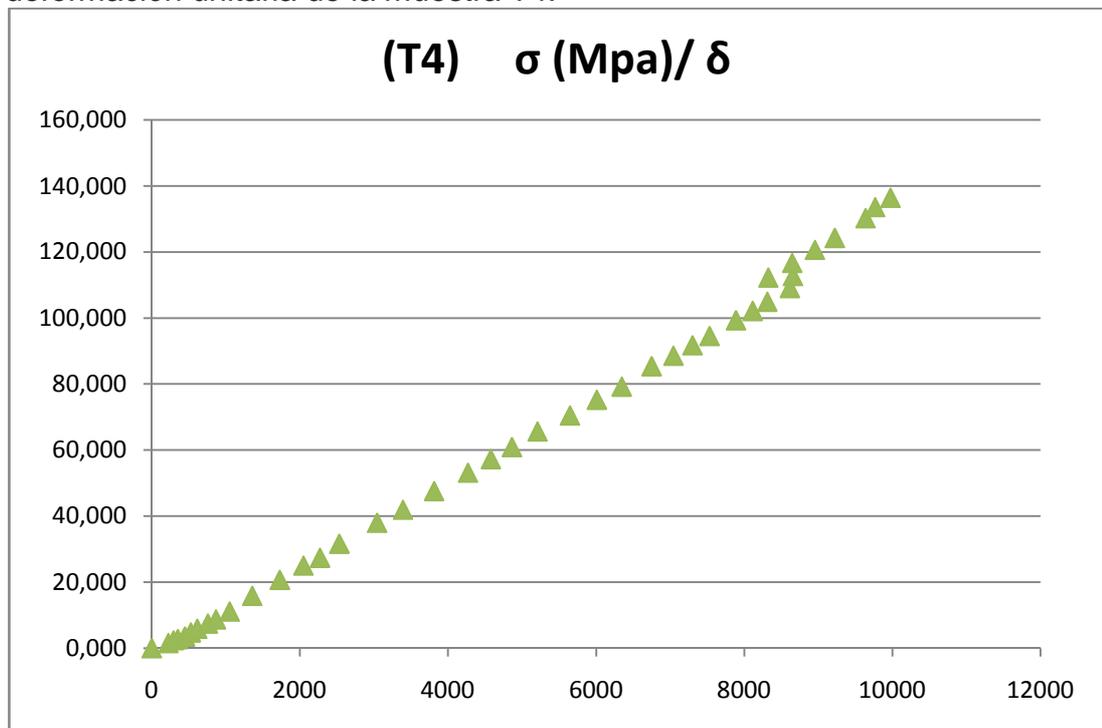
Fuente: Pedro Córdoba.

Figura 108: Curva del esfuerzo de tensión paralela a la fibra vs. la deformación unitaria de la muestra T3.



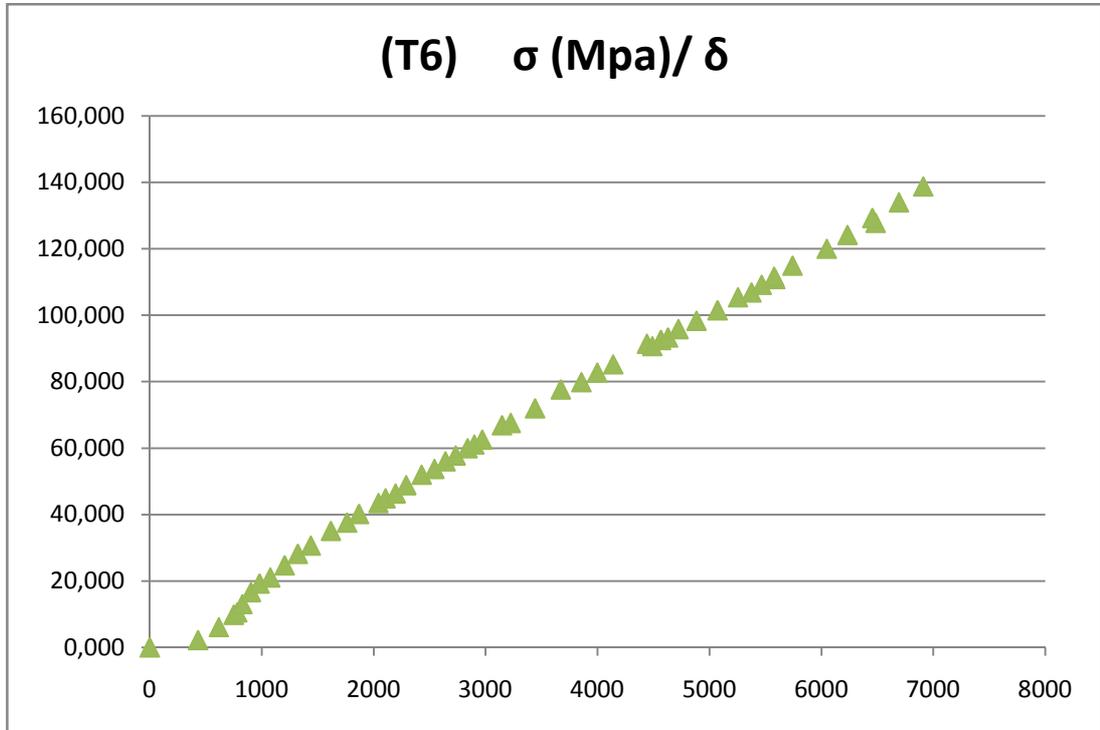
Fuente: Pedro Córdova.

Figura 109: Curva del esfuerzo de tensión paralela a la fibra vs. la deformación unitaria de la muestra T4.



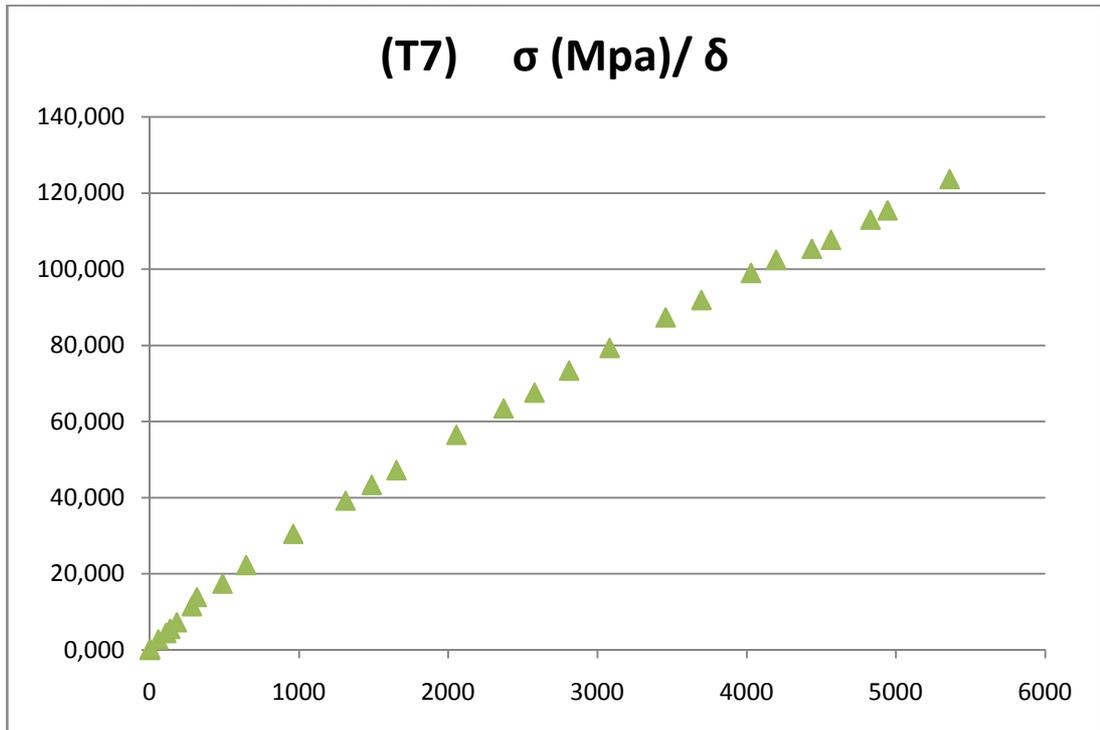
Fuente: Pedro Córdova.

Figura 110: Curva del esfuerzo de tensión paralela a la fibra vs. la deformación unitaria de la muestra T6.



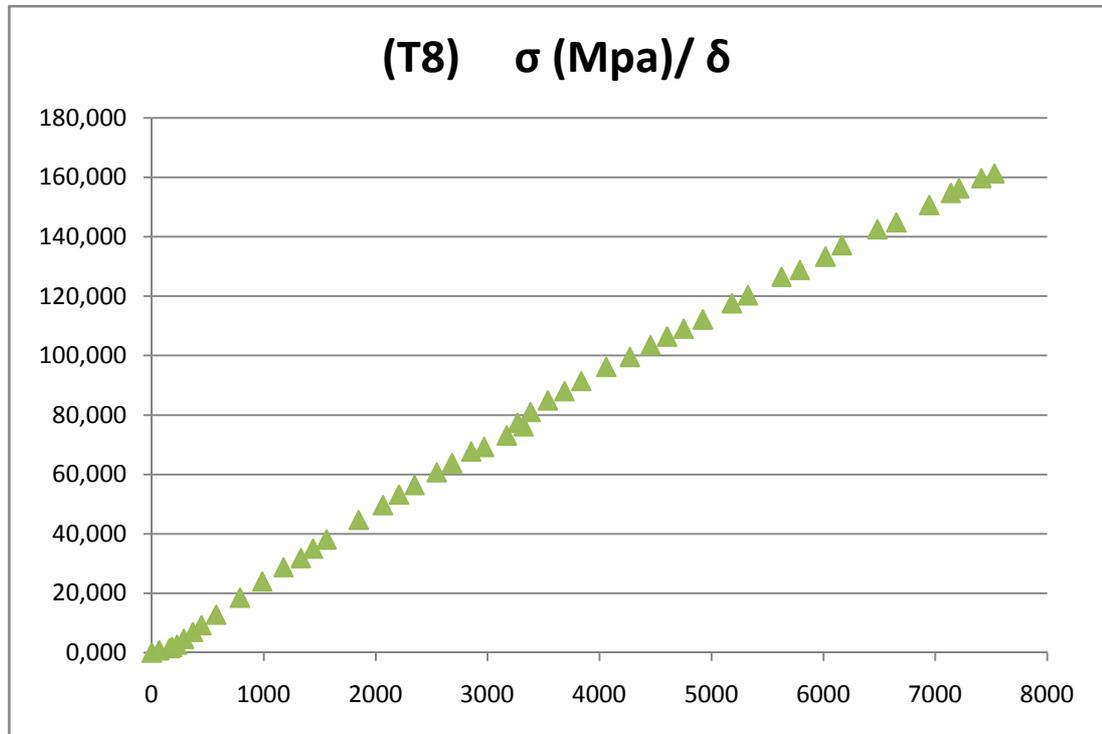
Fuente: Pedro Córdova.

Figura 111: Curva del esfuerzo de tensión paralela a la fibra vs. la deformación unitaria de la muestra T7.



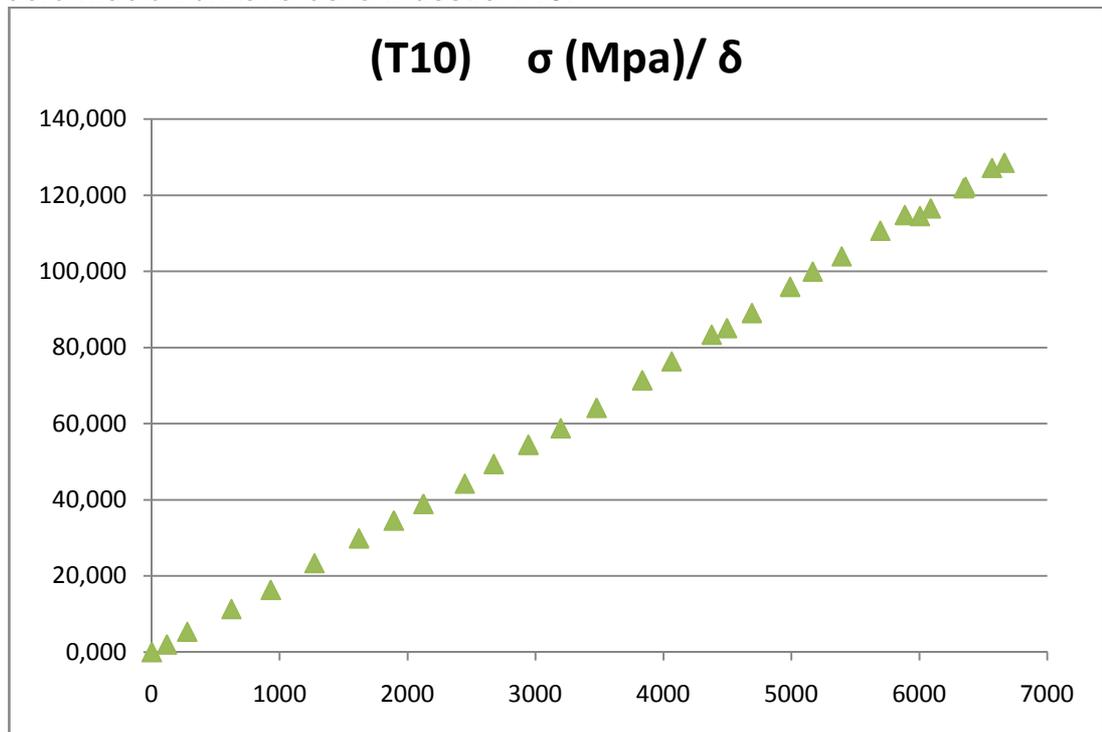
Fuente: Pedro Córdova.

Figura 112: Curva del esfuerzo de tensión paralela a la fibra vs. la deformación unitaria de la muestra T8.



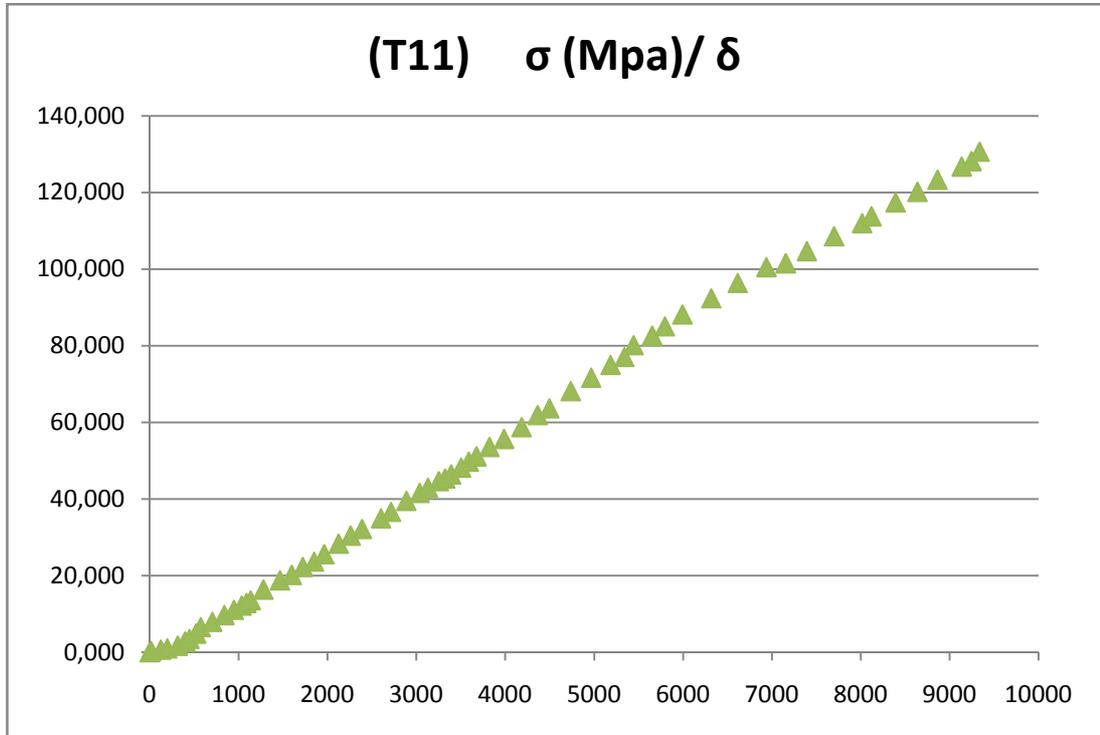
Fuente: Pedro Córdova.

Figura 113: Curva del esfuerzo de tensión paralela a la fibra vs. la deformación unitaria de la muestra T10.



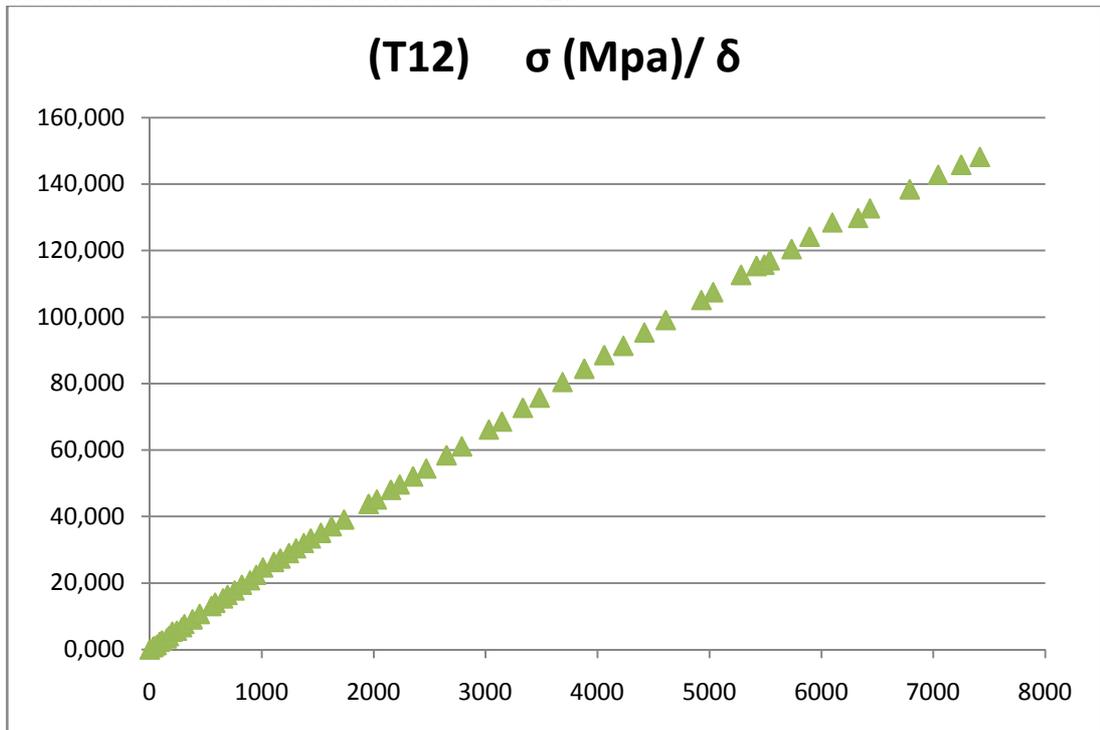
Fuente: Pedro Córdova.

Figura 114: Curva del esfuerzo de tensión paralela a la fibra vs. la deformación unitaria de la muestra T11.



Fuente: Pedro Córdoba.

Figura 115: Curva del esfuerzo de tensión paralela a la fibra vs. la deformación unitaria de la muestra T12.



Fuente: Pedro Córdoba.

## 7.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE FLEXIÓN

Tabla 27: Propiedades geométricas de las muestras de caña guadúa para el ensayo de flexión.

Muestra n	D ext 1 (cm)	D int 1 (cm)	Esp 1 (cm)	Dm 1 (cm)	Esp/Dext 1	I 1 (cm <sup>4</sup> )
1	11.83	8.22	1.81	10.025	0.1530	737.30
2	10.73	8.95	0.94	9.84	0.0876	335.72
3	11.9	9.11	1.62	10.505	0.1361	646.27
4	10.06	8	0.81	9.03	0.0805	301.70
5	11.57	9.09	1.17	10.33	0.1011	544.50
6	11.3	9.1	1.15	10.2	0.1018	463.74
7	10.98	8.37	1.44	9.675	0.1311	472.56
8	11.19	8.09	1.38	9.64	0.1233	559.38
9	11.32	8.19	1.73	9.755	0.1528	585.18
10	10.04	8.46	0.83	9.25	0.0827	247.33

Fuente: Pedro Córdova.

Tabla 28: Propiedades geométricas de las muestras de caña guadúa para el ensayo de flexión.

Muestra n	D ext 2 (cm)	D int 2 (cm)	Esp 2 (cm)	Dm 2 (cm)	Esp/Dext 2	I 2 (cm <sup>4</sup> )
1	10.9	8.68	1.11	9.79	0.1018	414.27
2	11.7	8.88	1.54	10.29	0.1316	614.62
3	11.78	9.41	1.09	10.595	0.0925	560.38
4	10.84	9.23	0.84	10.035	0.0775	321.51
5	11.62	9.64	1.03	10.63	0.0886	471.03
6	11.48	7.3	2	9.39	0.1742	713.18
7	11.18	9.4	0.9	10.29	0.0805	383.65
8	10.28	8.45	1.14	9.365	0.1109	297.94
9	9.74	7.84	0.96	8.79	0.0986	256.33
10	11.68	9.09	1.3	10.385	0.1113	578.43

Fuente: Pedro Córdova.

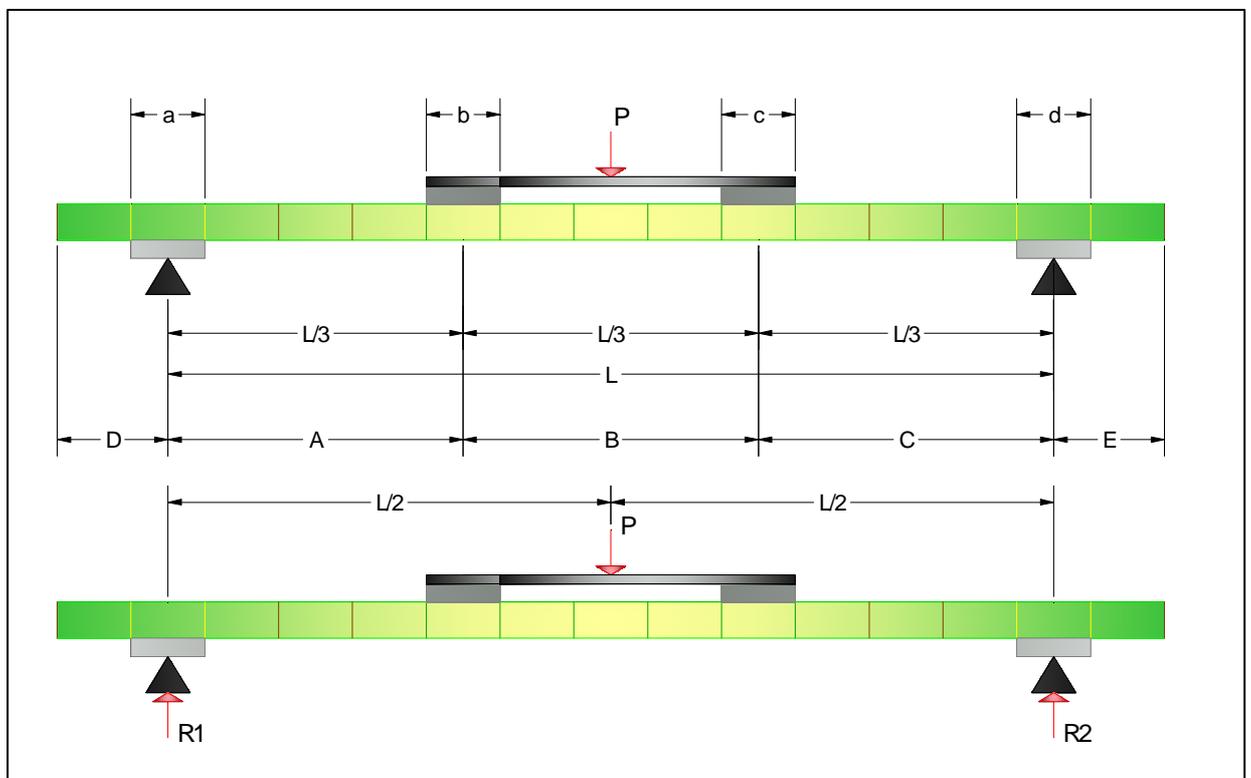
Se midió cada una de las propiedades en ambos extremos de la muestra de caña guadúa que se iba someter al ensayo de flexión. En las muestras se puede determinar la variación que existe en estas propiedades de un extremo a otro.

Tabla 29: Propiedades geométricas de las muestras de caña guadúa para el ensayo de flexión.

Muestra n	S Internudo (cm)	Imperfeccion V	Longitud (m)	Peso (kg)	I m (cm4)	y m (cm)	Dm (cm)	Esp/Dext	L/Dm
1	26.075	0.00732	3.8	15.355	575.78	5.6825	9.9075	0.127	0.384
2	31.25	0.00248	4.065	13.315	475.17	5.6075	10.065	0.110	0.404
3	29	0.00534	3.65	14.29	603.32	5.92	10.55	0.114	0.346
4	37.625	0.00511	3.72	7.186	311.60	5.225	9.5325	0.079	0.390
5	27.125	0.00841	3.78	12.28	507.76	5.7975	10.48	0.095	0.361
6	27.625	0.00410	4	15.117	588.46	5.695	9.795	0.138	0.408
7	26.75	0.00437	3.87	10.771	428.10	5.54	9.9825	0.106	0.388
8	27.625	0.00903	3.7	12.672	428.66	5.3675	9.5025	0.117	0.389
9	23.875	0.00665	3.76	10.87	420.76	5.265	9.2725	0.126	0.406
10	27.1875	0.00379	3.8	12.518	412.88	5.43	9.8175	0.097	0.387

Fuente: Pedro Córdova.

Figura 116: Esquema del ensayo de flexión en una muestra de caña guadúa.



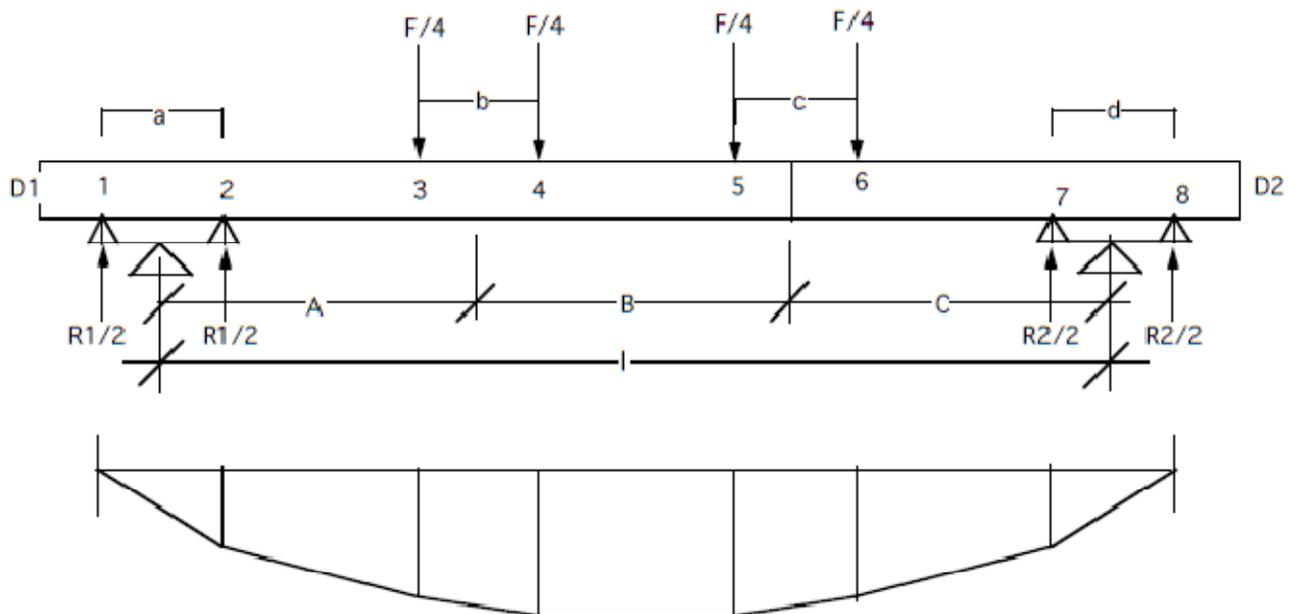
Fuente: Pedro Córdova.

Tabla 30: Longitudes de las luces libres de las muestras de caña guadúa para el ensayo de flexión.

Muestra n	A (m)	B (m)	C (m)	D (m)	E (m)	a (m)	b (m)	c (m)	d (m)
1	0.97	1.39	0.98	0.21	0.28	0.23	0.26	0.32	0.34
2	1.21	1.36	0.89	0.42	0.22	0.39	0.32	0.38	0.27
3	0.8	1.45	1	0.23	0.22	0.33	0.31	0.27	0.25
4	1.14	1.11	0.76	0.4	0.32	0.39	0.38	0.37	0.37
5	0.69	1.72	0.97	0.16	0.27	0.2	0.26	0.32	0.32
6	1.25	1.32	0.99	0.25	0.19	0.23	0.25	0.24	0.33
7	0.86	1.6	1.03	0.15	0.22	0.2	0.25	0.33	0.32
8	0.76	1.63	0.93	0.21	0.26	0.24	0.25	0.31	0.34
9	0.93	1.19	1.11	0.2	0.28	0.18	0.23	0.25	0.3
10	1.05	1.16	1.18	0.21	0.25	0.25	0.28	0.29	0.3

Fuente: Pedro Córdova.

Figura 117: Esquema del ensayo de flexión en una muestra de caña guadúa. Gráfico del momento flector.



$M3 = R1 * (A - (b/2))$ (KN-m)
$M4 = (R1 * (A + (b/2))) - ((P/4) * b)$ (KN-m)
$M5 = (R2 * (C + (c/2))) - ((P/4) * c)$ (KN-m)
$M6 = R2 * (C - (c/2))$ (KN-m)

Fuente: Prof. Dr. Ing. Antonio La Tegola.

Tabla 31: Resultados de los ensayos y cálculo del esfuerzo de flexión última de caña guadúa.

Muestra n	P (kN)	R1 (kN)	R2 (kN)	M3 (KN-m)	M4 (KN-m)	M5 (KN-m)	M6 (KN-m)	M max (KN-m)	$\sigma$ max (MPa)
1	13.95	6.996	6.954	5.877	6.789	6.812	5.702	6.812	67.226
2	12.35	5.604	6.746	5.884	6.689	6.113	4.722	6.689	78.942
3	16.55	8.784	7.766	5.666	7.106	7.697	6.717	7.697	75.526
4	6.25	2.730	3.520	2.594	3.038	2.748	2.024	3.038	50.938
5	12.35	6.687	5.663	3.744	4.680	5.412	4.587	5.412	61.790
6	11.5	5.330	6.170	5.996	6.610	6.159	5.368	6.610	63.971
7	10.9	5.715	5.185	4.201	4.948	5.296	4.485	5.296	68.538
8	13.8	7.253	6.547	4.606	5.557	6.034	5.074	6.034	75.551
9	8.7	4.592	4.108	3.743	4.299	4.529	4.046	4.529	56.674
10	7.55	3.920	3.630	3.567	4.136	4.263	3.757	4.263	56.061

Fuente: Pedro Córdova.

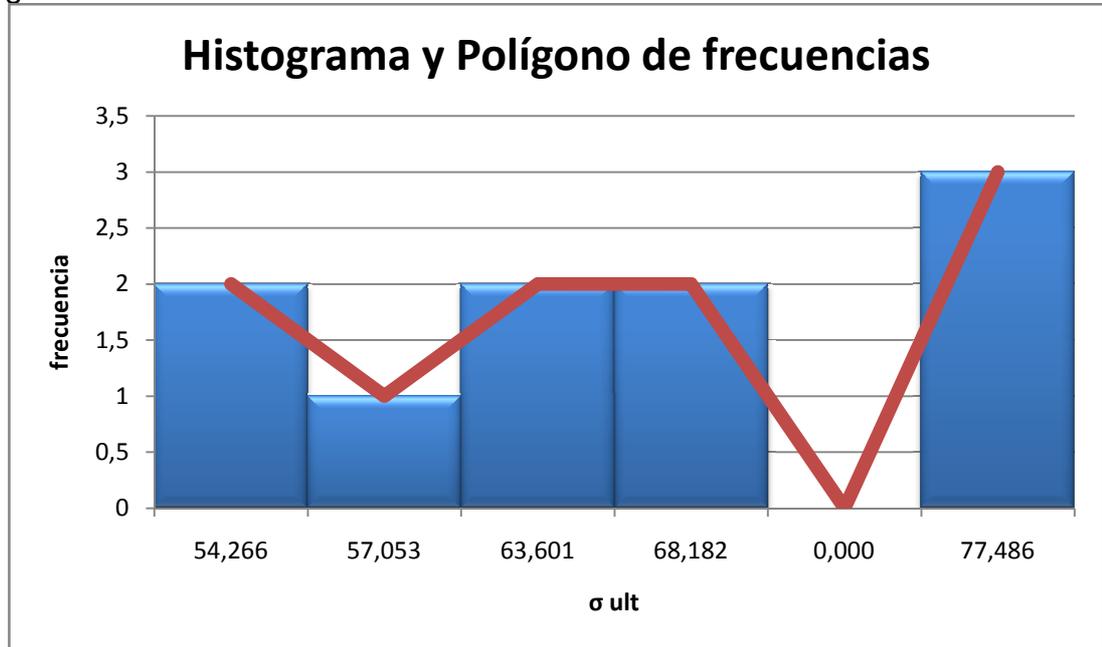
Tabla 32: Análisis estadístico del esfuerzo de flexión último de caña guadúa.

$\sigma$ ult Media =	65.521 Mpa
Desviacion estandar (S) =	9.366 Mpa
$\sigma_k$ =	50.114 Mpa
S/ $\sigma$ ult Media =	0.143

Fuente: Pedro Córdova.

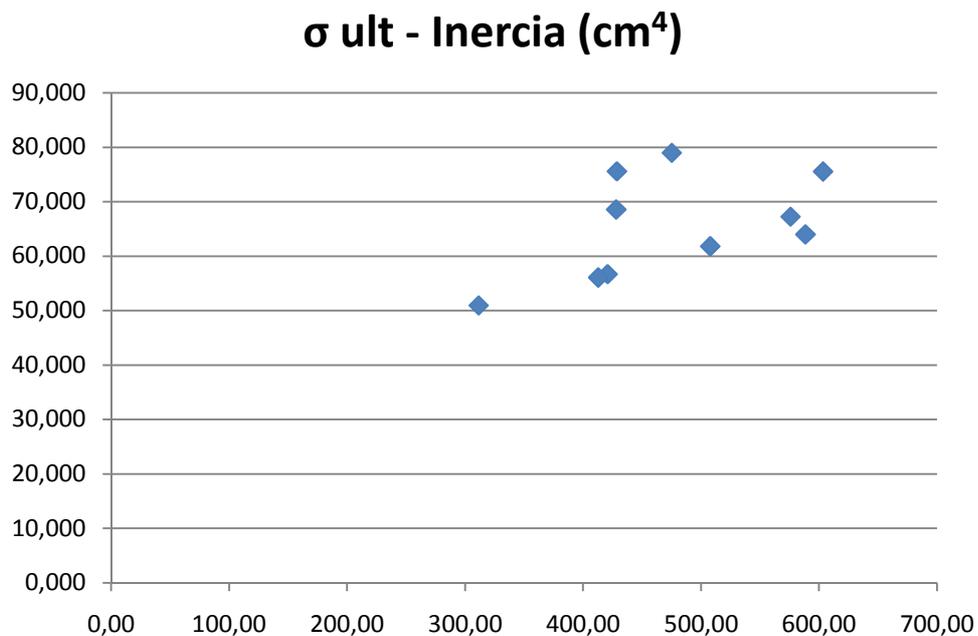
Se obtuvo una resistencia característica a la flexión última de 50.11 MPa, lo que es igual a 510 kg/cm<sup>2</sup>, y soportaron en promedio un momento flector de 55.3 Ton-m y una deflexión máxima promedio en el centro de 9.5 cm. Tiene una gran resistencia a la flexión pero se deforma mucho lo que impide cumplir con condiciones mínimas de servicio ( $L/400 = 4/200 = 0.02\%$ ) cuando está sometida a su máxima resistencia a la flexión. Cuando la caña está sometida a flexión y llega a 2 cm de deformación central, en promedio resiste un esfuerzo flector de 18.86 MPa, lo cual es aproximadamente 2.7 veces menos su máxima capacidad. Esto puede ayudarnos en la búsqueda de un factor de seguridad para el esfuerzo admisible.

Figura 118: Análisis estadístico del esfuerzo a flexión último de la caña guadúa.



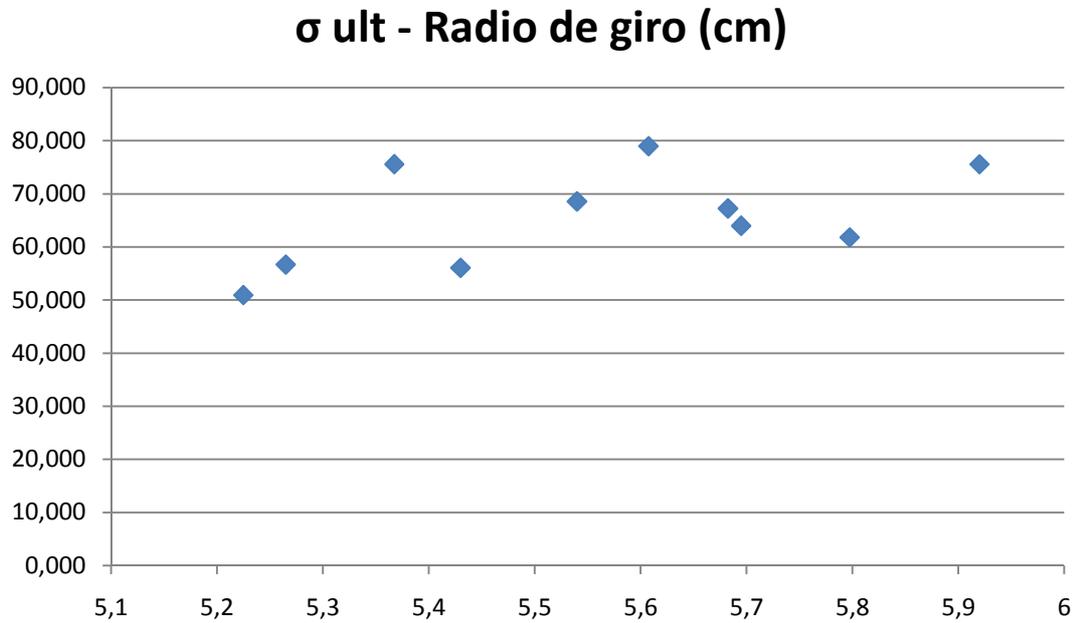
Fuente: Pedro Córdova.

Figura 119: Variación del esfuerzo de flexión último de la caña guadúa vs. la inercia. A medida que aumenta el valor de la inercia, aumenta el valor del esfuerzo flector máximo.



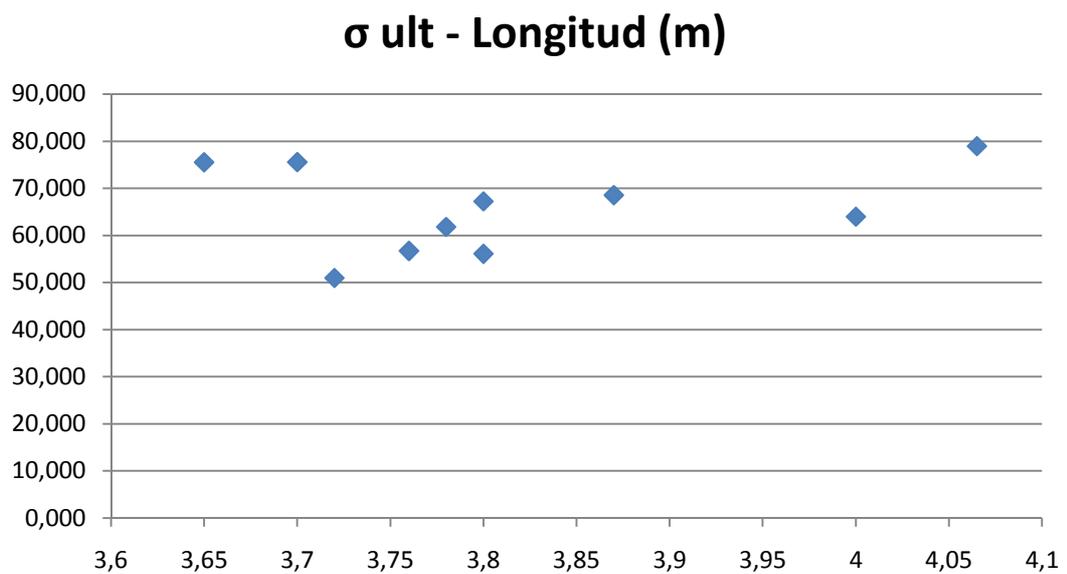
Fuente: Pedro Córdova.

Figura 120: Variación del esfuerzo de flexión último de la caña guadúa vs. el radio de giro. A medida que aumenta el valor del radio de giro, aumenta el valor del esfuerzo flector máximo.



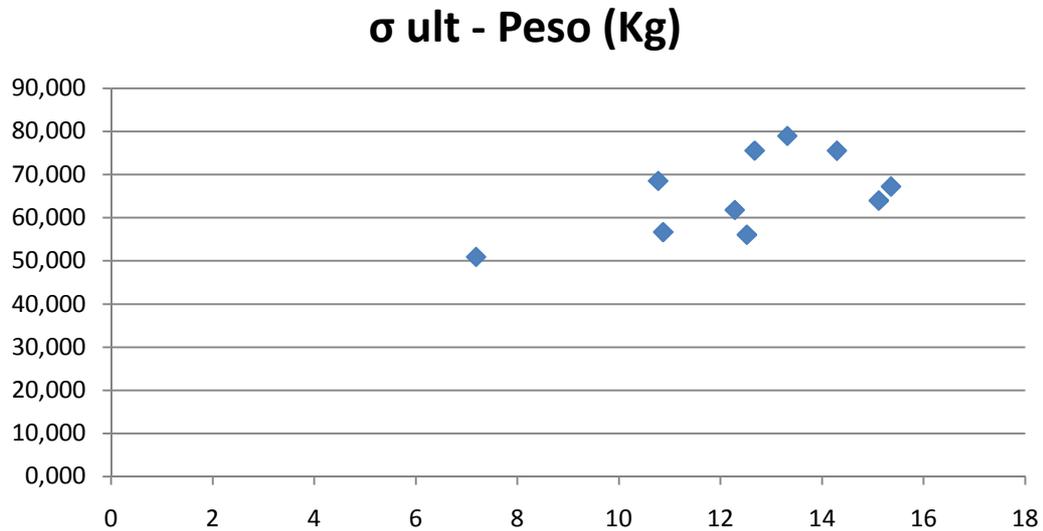
Fuente: Pedro Córdova.

Figura 121: Variación del esfuerzo de flexión último de la caña guadúa vs. la longitud de la muestra.



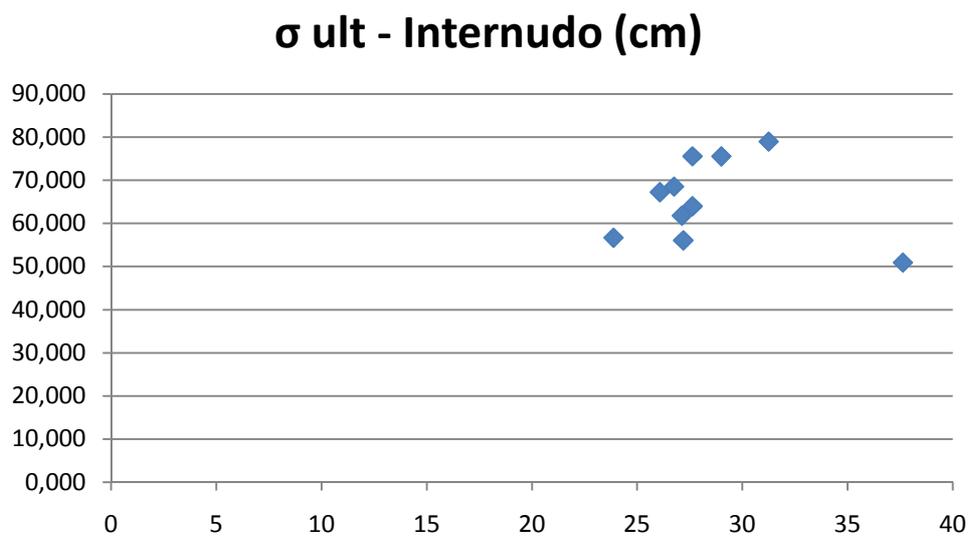
Fuente: Pedro Córdova.

Figura 122: Variación del esfuerzo de flexión último de la caña guadúa vs. el peso de la muestra. La tendencia parece concluir en que es muy probable que una caña pesada resista mucho más que una caña más liviana de aproximadamente las mismas dimensiones



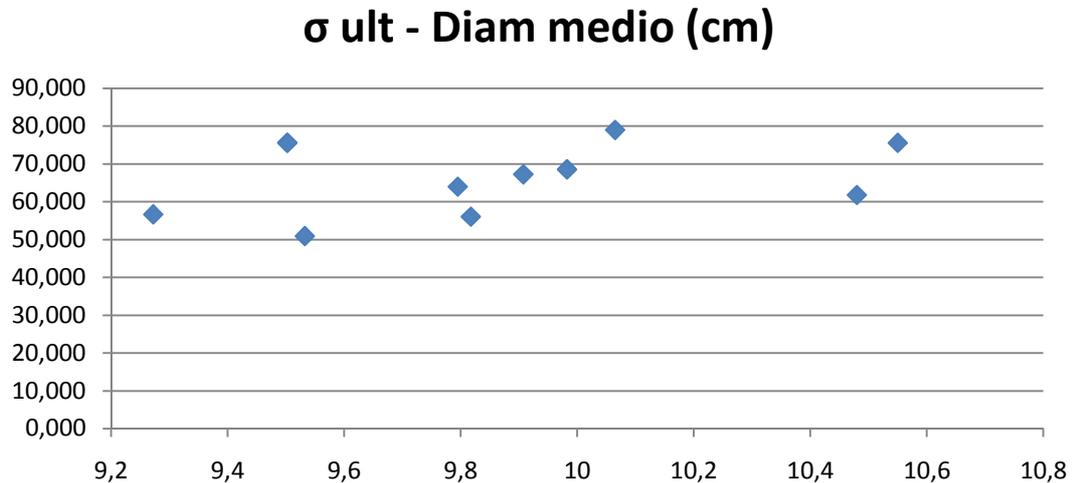
Fuente: Pedro Córdova.

Figura 123: Variación del esfuerzo de flexión último de la caña guadúa vs. el promedio de la separación de los nudos de la muestra. La tendencia parece concluir en que es muy probable que una caña guadúa con separación de entrenudos mayor pueda resistir más que una de separación menor de entrenudos.



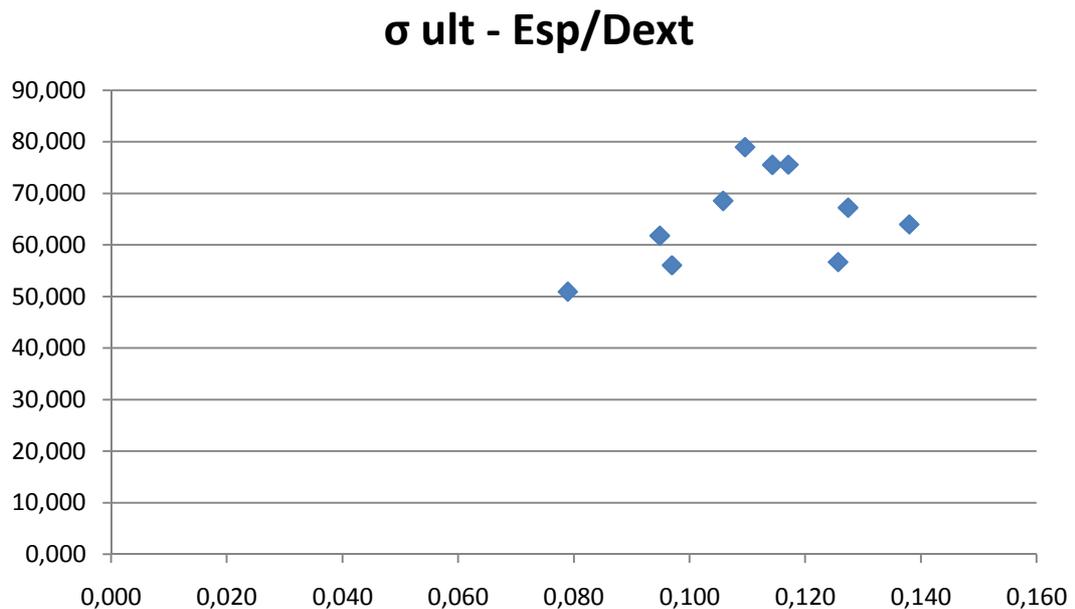
Fuente: Pedro Córdova.

Figura 124: Variación del esfuerzo de flexión último de la caña guadúa vs. el diámetro medio de la caña guadúa. A medida que la relación del diámetro medio aumenta, probablemente la resistencia a la flexión de la caña guadúa aumentará.



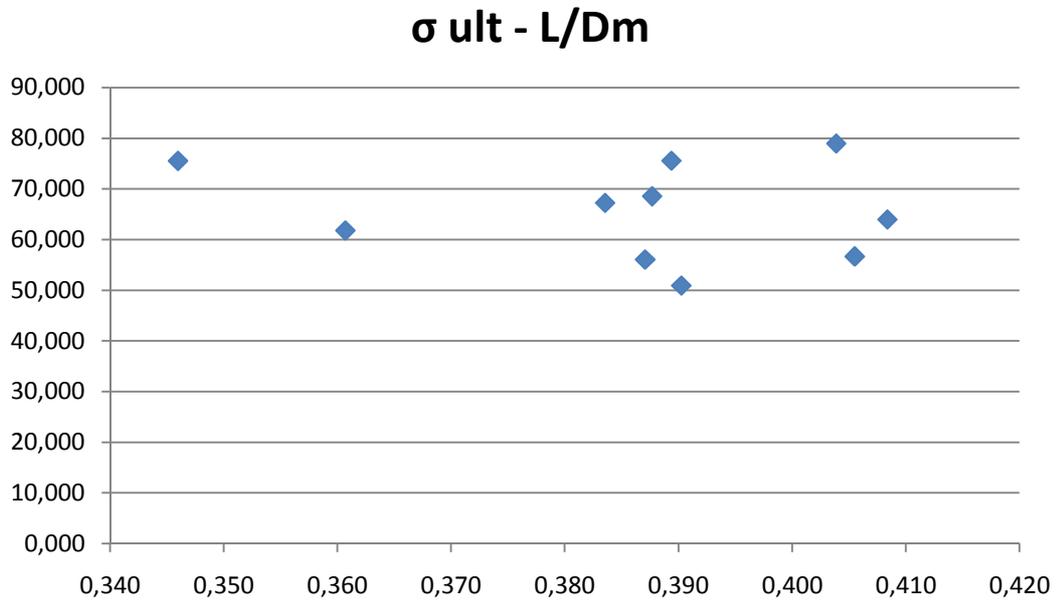
Fuente: Pedro Córdova.

Figura 125: Variación del esfuerzo de flexión último de la caña guadúa vs. la relación entre el espesor y el diámetro exterior de la caña guadúa. A medida que la relación entre el espesor y el diámetro exterior aumenta, probablemente la resistencia a la flexión de la caña guadúa aumentará.



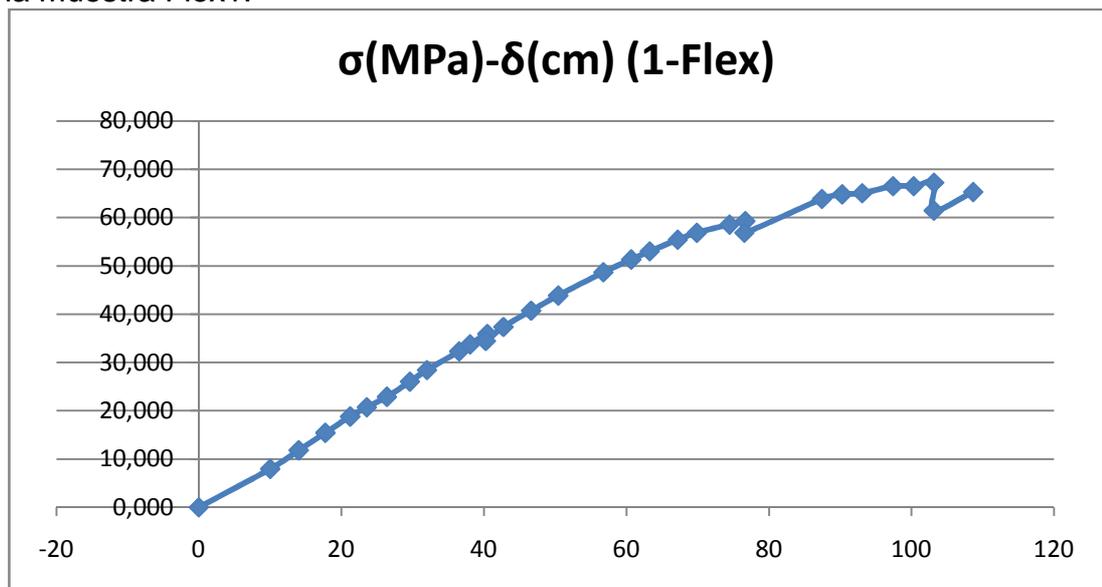
Fuente: Pedro Córdova.

Figura 126: Variación del esfuerzo de flexión último de la caña guadúa vs. la relación entre la longitud de la muestra y el diámetro medio de la caña guadúa.



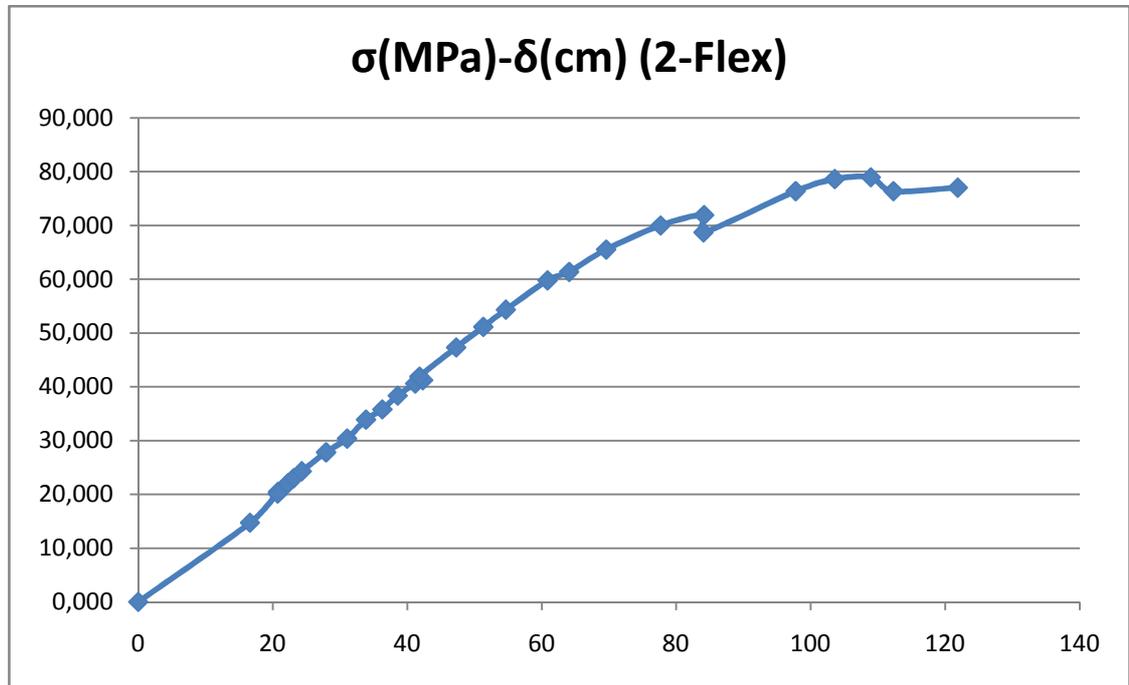
Fuente: Pedro Córdova.

Figura 127: Curva del esfuerzo de flexión vs. la deformación en el centro de la muestra Flex1.



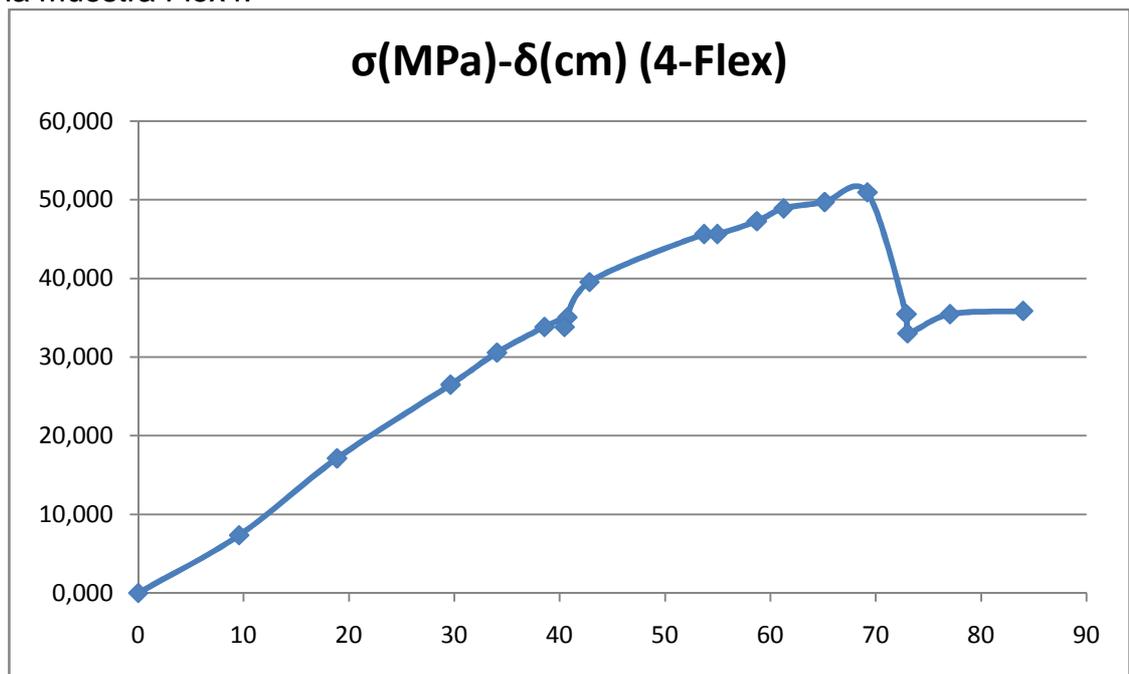
Fuente: Pedro Córdova.

Figura 128: Curva del esfuerzo de flexión vs. la deformación en el centro de la muestra Flex2.



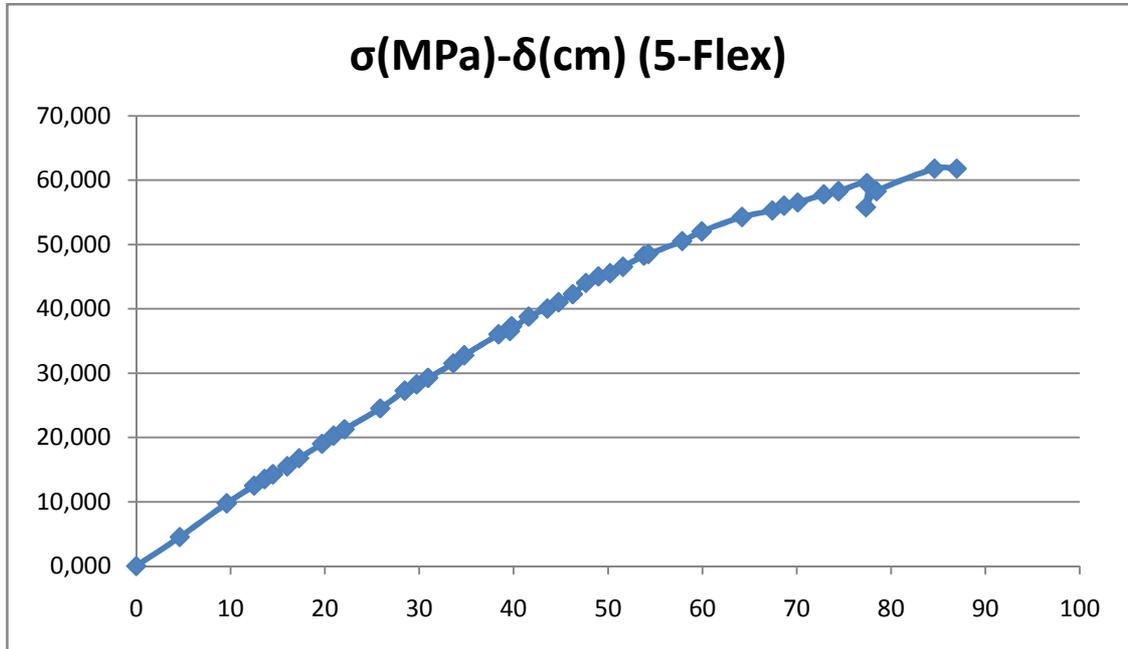
Fuente: Pedro Córdova.

Figura 129: Curva del esfuerzo de flexión vs. la deformación en el centro de la muestra Flex4.



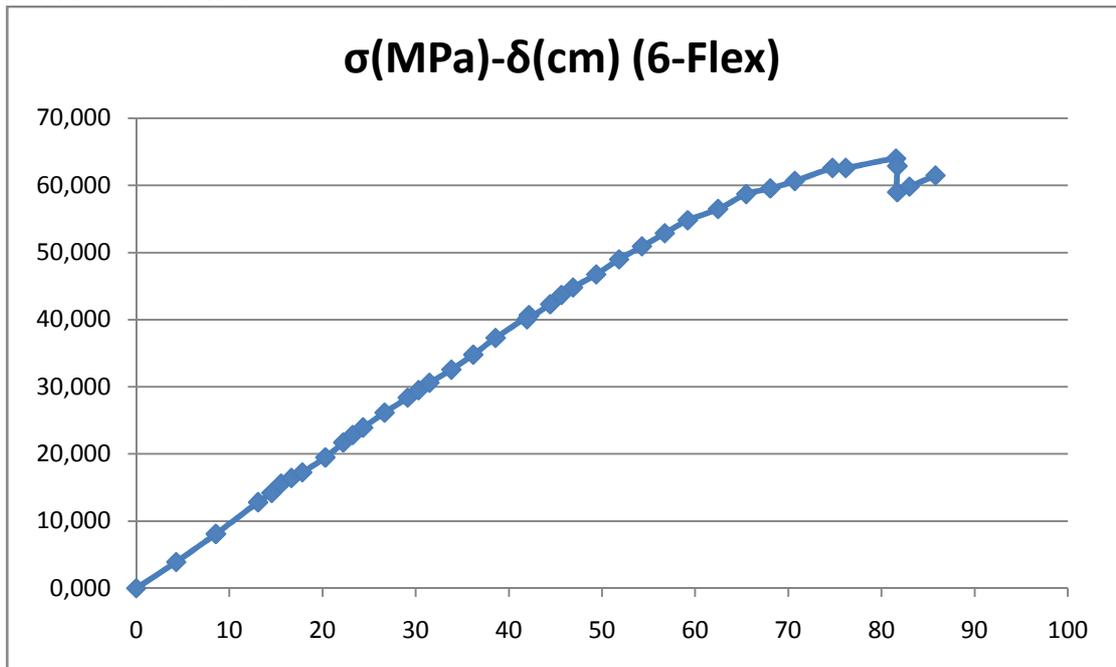
Fuente: Pedro Córdova

Figura 130: Curva del esfuerzo de flexión vs. la deformación en el centro de la muestra Flex5.



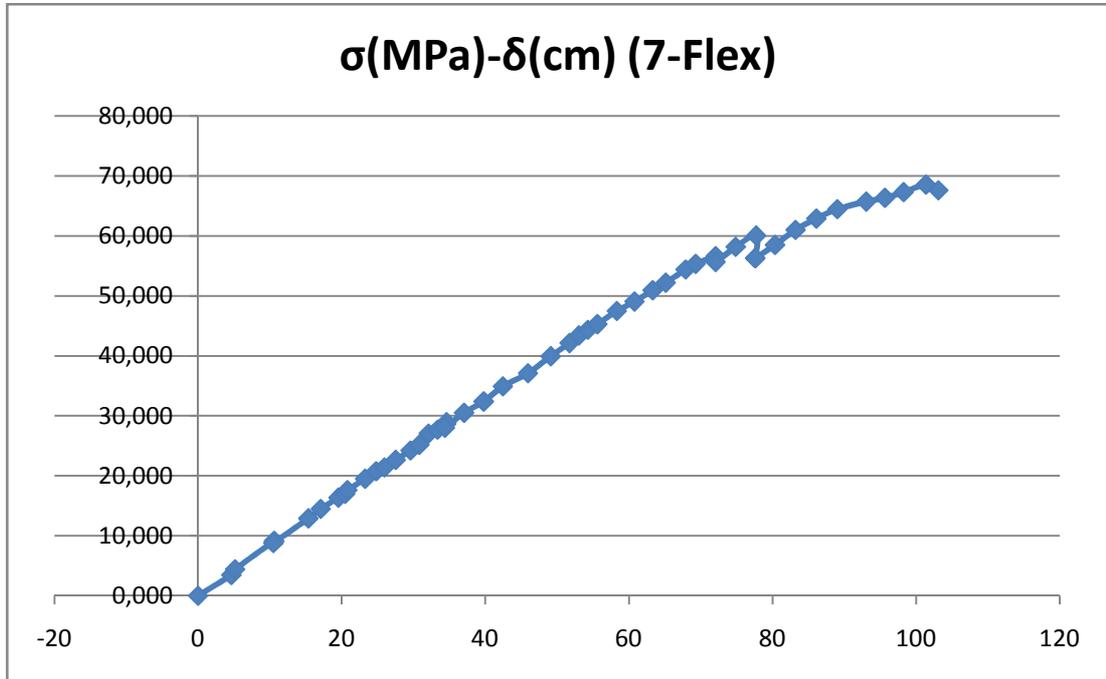
Fuente: Pedro Córdova.

Figura 131: Curva del esfuerzo de flexión vs. la deformación en el centro de la muestra Flex6.



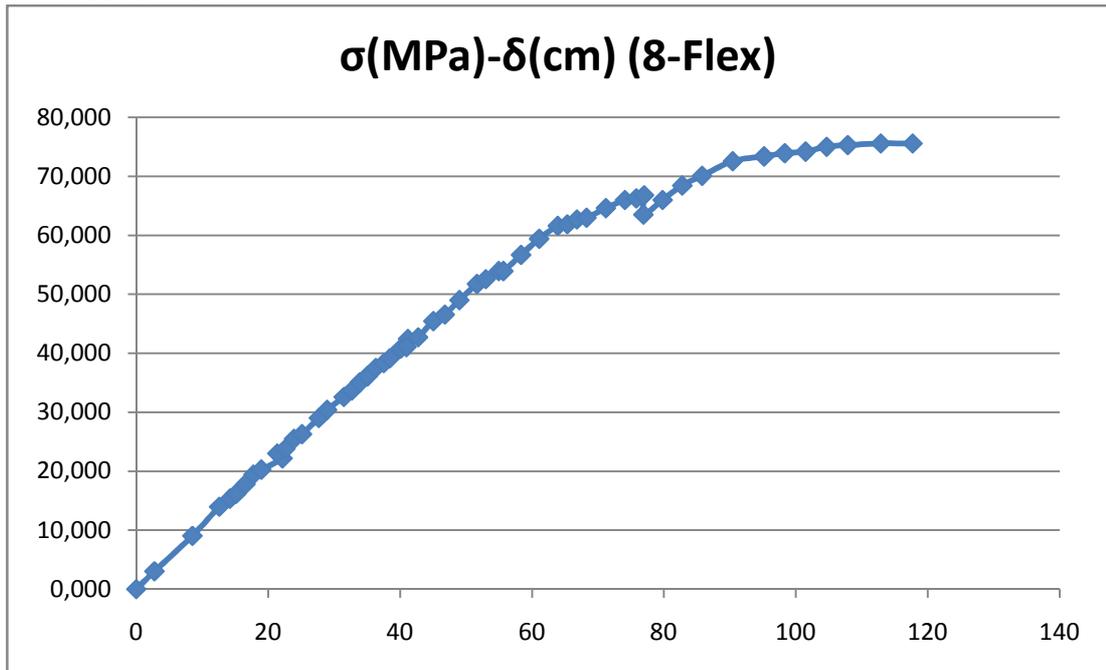
Fuente: Pedro Córdova.

Figura 132: Curva del esfuerzo de flexión vs. la deformación en el centro de la muestra Flex7.



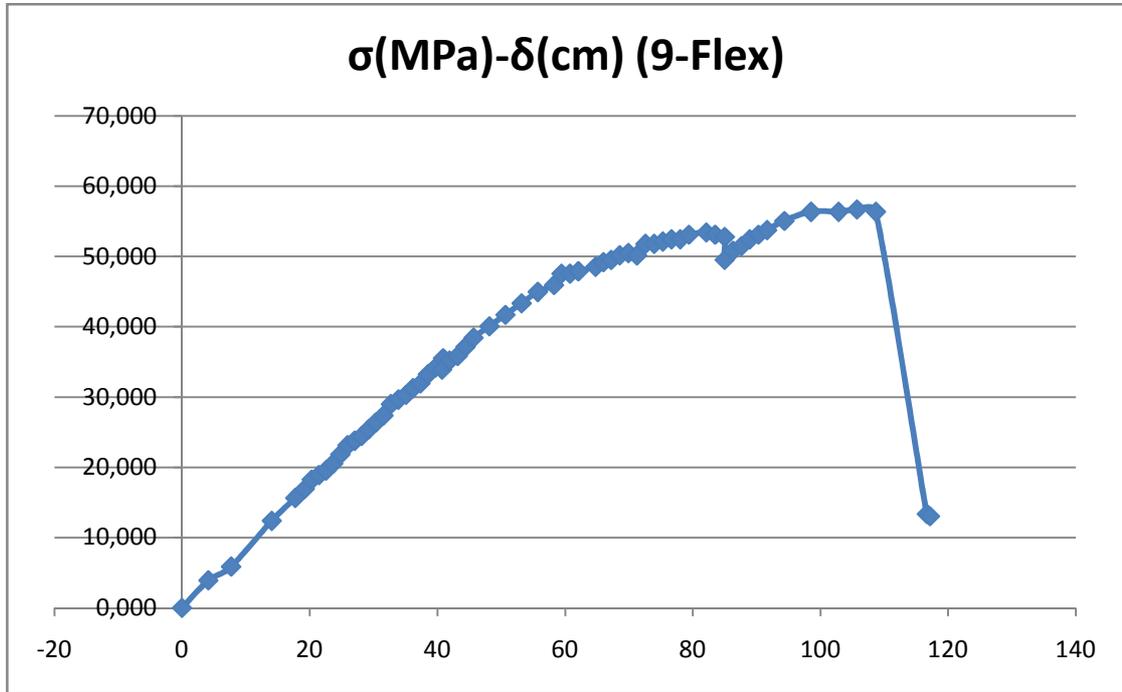
Fuente: Pedro Córdoba.

Figura 133: Curva del esfuerzo de flexión vs. la deformación en el centro de la muestra Flex8.



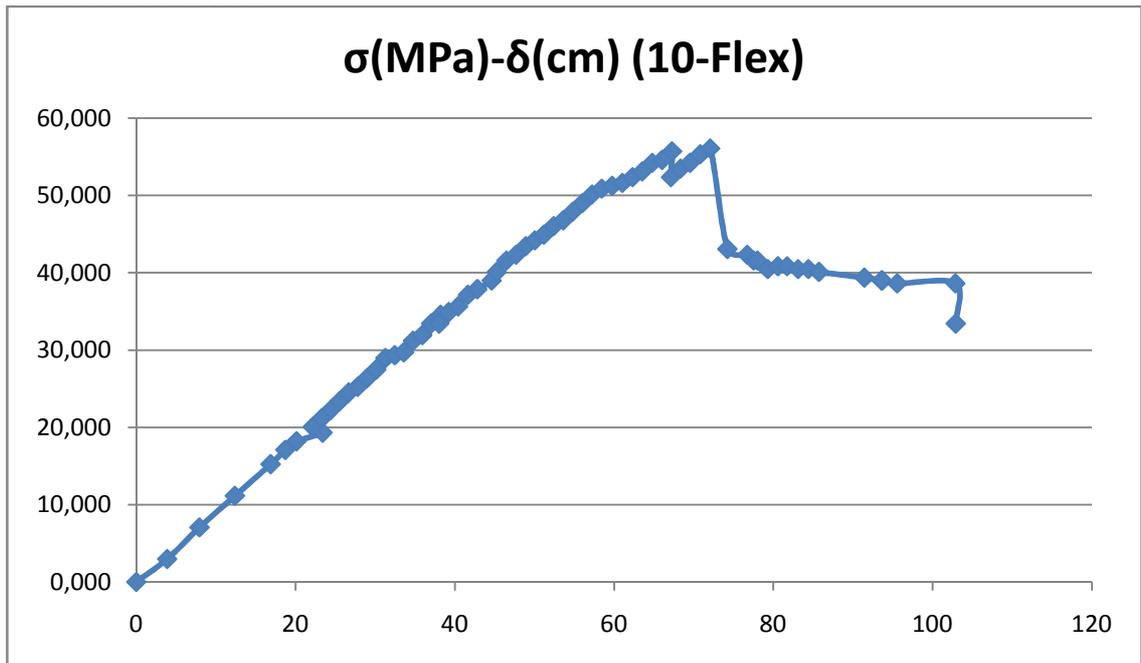
Fuente: Pedro Córdoba.

Figura 134: Curva del esfuerzo de flexión vs. la deformación en el centro de la muestra Flex9.



Fuente: Pedro Córdova.

Figura 135: Curva del esfuerzo de flexión vs. la deformación en el centro de la muestra Flex10.



Fuente: Pedro Córdova.

Tabla 33: Cálculo del módulo de elasticidad último de caña guadúa sometida a flexión. Método 1.

Muestra n	Pult (N)	(A+B+C) (mm)	$\delta_{\max}$ centro (mm)	I (mm <sup>4</sup> )	Eult (GPa)
1	13950	3340	103.16	5757838.56	<b>15.53</b>
2	12350	3460	108.90	4751666.22	<b>17.54</b>
3	16550	3250	94.07	6033233.88	<b>17.77</b>
4	6250	3010	69.19	3116043.77	<b>14.03</b>
5	12350	3380	86.95	5077620.38	<b>19.17</b>
6	11500	3560	81.56	5884626.52	<b>19.19</b>
7	10900	3490	101.39	4281021.62	<b>18.94</b>
8	13800	3320	117.68	4286611.17	<b>17.77</b>
9	8700	3230	105.71	4207552.97	<b>11.70</b>
10	7550	3390	72.08	4128773.58	<b>17.54</b>

Fuente: Pedro Córdova.

Tabla 34: Análisis estadístico del módulo de elasticidad último de caña guadúa de flexión. Método 1.

Eult Media =		<b>16.917 Gpa</b>
Desviacion estandar (S) =		<b>2.451 GPa</b>
Eultk =		<b>12.886 GPa</b>
S/Eult Media =		<b>0.145</b>

Fuente: Pedro Córdova.

Tabla 35: Cálculo del módulo de elasticidad del 50% del esfuerzo último de caña guadúa sometida a flexión. Método 1.

Muestra n	0.5 P (N)	$\delta_{(0.5P)}$ centro (mm)	E <sub>(0.5P)</sub> (GPa)
1	6975	38.05	<b>21.05</b>
2	6175	41.17	<b>23.21</b>
3	8275	35.45	<b>23.57</b>
4	3125	29.63	<b>16.38</b>
5	6175	33.61	<b>24.80</b>
6	5750	33.83	<b>23.12</b>
7	5450	42.45	<b>22.62</b>
8	6900	36.29	<b>28.80</b>
9	4350	32.72	<b>18.90</b>
10	3775	31.30	<b>20.20</b>

Fuente: Pedro Córdova.

Tabla 36: Análisis estadístico del módulo de elasticidad del 50% del esfuerzo último de caña guadúa de flexión. Método 1.

<b>E<sub>(0.5P)</sub> Media =</b>	<b>22.265</b>	<b>GPa</b>
<b>Desviacion estandar (S) =</b>	<b>3.405</b>	<b>GPa</b>
<b>E<sub>(0.5P)</sub> k =</b>	<b>16.663</b>	<b>GPa</b>
<b>S/E<sub>(0.5P)</sub>Media =</b>	<b>0.153</b>	

Fuente: Pedro Córdova.

En este método se determinó el módulo de elasticidad mediante la fórmula,

$E = \frac{23(P)(L^3)}{1296(\delta)(I)}$ , que es válida para vigas simplemente apoyadas sometidas a flexión con dos cargas iguales colocadas simétricamente sobre la viga.

Tabla 37: Cálculo del módulo de elasticidad último de caña guadúa sometida a flexión. Método 2.

Muestra n	Pult (N)	Rlult (N)	A+(B/2) (m)	Mult centro (N-m)	x=A+(B/2) (m)	I (m4)	δmax centro (m)	Eult (GPa)
1	13950	6995.88	1.665	6800.52	1.665	0.00000576	0.1032	15.87
2	12350	5603.90	1.89	6392.37	1.89	0.00000475	0.1089	22.06
3	16550	8784.23	1.525	7396.58	1.525	0.00000603	0.0941	15.15
4	6250	2730.48	1.695	2893.79	1.695	0.00000312	0.0692	19.28
5	12350	6686.54	1.55	5053.63	1.55	0.00000508	0.0870	13.75
6	11500	5330.06	1.91	6385.41	1.91	0.00000588	0.0816	24.27
7	10900	5715.47	1.66	5127.68	1.66	0.00000428	0.1014	16.28
8	13800	7253.31	1.575	5800.47	1.575	0.00000429	0.1177	14.26
9	8700	4592.41	1.525	4415.18	1.525	0.00000421	0.1057	11.54
10	7550	3919.76	1.63	4199.72	1.63	0.00000413	0.0721	18.75

Fuente: Pedro Córdova.

Tabla 38: Análisis estadístico del módulo de elasticidad último de caña guadúa de flexión. Método 2.

<b>Eult Media =</b>	<b>17.121</b>	<b>GPa</b>
<b>Desviacion estandar (S) =</b>	<b>3.939</b>	<b>GPa</b>
<b>Eultk =</b>	<b>10.642</b>	<b>GPa</b>
<b>S/Eult Media =</b>	<b>0.230</b>	

Fuente: Pedro Córdova.

Este método está basado en el colorario de Mohr, a partir del método de la doble integración del momento flector en el punto de estudio de la viga determinar la deformación en ese punto; es decir,  $\delta(x) = \iint \frac{M(x)}{EI} (dx)$ . Para la configuración de nuestra viga simple con dos cargas iguales pero no ubicadas simétricamente sobre la viga tenemos:

$$\delta_{CENTRO}(x) = \frac{\frac{M(x^2)}{2} - M(A+B/2)(x)}{EI}, \text{ lo que resulta para nuestro estudio en el}$$

punto central de la viga:  $E = \frac{M((A+B/2)^2) - M(A+B/2)^2}{\delta I}$ , la cual será la fórmula que utilizaremos para nuestro estudio del módulo de elasticidad de la caña guadúa y compararemos el resultado con el método 1.

Tabla 39: Cálculo del módulo de elasticidad del 50% del esfuerzo último de caña guadúa sometida a flexión. Método 2.

Muestra n	0.5 P (N)	R1 (N)	$\delta_{(0.5P)} \text{ centro (m)}$	M centro (N-m)	E(0.5P) (GPa)
1	7000	3510.48	0.0381	3412.45	21.59
2	6350	2881.36	0.0412	3286.77	30.01
3	8275	2757.59	0.0355	1205.64	6.55
4	3250	1419.85	0.0296	1504.77	23.41
5	6300	3410.95	0.0336	2577.97	18.15
6	5850	2711.38	0.0338	3248.23	29.76
7	5550	2910.17	0.0424	2610.89	19.80
8	6850	3600.38	0.0363	2879.22	22.95
9	4450	2348.99	0.0327	2258.34	19.07
10	3900	2024.78	0.0313	2169.39	22.30

Fuente: Pedro Córdova.

Tabla 40: Análisis estadístico del módulo de elasticidad del 50% del esfuerzo último de caña guadúa de flexión. Método 2.

E(0.5P) Media =	21.360 GPa
Desviacion estandar (S) =	6.585 GPa
E(0.5P) k =	10.527 GPa
S/E(0.5P)Media =	0.308

Fuente: Pedro Córdova.

## 7.6 RESULTADOS PRODUCTO DE LOS ENSAYOS

Tabla 41: Resultados de las variables producto de los ensayos.

Variable	Resultado producto de los ensayos	Dimensiones
Resistencia última a la compresión de la caña guadúa	39.58	$\sigma_k = \text{MPa}$
Módulo de Elasticidad de compresión	16.55	$E_k = \text{GPa}$
Resistencia última a la tensión de la caña guadúa	121.80	$\sigma_k = \text{MPa}$
Módulo de Elasticidad de tensión	10.50	$E_k = \text{GPa}$
Resistencia última a la flexión de la caña guadúa	50.11	$\sigma_k = \text{MPa}$
Módulo de Elasticidad de flexión	10.53	$E_k = \text{GPa}$
Resistencia última al esfuerzo cortante de la caña guadúa	7.59	$\tau_k = \text{Mpa}$

Fuente: Pedro Córdova.

## **8: CONCLUSIONES:**

Del análisis hecho a las propiedades geométricas de la caña guadúa se resalta que cuando se tiene un diámetro externo grande, se tendrá un diámetro interior mayor, un espesor mayor, una longitud de entrenudo menor. Además con un espesor de la pared de la caña guadúa mayor se tendrá una relación entre el diámetro exterior y la longitud del entrenudo mayor, una relación entre el diámetro interior y el diámetro exterior menor, y una relación entre el espesor de la pared de la caña y el diámetro exterior de la caña mayor.

Del análisis estadístico de las relaciones geométricas de la caña guadúa se determina la relación entre el espesor de la pared de la caña y el diámetro exterior de la caña (Esp/Dext), como la relación más importante, y que más ayuda puede dar en la determinación del resto de propiedades geométricas. Es muy importante que esta relación geométrica sea alta para poder tener una caña con propiedades geométricas adecuadas.

En las tablas 10 y 11 se realizó el cálculo de las propiedades físicas y estructurales para el valor característico de la relación Esp/Dext. Estas son las propiedades mínimas que va a tener una caña guadúa, en las que se tiene un fratil de 5% de probabilidad, que las propiedades puedan ser menor que las que se determinan en las tablas. Es decir tenemos un 95% de seguridad de que las propiedades geométricas, físicas y estructurales van a ser mayores.

Del análisis estadístico hecho a la imperfección natural que se realizó a las cañas guadúas se concluye que esta puede no afectar su comportamiento como columna esbelta, ni crear momentos de segundo orden, aunque se

recomienda utilizar cañas con una imperfección natural de la no verticalidad mucho menor al 2%.

En el análisis estadístico hecho a los resultados producto de los ensayos de resistencia al esfuerzo cortante de cañas guadúa se concluye que, ésta es la propiedad mecánica más débil que tienen las cañas guadúa. Además se obtuvieron resultados bastantes uniformes en esta propiedad.

De los resultados de las pruebas de la resistencia al corte, se determina que a medida que el espesor de la pared de la caña y el área sometida a corte son mayores, mayor va a ser la resistencia al esfuerzo cortante que va a tener la caña guadúa. Así mismo, se determina que a medida que la relación  $E_{sp}/D_{ext}$  es mayor, la resistencia al esfuerzo cortante va a ser mayor.

En el análisis estadístico hecho a los resultados producto de los ensayos de resistencia al esfuerzo de compresión de cañas guadúa, se concluye que, ésta es una propiedad mecánica muy resistente que tienen éstas, comparándola con el resto de materiales que habitualmente se utilizan en construcción. Además se obtuvieron resultados bastantes uniformes en esta propiedad.

De los resultados de las pruebas de la resistencia a la compresión, se determina que a medida que el espesor de la pared de la caña, el diámetro exterior de la caña y el área sometida a compresión son mayores, mayor va a ser la resistencia al esfuerzo de compresión que va a tener la caña

guadúa. Así mismo, se determina que a medida que la relación  $E_{sp}/D_{ext}$  es mayor, la resistencia al esfuerzo de compresión va a ser mayor.

En el análisis estadístico hecho a los resultados producto de los ensayos de resistencia al esfuerzo de tensión de cañas guadúa, se concluye que, ésta es la propiedad mecánica más resistente que tienen las cañas guadúa, comparándola con el resto de sus propiedades mecánicas. Por lo que se puede concluir que la falla a tensión en un elemento estructural de caña guadúa es la que menos probabilidad tiene de ocurrir.

Si se compara la resistencia a la tensión de la caña guadúa con la resistencia a la tensión que tienen el resto de materiales que habitualmente se utilizan en construcción, se considera que es muy alta; es decir, la caña guadúa es un material muy apto para la construcción utilizando elementos estructurales sometidos a tensión. Además se obtuvieron resultados bastantes uniformes en esta propiedad.

Analizando los resultados de los módulos de elasticidad de compresión y tensión se concluye que la caña guadúa puede ser considerada como un material con un comportamiento elástico-frágil de forma bi-lineal.

Para tener una resistencia mayor en elementos estructurales sometidos a tensión se debe tener un área mayor de las fibras sometidas a tensión; es decir, un mayor espesor de la pared de la caña guadúa y un mayor diámetro externo de ésta.

En el análisis estadístico hecho a los resultados, producto de los ensayos de resistencia al esfuerzo de flexión de cañas guadúa, se concluye que, cuando se aplican cargas muy altas perpendicularmente a una caña se la somete a altas deformaciones, debido a su alta flexibilidad, lo que ocasiona que la estructura no pueda cumplir los requisitos de serviciabilidad cuando está sometida a su máxima resistencia a la flexión. Este hecho es una desventaja, pero una ventaja a la vez; es decir, es frustrante el tener que diseñar estructuras de caña guadúa a flexión sometidas a cargas muy bajas en comparación a su capacidad de resistencia real, pero esto es positivo porque se cuenta con la seguridad que las cargas no harán fallar a la estructura.

De la comparación de los diferentes resultados entre las diferentes pruebas que se realizaron, como se esperaba, la falla de flexión está dominada por la resistencia a la compresión. Para otros materiales se tiene:  $R_{flex}=1.2R_{Comp}$ , en el caso de los ensayos de este trabajo resultó:  $50.11/39.58 = 1.27$ . Por supuesto, estos resultados se basan en un bajo número de muestras.

Para obtener una resistencia mayor a la flexión en las cañas guadúa se tiene que contar con un momento de inercia bajo y un radio de giro alto, esto se puede lograr teniendo una relación entre el espesor y el diámetro exterior ( $Esp/D_{ext}$ ) alta, puesto que la inercia depende directamente del espesor y del diámetro exterior, y el radio de giro es igual a la mitad del diámetro exterior.

## **9: RECOMENDACIONES:**

Para futuras investigaciones se debe tomar en cuenta para un análisis estadístico de las propiedades geométricas de la caña guadúa, la influencia de la conicidad, es decir, la forma de cono truncado que tiene ésta por sus cambios de diámetro a lo largo de ésta.

Revisar una extensa cantidad de libros, asesorarse por diversos expertos en el tema. En el periodo de elaboración de este trabajo, el autor, Pedro Córdova, asistió a las Conferencias Magistrales sobre el Bambú organizadas por el departamento de investigación de Ecomateriales de la UCSG, y al Conversatorio sobre Construcción Sostenible con Bambú organizado por Inbar y Camicon en Quito.

En el estudio de la flexión en cañas guadúa, se puede hacer ensayos con cargas permanentes durante periodos largos, para determinar las deformaciones a largo plazo que sufre con cargas altas que no la lleven a su falla última instantáneamente.

La resistencia a compresión obtenida en este trabajo de investigación está limitada por el tamaño de las muestras, deberían hacerse estudio de compresión y de flexo-compresión a muestras de cañas guadúa largas para determinar su comportamiento y resistencia como columnas.

## **10: BIBLIOGRAFÍA:**

Cely, L., Hernández, W., Gutiérrez, O. (2012). Caracterización de la Guadúa Angustifolia Kunth cultivada en Miraflores (Boyacá) de acuerdo con la NSR-10. -

<http://virtual.uptc.edu.co/revistas2013f/index.php/ingenieria/article/view/2118>

Chung, K., F., Chan, S., L. (2000). Technical Report No. 23: Design of Bamboo Scaffolds. INBAR & The Hong Kong Polytechnic University: Colour Max Commercial Printing Company Limited. -  
<http://www.inbar.int/publications/?did=117>.

Cooperación Colombo Alemana. (2005). Cartilla: Guía para Autoconstrucción utilizando La Guadúa como elemento principal.

Dávila, J., K. (2013). Evaluación del estado de conservación de la caña guadúa (Guadúa Angustifolia Kunth) en la cuenca alta de las riveras del río Portoviejo (Tesis de Ingeniero en Gestión Ambiental). UTPL, Portoviejo. 95pp. - <http://dspace.utpl.edu.ec//handle/123456789/6626>.

Gutierrez, J. (2000). Technical Report No. 19: Structural Adequacy of Traditional Bamboo Housing in Latin America. Costa Rica: Inbar. -  
<http://www.inbar.int/publications/?did=57>.

Gutiérrez, G., M. (2011). Factor de corrección por contenido de humedad para la resistencia a tensión paralela a la fibra de la guadúa Angustifolia Kunth / Correction factor by moisture content for the tensile strength parallel to the fiber of bamboo guadua Angustifolia Kunth. Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia. -  
<http://www.bdigital.unal.edu.co/6307/#sthash.DLQrCUS2.dpuf>.

Held, C., Manzano, I. (2003). Working Paper No. 51: El sector productivo y el mercado regional de la Guadúa en el Eje cafetero colombiano. Pereira y Freidburg: Inbar. - <http://www.inbar.int/publications/?did=135>.

Jayanetti, D., L., Folle, P., R. (1998). Technical Report No. 16: Bamboo in Construction: An Introduction. Inbar. - <http://www.inbar.int/publications/?did=93>.

Janssen, J. (2004). Norma ISO/22157-1:2004. Bamboo – Determination of physical and mechanical properties - Part 1: Requirements.

Janssen, J. (2004). Norma ISO/22157-2:2004. Bamboo – Determination of physical and mechanical properties – Part 2: Laboratory manual.

Janssen, J. (1991). Mechanical Properties of Bamboo. Eindhoven: Kluwer Academic Publishers.

Janssen, J. (2000). Technical Report No. 20: Designing and Building with Bamboo. Eindhoven: Inbar. - <http://www.inbar.int/publications/?did=58>.

Liese, Walter. (1998). Technical Report No. 18: The Anatomy of Bamboo Culms. Beijing: Inbar. - <http://www.inbar.int/publications/?did=52>.

Luna, P., Takeuchi, C., Granados, G., Lamus, F., Lozano, J. Revista Educación en Ingeniería. (2011). Issue 11, p66-75. 10p. METODOLOGÍA DE DISEÑO DE ESTRUCTURAS EN GUADUA ANGUSTIFOLIA COMO MATERIAL ESTRUCTURAL POR EL MÉTODO DE ESFUERZOS ADMISIBLES.

Luna, P., Lozano, J., Takeuchi, C. (2014). Determinación experimental de valores característicos de resistencia para Guadúa Angustifolia. Maderas.

Ciencia y tecnología, (AHEAD), 0-0. doi.org/10.4067/S0718-221X2014005000007.

Moreno, L., Osorio, L., Trujillo De los Ríos, E. (2006). Revista Científica Ingeniería y Desarrollo, No 20 (2006) <http://rcientificas.uninorte.edu.co/index.php/ingenieria/article/viewArticle/2797>.

Osorio, J., González, E., Cortés, E. (2010). La guadúa: fundamentos para el diseño de estructuras agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín, Medellín. ISBN 9789588256726 - <http://www.bdigital.unal.edu.co/10561/#sthash.Wn2PTuZ8.dpuf>.

Osorio, J., Vélez, J., Ciro, H. (2013). Estructura interna de la guadúa y su incidencia en las propiedades mecánicas. Dyna, 74(153). pp. 81-94. ISSN0012-7353. <http://www.bdigital.unal.edu.co/cgi/export/10907/#sthash.RbeeQwgg.dpuf>.

Poppens, R., Ubidia, J. (2005). Manual de Construcción: Vivir con la Guadúa. Quito: Minca.

Quispe, T. (2010). Elementos estructurales de bambú (guadua angustifolia) - tijeral y viga. - <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/436>.

Takeuchi, C., González, E. (2007). Resistencia a la compresión paralela a la fibra de la guadúa angustifolia y determinación del módulo de elasticidad. - <http://revistas.javeriana.edu.co/index.php/iyu/article/view/926/525>.

Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente. (2010). TÍTULO G: ESTRUCTURAS DE MADERA Y ESTRUCTURAS DE GUADUA CAPITULO G.12 ESTRUCTURAS DE GUADUA. -

<http://www.naturalbuildersworkshop.com/wp-content/uploads/2013/03/ESTRUCTURAS-DE-GUADUA.pdf>.

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento de Perú. (2011). Proyecto Normativo: Diseño y Construcción con Bambú. - [http://www.vivienda.gob.pe/popup/Documentos\\_pdf/Proyecto\\_Normativo\\_Bambu.pdf](http://www.vivienda.gob.pe/popup/Documentos_pdf/Proyecto_Normativo_Bambu.pdf).

Dietger Grosser, Walter Liese. (1971). On the Anatomy of Asian Bamboos, with Special Reference to Their Vascular Bundles.