

**DETERIORO MECÁNICO DE LA GUADUA ROLLIZA ANGUSTIFOLIA KUNTH
SOMETIDA A FACTORES ABIÓTICOS DE INTEMPERIE EN LA CIUDAD DE
BOGOTA, EN CONDICION NATURAL, RESPECTO A CUANDO SE APLICAN
RECUBRIMIENTOS**

I.C. CARLOS ORLANDO TORRES MESA

I.C. DANIEL AMADO ORDUÑA

**UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
MAESTRIA EN INFRAESTRUCTURA VIAL
BOGOTA
2019**

**DETERIORO MECÁNICO DE LA GUADUA ROLLIZA ANGUSTIFOLIA KUNTH
SOMETIDA A FACTORES ABIÓTICOS DE INTEMPERIE EN LA CIUDAD DE
BOGOTA, EN CONDICION NATURAL, RESPECTO A CUANDO SE APLICAN
RECUBRIMIENTOS**

I.C. CARLOS ORLANDO TORRES MESA

I.C. DANIEL AMADO ORDUÑA

**Trabajo de grado para optar al título de
Magister en Infraestructura Vial**

Director

Ing. MSc. Ferney Oswaldo Peña Rey

**UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
MAESTRIA EN INFRAESTRUCTURA VIAL
BOGOTA**

2019

NOTA DE ACEPTACIÓN

PRESIDENTE DE JURADO

JURADO

JURADO

Bogotá D.C, octubre de 2019

DEDICATORIO

Expreso mis más sinceras muestras de agradecimiento: A Dios y la Virgen por ser mi guía, a mi esposa Ana Silvia, mis hijos Cristian Fabián y Sebastián Felipe, mi madre Rosa María, por creer y confiar siempre en mí apoyándome en todas las decisiones tomadas en la vida.

Carlos Orlando Torres Mesa

Total, agradecimientos a Dios y mi familia, a mi padre Gildardo Amado, por ser mi motor en alcanzar este triunfo académicamente, a mi madre Flor Orduña, por creer en mí, por ser el constante apoyo que tuvo durante el desarrollo de mi Maestría, por su paciencia y comprensión. Finalmente, a mi hermano menor, espero ser un ejemplo a seguir para él.

Daniel Amado Orduña

AGRADECIMIENTO

Asimismo, deseo expresar un gran agradecimiento al Ingeniero Ferney Oswaldo Peña, director de mí Proyecto de grado de Maestría de Infraestructura Vial, por su orientación y apoyo en el desarrollo de esta investigación, por la confianza y el apoyo constante depositado en mi persona.

Carlos Orlando Torres Mesa

Al Ingeniero Ferney Peña, director del proyecto de grado, por transmitirnos todo su conocimiento para el desarrollo del trabajo de grado, de igual manera a mi compañero de grado el Ingeniero Carlos Torres, por ser un soporte de entendimiento y comprensión en el desarrollo del trabajo de grado.

Daniel Amado Orduña

RESUMEN

La Guadua Rolliza Angustifolia Kunth, se ve afectado por diferentes factores que pueden modificar su resistencia mecánica, entre los que se encuentran el factor de modificación por contenido de humedad y exposición a la radiación solar. Diferentes estudios han mostrado que la resistencia mecánica del material ante diferentes solicitaciones de carga disminuye a medida que aumenta su exposición a factores abióticos de intemperismo. Para realizar la investigación se tomaron cuarenta y ocho probetas de guadua rolliza Angustifolia Kunth, las cuales se vieron sometidas al deterioro natural generado por la exposición continua a la radiación solar, la humedad, y la temperatura. Proceso que inicio en el momento mismo de corte en la plantación, generando cambios químicos y físicos con alteración de las propiedades mecánicas.

(Instituto Colombiano de Normas Técnicas ICONTEC, 2007) [1]. Para determinar la afectación de la resistencia por acción de la continua exposición al intemperismo natural en la ciudad de Bogotá, se planteó un ciclo natural de exposición correspondiente a 7608 horas, equivalentes a 10 meses y 17 días como tiempo apropiado para medir el grado de deterioro de la guadua a nivel mecánico, se aplicaron ensayos de tensión paralela a las fibras acorde con la Normas: NTC 5525, ASTM D638 y ASTM D 3039. los resultados obtenidos durante los ensayos realizados a los primeros especímenes para basa y sobrebasa en un tiempo inicial $T_i=0$ horas, se compararon con los proyectados para un tiempo final $T_f = 7608$ horas. Obteniendo porcentajes de reducción de la resistencia mecánica a esfuerzos de tracción para los especímenes de guadua natural rolliza Angustifolia Kunth en su estado natural y con barnices protectores de superficie para madera conocidos en el mercado como Impranol de Durespo y Barnex de Pintuco.

Durante el desarrollo del presente trabajo los barnices aplicados sobre las superficies de cada espécimen de guadua de manera separada se denominarán C_1 y C_2 , por tanto, se fallaron tres tipos de especímenes de guadua, los que se presentan en su estado natural sin ningún tipo de protección, los protegidos por una capa protectora C_1 -Impranol de Durespo y los que presentan un recubrimiento con el producto C_2 - Barnex de Pintuco.

Se presentaron tres muestras con diferencias en sus características físicas para las probetas de guadua rolliza, con variables independientes unas de otras, donde se analizó, comparó y cuantificó los resultados obtenidos en esfuerzos de tensión, módulos de elasticidad y

deformaciones unitarias, producto del tiempo de exposición a la intemperie natural y a los cambios de resistencias en el material expuesto. Los resultados mostraron que se presenta una reducción de las propiedades mecánicas con un incremento en los Módulos de Elasticidad como resultado de los alto contenidos de humedad y las bajas deformaciones.

Palabras Claves: Guadua, Radiación Solar, Temperatura, Humedad, Deterioro, Factores Abióticos, Intemperismo natural, Espécimen, Tracción, Esfuerzo, Deformación.

ABSTRACT

The Guadua Rolliza Angustifolia Kunth, is affected by different factors that can modify its mechanical resistance, among which are the modification factor due to moisture content and exposure to solar radiation. Different studies have shown that the mechanical resistance of the material to different load stresses decreases as its exposure to abiotic weathering factors increases. To carry out the investigation, forty-eight specimens of round guadua Angustifolia Kunth were taken, which were subjected to the natural deterioration generated by continuous exposure to solar radiation, humidity, and temperature. Process that began at the same time of cutting in the plantation, generating chemical and physical changes with alteration of the mechanical properties

(Colombian Institute of Technical Standards ICONTEC, 2007) [1]. To determine the effect of resistance due to the continuous exposure to natural weathering in the city of Bogotá, a natural exposure cycle corresponding to 7608 hours, equivalent to 10 months and 17 days, was proposed as the appropriate time to measure the degree of deterioration. From the guadua at the mechanical level, parallel tension tests were applied to the fibers in accordance with the Standards: NTC 5525, ASTM D638 and ASTM D 3039. The results obtained during the tests performed on the first specimens for bases and overbases at an initial time $T_i = 0$ hours, were compared with those projected for a final time $T_f = 7608$ hours. Obtaining percentages of reduction of the mechanical resistance to tensile stress for the specimens of natural round guadua Angustifolia Kunth in its natural state and with protective surface varnishes for wood known in the market as Impranol of Durespo and Barnex de Pintuco.

During the development of this work the varnishes applied on the surfaces of each guadua specimen separately will be named C1 and C2, therefore, three types of guadua specimens failed, which are presented in their natural state without any type of protection, those protected by a protective layer C1-Impranol of Durespo and those that have a coating with the product C2-Barnex de Pintuco.

Three samples were presented with differences in their physical characteristics for the round-cut guadua specimens, with independent variables from each other, where the results obtained in tensile stresses, modulus of elasticity and unit deformations, product of the time of analysis were analyzed, compared and quantified. exposure to natural weather and resistance changes in the exposed material. The results showed that there is a reduction of the mechanical properties with an increase in the Elasticity Modules as a result of high moisture content and low deformations.

Keywords: Guadua, Solar Radiation, Temperature, Humidity, Deterioration, Abiotic Factors, Natural Weathering, Specimen, Traction, Effort, Deformation.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	6
1. INTRODUCCIÓN.....	17
2. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN	19
3. OBJETIVOS	20
3.1. General.....	20
3.2. Específicos.....	20
4. ESTADO DEL ARTE	21
4.1. Energía luminosa (Luz)	21
4.2. Agua y temperatura.....	24
4.3. Composición del bambú	27
5. MARCO TEÓRICO	34
5.1. Factores primarios de intemperie	35
5.1.1. Radiación Solar.....	36
5.1.1.1. Variaciones en radiación solar.....	39
5.1.1.2. Formación del ozono.....	39
5.1.1.3. Efectos climáticos en la radiación solar	41
5.2. Temperatura.....	42
5.3. Agua (Humedad)	44
5.4. Factores secundarios de intemperie.....	45
5.4.1. Bacterias	46
5.4.2. Hongos	46
5.4.3. Insectos.....	46
5.5. Métodos de desgaste	47
5.5.1. Intemperismo natural.....	47
5.5.1.1. Intemperismo natural directo	47
5.5.1.1.1. Exposición abierta	48
5.5.1.1.2. Exposiciones respaldadas	49
5.5.1.1.3. Exposiciones de caja negra	49
5.5.1.1.4. Exposición indirecta	50
5.5.1.2. Intemperismo natural acelerado.....	50

5.5.1.2.1. Método de prueba EMMAQUA	51
5.5.2. Intemperismo simulado en laboratorio	52
5.6. Características mecánicas de la guadua.	53
6. METODOLOGÍA	55
6.1. Identificación del problema.....	55
6.2. Determinación de variables.....	57
6.2.1. Ensayos.....	57
6.2.2. Contenidos de Humedad y Pesos específicos	58
6.2.3. Tracción.....	58
6.2.4. Ciclos de Exposición	58
6.3. Cubiertas protectoras.....	58
6.3.1. C1 Impranol.....	59
6.3.1.1. Aplicación Impranol de Durespo (C1).....	59
6.3.2. C2 Barnex de Pintuco	59
6.3.2.1. Aplicación C2-Barnex de Pintuco.....	60
6.4. Tiempos de exposición	60
6.4.1. Cuantificación de los resultados	60
7. MATERIALES Y EQUIPOS	62
7.1. Selección del espécimen	62
7.2. Geometría del espécimen.....	64
7.3. Equipos	65
7.3.1. Equipo a tensión.....	66
8. RESULTADOS.....	67
8.1. Cálculo de las propiedades físicas en función del tiempo de exposición	67
8.2. Cálculo de las propiedades mecánicas en función del tiempo de exposición	69
9. ANALISIS DE RESULTADOS	82
10. CONCLUSIONES	95
11. RECOMENDACIONES.....	97
12. BIBLIOGRAFÍA.....	99

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Distribución del espectro de irradiancia del sol, componentes UV, VIS e Infrarroja	22
Tabla 2. Asignaciones de absorción mediante espectroscopia infrarroja para el bambú mozo sin tratamiento [5].....	32
Tabla 3. Rangos espectrales y su correspondiente Irradiación espectral total del sol.....	38
Tabla 4. Tiempos escogidos para exposición a Intemperie natural directa en la ciudad de Bogotá, aplicada a fibras o piezas de guadua rolliza <i>Angustifolia Kunth</i>	60
Tabla 5. Matriz de ensayos: Peso Específico (P.E), Contenido de Humedad (C.H). Ensayo de Tensión (E.T). en especímenes Basa y Sobrebasas para tiempos T0 y T1.....	61
Tabla 6. Información técnica de las probetas a fallar para Basa y Sobrebasas con cubiertas C1 y C2.	65
Tabla 7. Resultados propiedades físicas, Basa y Sobrebasas, para T0 y T1, probetas en blanco, con Cubierta C1 (Impranol de Durespo) y Cubierta C2 (Barnex de Pintuco).....	67
Tabla 8. Resultados propiedades mecánicas σ_y , E, σ_u , σ_{tu} , para especímenes de Basa y Sobrebasas para T0 y T1.....	73
Tabla 9. Funciones de ajuste lineal para los Módulos de Elasticidad “E” calculados para especímenes Basa y Sobrebasas sin protección y con cubierta C1 y C2. para T1.	79
Tabla 10. Porcentaje de pérdida de Peso Específico (grf/cm ³), en espécimen tipo Basa sin cubierta y con cubiertas C1 y C2 transcurrido T1= 7608 horas.	82
Tabla 11. Porcentaje de pérdida de Peso Específico (grf/cm ³), en espécimen tipo Sobrebasas sin cubierta y con cubiertas C1 y C2 transcurrido T1= 7608 horas.	83
Tabla 12. Incremento del Contenido de Humedad (%), en espécimen tipo Basa sin cubierta y con cubiertas C1 y C2 transcurrido T1= 7608 horas.	83
Tabla 13. Incremento del Contenido de Humedad (%), en espécimen tipo Sobrebasas sin cubierta y con cubiertas C1 y C2 transcurrido T1= 7608 horas.....	84
Tabla 14. Comparación de los pesos específicos para guadua natural y con cubiertas C1 y C2 para T2=1325 horas (Peña F., 2010), versus los valores obtenidos en el presente trabajo de investigación para T1=7608 horas.	85

Tabla 15. Comparación de los Contenidos de Humedad para guadua natural y con cubiertas C1 y C2 para T2=1325 horas (Peña F., 2010), versus los valores obtenidos en el presente trabajo de investigación para T1=7608 horas.	86
Tabla 16. Disminución Esfuerzo de Fluencia “ σ_y ” (MPa), en espécimen tipo Basa sin cubierta y con cubiertas C1 y C2 transcurrido T1= 7608 horas.	88
Tabla 17. Disminución Esfuerzo de Fluencia “ σ_y ” (MPa), en espécimen tipo Sobrebasa sin cubierta y con cubiertas C1 y C2 transcurrido T1= 7608 horas.	89
Tabla 18. Incremento Módulo de Elasticidad “E” (GPa), para Basa, con o sin cubierta C1 y C2, transcurrido los tiempos T0 y T1.	90
Tabla 19. Incremento Módulo de Elasticidad “E” (GPa), para Sobrebasa, con o sin cubierta C1 y C2, transcurrido los tiempos T0 y T1.....	90
Tabla 20. Comparación Módulos de Elasticidad “E” (GPa), para Basa, con o sin cubierta C1 y C2, para T2=1325 horas (Peña F., 2010) versus los valores obtenidos en el presente trabajo de investigación para T1 = 7608.	91
Tabla 21. Comparación Módulos de Elasticidad “E” (GPa), para Sobrebasa, con o sin cubierta C1 y C2, para T2=1325 horas (Peña F., 2010) versus los valores obtenidos en el presente trabajo de investigación para T1 = 7608.....	92
Tabla 22. Módulos de Elasticidad E_i (MPa), CH =12%.....	93
Tabla 23. Comparación Desplazamientos Elásticos “ δ_y ” para Basa, sin protección y con cubierta C1 y C2, para T1 = 7608 horas de exposición.	93
Tabla 24. Comparación Desplazamientos Elásticos “ δ_y ” para Sobrebasa, sin protección y con cubierta C1 y C2, para T1 = 7608 horas de exposición.	93
Tabla 25. Comparación Desplazamientos últimos “ δ_u ” para Basa, sin protección y con cubierta C1 y C2, para T1 = 7608 horas de exposición.....	94
Tabla 26. Comparación Desplazamientos últimos “ δ_u ” para Sobrebasa, sin protección y con cubierta C1 y C2, para T1 = 7608 horas de exposición.	94

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Componente UV y visible del espectro de irradiancia del sol, comprendido entre las longitudes de onda 250nm - 750nm.	22
Figura 2. Proceso de degradación de las células de esquina (CC) y capas S1 y S3.	27
Figura 3. Corte longitudinal del culmo de bambú.	28
Figura 4. Modelo de la estructura de poli-laminillas en el espesor de la pared del bambú.	29
Figura 5 Compuesto de lamela media conformado por matriz de lamela media entre células y la pared primaria de dos células adyacentes combinadas.	30
Figura 6. Ensayo de espectrofotometría mediante FT-IR para el bambú mozo sin tratamiento. .	31
Figura 7. Proceso de degradación del bambú moso expuesto a diferentes tiempos de foto-degradación (a) 0h, (b) 5h, (c) 10h, (d) 20h, (e) 40h, (f) 80h, (g) 120h, (h) 160h, intensidades de las absorbancias para diferentes números de onda.	33
Figura 8. Componentes de los factores abióticos y bióticos de Intemperismo.	35
Figura 9. Histograma valores de precipitación mensual para la ciudad de Bogotá. Fuente: (León G, 2018).....	36
Figura 10. Histograma porcentajes de humedad mensual para la ciudad de Bogotá. Fuente: (León G, 2018).....	36
Figura 11. Distribución del espectro de irradiancia del sol.....	37
Figura 12. Proceso de formación del ozono en la atmosfera, además de las capas que debe atravesar la radiación solar para llegar a la superficie de la tierra.	40
Figura 13. Espesor promedio de la capa de ozono medido en unidades Dobson, para Colombia	40
Figura 14. Muestra los tipos de irradiancia que llegan a la superficie de la tierra, directa, difusa y reflejada.	42
Figura 15. Promedio mensual de radiación global en Bogotá. Fuente: (León G, 2018).....	42
Figura 16. Temperaturas (°C) Bogotá Cundinamarca. Fuente: (León G, 2018)	44
Figura 17. Muestra los tipos de esfuerzos internos que aparecen en los materiales expuestos a condición es de humedad y calor.	45
Figura 18. Muestra los tipos de estantes para pruebas de intemperismo directo.....	48

Figura 19. Muestra los tipos de radiación recibida por una superficie a diferentes inclinaciones, nótese como a menor es la inclinación con respecto al suelo mayor es la irradiancia percibida por el material.	51
Figura 20. Partes del tallo de la guadua	63
Figura 21. Especímenes de guadua en blanco (sin cubierta) con exposición T=7608 horas	64
Figura 22. Probetas de guadua con cubierta C1 (Impranol) con exposición T1=7608 horas	64
Figura 23. Probetas de guadua con cubierta C2 (Barnex) con exposición T1=7608 horas	64
Figura 24. Geometría en cm de la muestra, que se someterá a un proceso de degradación por intemperismo natural y a la cual se le realizará mediciones de resistencia a la tensión.	65
Figura 25. Reducción del peso específico que presenta la guadua rolliza tipo Basa para especímenes en blanco, con protección C1 (Impranol) y C2 (Barnex), al ser sometidas a intemperismo natural directo durante T1.	68
Figura 26. Incremento porcentual del contenido de humedad, que presento la guadua rolliza tipo Basa para especímenes en blanco y con protección C1 (Impranol) y C2 (Barnex), al ser sometidas a intemperismo natural directo durante T1.	68
Figura 27. Reducción del peso específico que presenta la guadua rolliza tipo Sobrebasas para especímenes en blanco, con protección C1 (Impranol) y C2 (Barnex), al ser sometidas a intemperismo natural directo durante T1.	69
Figura 28. Incremento porcentual del contenido de humedad, que presento la guadua rolliza tipo Sobrebasas para probetas en blanco y con protección C1 (Impranol) y C2 (Barnex) al ser sometidas a intemperismo natural directo durante T1.	69
Figura 29. Distribución normal, estimación de la incertidumbre.	71
Figura 30. Ensamble del ensayo a tensión paralelo a la fibra en la máquina de prueba MTS Instron, Longitud entre mordazas oscilante entre 13 a 16 cm, deformímetro de 25 mm, duración de 3 a 10 min.....	71
Figura 31. Cuña de falla en el nudo con un ángulo de 45° en probetas en blanco sin cubierta protectora para el tiempo de exposición T0.....	72
Figura 32. Cuña de falla en el nudo con un ángulo de 45° en probetas en blanco sin cubierta protectora para el tiempo de exposición T1=7608 horas.	72
Figura 33. Cuña de falla en el nudo con un ángulo de 45° en probetas con cubiertas con C1 (Impranol), para el tiempo de exposición T1=7608 horas.	72

Figura 34. Cuña de falla en el nudo con un ángulo de 45° en probetas con C2 (Barnex), para el tiempo de exposición T1=7608 horas.	73
Figura 35. Curvas de σ , σ_y , para Basa y Sobrebasas sin cubierta correspondiente a ensayos de tracción realizados para un periodo de exposición T0.	74
Figura 36. Curvas de σ , σ_y , para Basa y Sobrebasas con C1 (Impranol) correspondiente a ensayos de tracción realizados para un periodo de exposición T0.	74
Figura 37.. Curvas de σ , σ_y , para Basa y Sobrebasas con C2 (Barnex) correspondiente a ensayos de tracción realizados un periodo de exposición T0.	75
Figura 38. Curvas de σ , σ_y , para Basa y Sobrebasas sin cubierta correspondiente a ensayos de tracción realizados para un periodo de exposición T1=7608 horas.	75
Figura 39.. Curvas de σ , σ_y , para Basa y Sobrebasas con C1 (Impranol) correspondiente a ensayos de tracción realizados para un periodo de exposición T1=7608 horas.	76
Figura 40. Curvas de σ , σ_y , para Basa y Sobrebasas con C2 (Barnex) correspondiente a ensayos de tracción realizados para un periodo de exposición T1=7608 horas.	76
Figura 41. Reducción del esfuerzo de fluencia “ σ_y ” para Basa en función del tiempo de exposición T0 y T1 para la guadua rolliza sin protección y con cubiertas C1 y C2.	77
Figura 42. Reducción del esfuerzo de fluencia “ σ_y ” para Sobrebasas en función del tiempo de exposición T0 y T1 para la guadua rolliza sin protección y con cubiertas C1 y C2.	77
Figura 43. Curvas Esfuerzo “ σ ” – Deformación “ ϵ ” corregidas en el rango elástico para obtención de los Módulos de Elasticidad “E”, para Basa y Sobrebasas sin protección para T1. ...	78
Figura 44. Curvas Esfuerzo “ σ ” – Deformación “ ϵ ” corregidas en el rango elástico para obtención de los Módulos de Elasticidad “E”, para Basa y Sobrebasas con protección C1-Impranol, para T1.	78
Figura 45. Curvas Esfuerzo “ σ ” – Deformación “ ϵ ” corregidas en el rango elástico para obtención de los Módulos de Elasticidad “E”, para Basa y Sobrebasas con protección C2-Barnex, para T1.	78
Figura 46. Incremento del módulo de elasticidad “E” para Basa en función del tiempo de exposición T0 y T1, para especímenes sin protección y con cubiertas C1 y C2.	79
Figura 47. Incremento del módulo de elasticidad “E” para Sobrebasas en función del tiempo de exposición T0 y T1, para especímenes sin protección y con cubiertas C1 y C2.	79

Figura 48. Desplazamiento Elástico “ $\square y$ ” para Basa en función del tiempo de exposición T0 y T1, para especímenes sin protección y con cubiertas C1 y C2.....	80
Figura 49. Desplazamiento Elástico “ $\square y$ ” para Sobrebasa en función del tiempo de exposición T0 y T1, para especímenes sin protección y con cubiertas C1 y C2.....	80
Figura 50. Desplazamiento Último “ $\square u$ ” para Basa en función del tiempo de exposición T0 y T1, para especímenes sin protección y con cubiertas C1 y C2.....	81
Figura 51. Desplazamiento Último “ $\square u$ ” para Sobrebasa en función del tiempo de exposición T0 y T1, para especímenes sin protección y con cubiertas C1 y C2.....	81

1. INTRODUCCIÓN

El uso de materiales de bajo costo que sean ambientalmente sostenibles es una necesidad en nuestros días, donde cada día los recursos son más limitados; por esta razón se han implementado diferentes alternativas que han significado esfuerzos en investigación e innovación científica y tecnológica. La Guadua Rolliza Angustifolia Kunth, presenta un amplio aprovechamiento en los lugares donde crece de manera natural, empleándose durante muchos años como un material usado en diferentes aplicaciones constructivas y estructurales, tales como edificios de poca altura, puentes de luces cortas y cubiertas, entre otras; no obstante, la mayor parte del desarrollo se ha dado especialmente de manera empírica a partir de una tradición oral y artesanal (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, AIS. 2010) [2].

En Colombia existen aproximadamente 25 tipos diferentes de bambú gigante, de las 1300 especies que presentes en el mundo. Estos tipos de bambú son usados en la construcción, entre ellos la guadua Angustifolia Kunth (GAK) especie que es abundante y ampliamente empleada en la construcción de vivienda. La guadua es un material con propiedades estructurales ortotrópicas, con una alta variación en sus propiedades físicas con incidencia en la variabilidad de sus propiedades mecánicas. Aunque la madera presenta gran similitud con la guadua en cuanto, a que se trata de un material natural con propiedades altamente variables, la primera ha sido clasificada y normalizada hace más de 50 años, pudiendo emplearse en la construcción con un alto grado de certeza sobre su comportamiento. En la actualidad muchos países ya incluyen en sus normas y reglamentos el Método de Diseño de Factores de Carga y Resistencia LRFD para madera. En Estados Unidos, por ejemplo, en el año de 1996 fue publicado el Manual for Engineered Wood Construction, y en el 2005 se incorporó a la norma National Design Specification como un método de diseño paralelo al de esfuerzos admisibles (ASD), Para el caso colombiano en el año 2010 se incluyó en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 el Título G, Estructuras de madera y Estructuras de Guadua.

Las construcciones en guadua, aun no cuentan con el desarrollo científico e investigativo suficiente para darle un tratamiento estructural con el mismo nivel de confiabilidad de la madera,

ya que un profundo conocimiento del comportamiento mecánico de los materiales es fundamental para el diseño confiable de cualquier estructura (C. E. González, 2006) [3].

Desde hace algunos años, la investigación del Bambú se ha incrementado buscando convertirlos en materiales ampliamente aceptados y difundidos, considerando las grandes ventajas, estructurales, ambientales y sociales.

Para el ejercicio de la ingeniería civil, es necesario estar innovando de acuerdo con las necesidades de la sociedad. En la actualidad es importante el uso de materiales o fibras naturales, por lo tanto, este proyecto busca incentivar el uso en forma segura de la guadua rolliza *Angustifolia Kunth* (GAK) como material de construcción que aporta resistencia mecánica a los esfuerzos de tensión, en construcciones urbanas y rurales. (Castrillón V., Malaver Z., 2004) [4].

Este amplio uso de la GAK, ha incentivado el desarrollo de investigaciones nacionales e internacionales, unas orientadas principalmente al conocimiento de las propiedades estructurales de los elementos y otras enfocadas al estudio anatómico, como las realizadas a diferentes especies de bambúes por Liese (1998) y (Londoño et al (2002)). Esta serie de investigaciones han permitido llegar a demostrar que la GAK posee excelentes propiedades estructurales que la clasifican como clase B, de acuerdo al sistema de clasificación de maderas y por tanto, puede ser empleada en la construcción de viviendas, puentes, estructuras de soportes en sistemas de apuntalamiento, entibado y estabilización temporal de taludes en obras de infraestructura vial.

2. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN

En la actualidad en Colombia, Costa Rica y otros países de América, han implementado la Guadua rolliza *Angustifolia* Kunth como un material estructural y como tal en muchas ocasiones se ve expuesto a condiciones climatológicas adversas debido a su utilización en exteriores, es por ello y puesto que nadie se ha interesado en medir la duración a través del tiempo de esta especie maderable, que se realiza este estudio (L. O. González, 2006) [5].

La durabilidad es un parámetro que debe ser incluido en los diseños de las estructuras que se realicen empleando materiales naturales vegetales. Por tal razón, este trabajo se enfoca en la evaluación de la durabilidad de la guadua en función de su tiempo de exposición a la intemperie natural directa (Zhang J., Zeng Q., Yu T., et al., 2001) [6].

Básicamente el problema que se tiene es medir la pérdida de resistencia de la guadua a esfuerzos de tracción, y pese al deterioro que sufre por acción de su exposición a factores abióticos de intemperie natural directa, tales como, humedad, temperatura, agua, y radiación solar, posicionarlo como un material de construcción que posea buenas condiciones de seguridad aprovechando sus propiedades mecánicas. Es por ello que se formuló la siguiente pregunta para el presente trabajo de investigación. ¿Cómo afecta la intemperie natural directa el comportamiento mecánico de la guadua rolliza *Angustifolia* Kunth, sometida a esfuerzos de tensión? (Luna P., Lozano J., Takeuchi C., 2014) [7].

3. OBJETIVOS

3.1. General

- ✓ Estudio del grado de deterioro mecánico de la guadua rolliza *Angustifolia Kunth* sometida a factores abióticos de intemperie, en condición natural, con cubierta protectora Impranol de Durespo y Barnex de Pintuco en la ciudad de Bogotá.

3.2. Específicos

- ✓ Caracterización físico-mecánico de los especímenes de guadua rolliza *Angustifolia Kunth*, en su estado natural y preservado mediante la aplicación de barnices de recubrimiento superficial Impranol de Durespo y Barnex de Pintuco.
- ✓ Fallar probetas a tracción paralela a las fibras del material a conde con la ASTM D638 y ASTM D 3039.
- ✓ Analizar y Comparar los resultados de los ensayos realizados en las probetas de guadua rolliza en condición natural, con cubierta protectora Impranol de Durespo y Barnex de Pintuco.

4. ESTADO DEL ARTE

A continuación, se realiza un estudio del estado del arte centrado en los diferentes aspectos abióticos que afectan a la guadua *Angustifolia* Kunth.

En la actualidad, se ve la durabilidad como un desafío y un parámetro de diseño más, a introducir en la fabricación de estructuras de todo tipo de material y en especial las construidas con materiales naturales. Es por ello que este trabajo se enfoca en la evaluación de la durabilidad de la guadua en función de su tiempo de exposición a la intemperie (Zhang J., Zeng Q., Yu T., et al., 2001) [6]. Para la *Guadua Angustifolia* Kunth el bambú endémico de América y nativo de Colombia.

Con el auge industrial del siglo XXI, se incrementó el uso de materiales para la construcción, como el cemento y el acero, rezagando la guadua como una alternativa constructiva y sin ningún avance desde la perspectiva de su desempeño sísmicos, sin embargo, en países latinoamericanos se han realizado estudios referentes a las propiedades físicas y mecánicas de la guadua como material usado como alternativa sostenible (Echezuria H., 2018) [8].

De acuerdo con Santos D., Costa M., Santos M., 2007 [9] la durabilidad, es la resistencia que proporciona un material, en este caso natural, al ataque de agentes bióticos (hongos e insectos) y abióticos (luz, agua y temperatura). Para este caso el estudio actual se enfoca en los agentes abióticos, los cuales se encuentran asociados al concepto de intemperie y generan grandes estados de degradación en los materiales (Heikkila A., Tanskanen A., Karha P., et al) [10].

4.1. Energía luminosa (Luz)

El principal factor abiótico de intemperie es la radiación del sol, la cual genera procesos químicos y termodinámicos. La energía del fotón, transportado por la emisión solar es directamente proporcional a la su excitación o frecuencia de vibración e inversamente proporcional a la longitud de onda, implicando que las energías más altas de fotones se pueden encontrar en la región ultravioleta del espectro de radiación del sol y, en consecuencia, los fotones en la región UV tienen la mayor actividad fotoquímica (Papp G., Preklet E., íková B., et

al, 2004) [11]. En la Figura 1 se presenta la conformación del espectro de luz del sol, en su rango ultravioleta y visible.

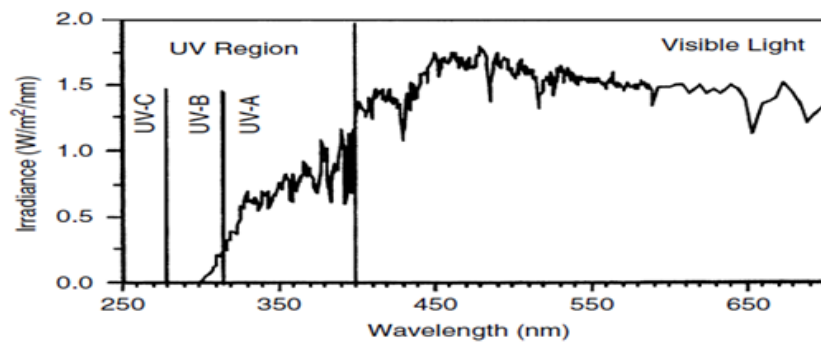


Figura 1. Componente UV y visible del espectro de irradiancia del sol, comprendido entre las longitudes de onda 250nm - 750nm.

Como se puede observar en la Figura 1, la parte del espectro del sol correspondiente a los rayos UVC, por tener la menor longitud de onda, la frecuencia a la cual vibran los fotones es alta, y de igual forma su nivel energético es el más alto en el espectro del sol. Sin embargo, dado a que en el proceso de formación de ozono estratosférico se absorbe la longitud de onda inferior a 280 nm, por ende, este tipo de irradiancia no alcanza la superficie de la tierra. Por otra parte, existe la irradiancia tipo UVB, la cual corresponde a las longitudes de onda comprendidos entre 280-315nm, este tipo de irradiancia contiene la mayor cantidad de energía luego de la tipificada como UVC. De acuerdo a la configuración del espectro y según datos recolectados por el IDEAM (León G., 2009) [12], solo el 4% de irradiancia UVB llega a la superficie de la tierra. Siendo esta la más dañina de los rayos UV que se pueden encontrar.

Tabla 1. Distribución del espectro de irradiancia del sol, componentes UV, VIS e Infrarroja

Espectro de Luz del Sol		
Componentes del Espectro	Longitud de Onda	Observación
Radiación Ultravioleta	100 – 400 nm	
UV-C	100 – 280 nm	Se encuentra fuera de la atmosfera
UV-B	280 – 315 nm	Causa daño severo a los polímeros
UV-A	315 – 400 nm	Causa daño a polímeros, incluye las longitudes de onda corta encontradas sobre la superficie de la tierra
Radiación Visible	400 – 760 nm	
Radiación Infrarroja	>760 nm	

La primera reacción de degradación debida a la fotólisis como un proceso de absorción de luz, es descrita por Fengel y Wegener 1984 [13], de la siguiente forma; “la lignina es un gran absorbente de radiación ultravioleta y así mismo de energía en el rango de 200 a 400 nm comenzando el proceso de degradación de este polímero. Sin embargo, los rayos ultra violeta atacan de igual forma todos los componentes polisacáridos de la madera incluyendo celulosa y hemicelulosa. La pérdida de peso, reducción del contenido de alfa-celulosa y el grado de polimerización refleja la degradación de la celulosa bajo la influencia de rayos UV.

La energía absorbida causa disociación de enlaces en las moléculas de los componentes de las maderas, proceso hemolítico produce radicales libres como primer producto foto-químico. Este procedimiento puede concluir en una de-polimerización y en la formación de grupos cromóforos, tales como quinonas, peróxidos, hidroperóxidos y enlaces dobles conjugados. Por lo que el proceso de degradación UV es iniciado por la formación de radicales libres, y probablemente comienza con la oxidación de oxihidrilos fenólicos. (Rodríguez R., Fuentes F., 2002) [14]. La lignina es extremadamente susceptible a la irradiancia UV, conduciendo a la formación de radicales libres aromáticos (fenoxi-radicales). Estos radicales libres reaccionan a su vez con el oxígeno, para producir carbonilos y grupos carbonilos (Wang X., Ren H., 2008) [15].

El proceso de foto-degradación, depende de las propiedades de la superficie bajo exposición, por ende los resultados asociados a ésta, serán relativos al tipo de material y poco extrapolables entre sí, como es el caso de las especies maderables y las no maderables, entre las que se incluye el Bambú, considerando que la estructura anatómica del bambú es caracterizada por -haces vasculares embebidos en un tejido parenquimoso sin tejido radial como los rayos de la madera; mientras la madera consiste en varios tipos de células funcionales llamadas traqueidas, fibras y células de parénquima dependiendo de la especie. Esto hace que la madera y el bambú sean bastante diferentes en la estructura de la superficie, en cuanto a rugosidad y densidad. La composición química del bambú, particularmente la hemicelulosa y lignina es diferente de los derivados de la madera, la estructura de hemicelulosa del bambú es caracterizada como intermedia similar a la encontrada entre madera suave y dura, a su vez la lignina es caracterizada por tener alta proporción de residuos de siringil, además con una menor porción de constituyentes (como son almidón, azúcar, proteínas y grasas) en el bambú también pueden

influir en el proceso de degradación aunque ellos contribuyen un bajo porcentaje para el total de masa del bambú (Wang X, Ren H., 2008) [15].

4.2. Agua y temperatura

El agua en altas temperaturas, influye sobre los extractos de eliminación; y al ser combinado con otros factores como por ejemplo la luz, causa su mayor daño. Adicionalmente produce erosión de las superficies y proceso cíclico de deterioro de las capas (Rodríguez R, Fuentes F., 2002) [14].

El agua como un ablandador, proporciona una mayor flexibilidad a la pared celular y por lo tanto los reordenamientos estructurales se incrementan. Básicamente el agua en las especies maderables y no maderables causa hinchazón de las traqueidas de la pared celular en su sección transversal, sin embargo y según estudios realizados, las células del lumen permanecen en su esencia constantes cuando la madera se hincha. La alta higroscopicidad de la celulosa y hemicelulosa en dichas especies, originan la absorción de agua y por ende se incrementa su tamaño, causa hinchazón (Murata K., Masuda M., 2006) [16]

Según los autores Sudiyani Y., Tsujiyama S., Imamura Y., et al 1999, mencionaron el efecto del agua en maderas como un proceso de lixiviación de los fragmentos de lignina junto con la hemicelulosa en forma de una solución líquida de lignocelulosa [17].

La exposición de las especies maderables y no maderables a elevadas temperaturas, causa degradación termal de los componentes, lo cual a menudo resulta en una pérdida de masa. La degradación térmica es utilizada en tratamientos de calor para reducir los productos en la madera, al igual que la higroscopicidad, entre otras propiedades modificadas. La reducción de la higroscopicidad del tratamiento de calor es relativo a la reducción de masa cuando ocurre el tratamiento termal, esto es porque la reducción de masa ocurre por la pérdida de hemicelulosa, el principal componente hidrofílico en la pared celular de la madera, los cambios químicos y modificaciones estructurales en la pared celular durante el calentamiento, también han sido resaltados, puesto que juega un significativo rol en la hidrofobicidad de la madera. La capacidad de hinchamiento por el agua de la pulpa de las fibras es reducida a lo largo del secado, incluso a temperaturas inferiores a 20°C. Este fenómeno se conoce como hornificación, y es explicado por

la adhesión de microfibras adyacentes durante la extracción de agua, seguido del colapso de los poros en la pared celular. El mecanismo tras la hornificación es llamado a ser la formación de irreversibles ataduras de hidrógeno entre carbohidratos. (Borrega M., Kärenlampi P., 2009) [18]

Los incrementos térmicos sobre el material reducen el contenido de humedad alterando el equilibrio por permanente degradación de la hemicelulosa, siendo este uno de los mayores componentes higroscópicos en la madera y debido a la volatilización de los extractivos y el rompimiento de otros polímeros de bajo peso molecular en la especie (Evans P., Urban K., Chowdhury A., 2008) [19]. La higroscopicidad de productos maderables causa indeseables comportamientos como es el encogimiento e hinchamiento, además de la formación de puntos débiles en ellos. La madera es un material orto-trópico y el hinchamiento o encogimiento depende de la dirección del material (Borrega M., Kärenlampi P., 2009) [18].

Murata K., Masuda M., 2005 demostraron que los cambios de temperatura y de contenido de agua en productos maderables causa desde encogimiento, hasta hinchazón de las traqueidas [16].

De igual forma otro componente como la lamela media es sorpresivamente una estructura débil, y se ha demostrado que a pesar que las fibras estén intactas, la lamela media se afecta de manera importante por procesos térmicos e higroscópicos. Sin embargo se desconoce si la lamela media al momento de la fractura, ya se ha debilitado por hidrólisis o por alguna reacción química, esto es probable pero no necesaria porque la estructura de la celulosa en la pared celular es más resistente que la lamela media. Cuando exponemos a ciclos de intemperie de humedad y calor a la madera, se observa que la madera tiende a fallar por la lamela media debido al incremento de esfuerzos de algunas partes (Evans P., Urban K., Chowdhury A., 2008) [19].

Pese a que el proceso de degradación a la intemperie de productos maderables se ha documentado, aún no se posee información exacta sobre el proceso de degradación de la pared celular a nivel de la ultra estructura, dado que se han desarrollado muy pocos estudios topo químicos enfocados en la remoción de la lignina de la pared celular en maderas, expuestas a intemperie (aún menos en guadua *Angustifolia Kunth*). Los estudios se enfocan principalmente de forma anatómica sobre las superficies evaluadas por medio del scanner de electro

microscópico (SEM). Sólo unos pocos estudios han utilizado (TEM) Microscopio de transmisión de electrón (Sik J., Singh A., Gon S., et al., 2008) [21].

El método TEM es capaz de lograr de imágenes a una resolución mucho mayor que los microscopios de luz como es el método SEM, debido a la pequeña longitud de onda de De Broglie de los electrones. Esto permite al usuario del instrumento para examinar finos detalles, incluso tan pequeña como una única columna de átomos, que es de decenas de miles de veces más pequeño que el objeto más pequeño puede resolver en un microscopio de luz.

Sudiyani Y., Tsujiyama S., Imamura Y., 1998 [17], desarrollaron ensayos de intemperie en dos clases de maderas albizzia (*Paranserianthes falcata* Becker) y sugi (*Criptomeria japónica* D. Don) a dos condiciones de intemperie con y sin lluvia y una tercera basada en intemperie acelerado con irradiancia UV y simulación de lluvia mediante espray. De acuerdo con esto y gracias a análisis de espectroscopia infrarroja (FT-IR) se pudo observar la reacción de oxidación de la lignina bajo todas las condiciones de intemperie ensayadas, y se remarcó el decremento del contenido de lignina y hemicelulosa cuando en mayor grado en el espécimen de albizzia, se expuso también a la lluvia, lo que indica que el agua mezclada con el UV acelera el proceso de degradación.

Según los autores Temiz A., Terziev N., Eikenes M., et al, 2007 [20], se menciona que los ensayos de intemperie acelerada en cámara de envejecimiento con ciclos de 2 horas de irradiancia UV, seguido por 18 min de agua en espray, el promedio de irradiancia fue conducido a 340nm de longitud de onda que corresponde a una cámara, que maneja lámparas en el rango UVA, la temperatura de la cámara fue de 45°C, se tomaron cuatro réplicas de cada tipo de tratamiento para mejorar la resistencia de una especie de madera a la intemperie las cuales fueron expuestas a 2 periodos de exposición 0 h (condiciones iniciales), 400 h y 800 h, cada muestra fue analizada mediante transformada de fourier espectroscopia infrarroja (FTIR).

Análisis de TEM y UV realizados en madera de un templo budista expuesta a intemperie natural fueron realizados por Sik Kim J., Singh A., Gon S., 2008 [20], mostraron que el primer producto degradado son las células de esquina ubicadas entre las traqueidas y embebidas en la matriz de compuesto de la lamela media, la desintegración de la pared celular causada por la intemperie

comienza desde la lamela media seguida por la degradación de la capas s3 y s1. En la Figura 2 se observa el inicio del proceso de degradación, comenzando por las células de esquina.

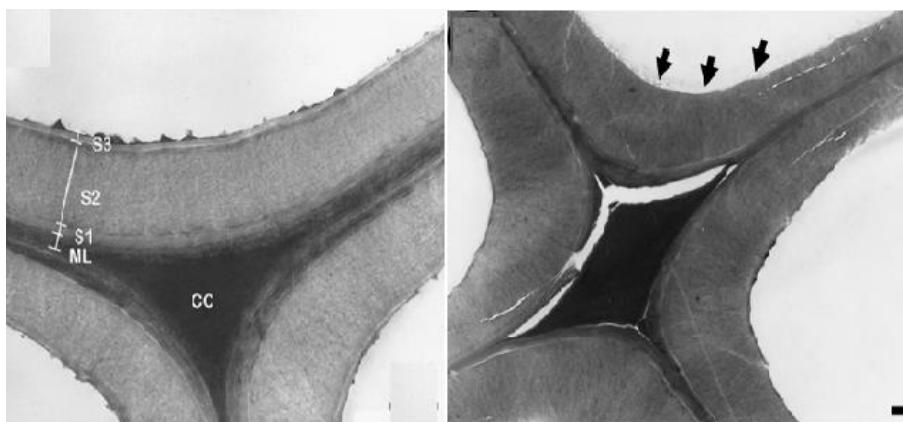


Figura 2. Proceso de degradación de las células de esquina (CC) y capas S1 y S3.

La capa S2 es la más resistente. Sin embargo, en estados más avanzados de intemperie mostró la degradación, causada por la progresiva separación de microfibrillas como haces de individuales microfibrillas, debido a la pérdida de material lignina de la matriz de la pared celular. Este trabajo muestra claramente que antes de degradarse la celulosa, existe el rompimiento de la lignina, de igual forma permite entender el mecanismo de adelgazamiento de la pared celular durante la intemperie, el cual resulta desde la desfibrilación y separación de las capas S1 y S3 de la capa S2 y eventualmente la desfibrilación de la capa S2 y eventualmente división microfibrilar agregada. La secuencia de desintegración por intemperie de la pared celular durante la química de la pulpa, tal como alcalinos sulfatos antraquinona metanol.

Según los autores Gutiérrez M., Bonilla J., Cruz M., Quintero A., 2017) [22] mencionan la expansión lineal y punto de saturación de las fibras de la *Guadua angustifolia* Kunth, cuando alcanzan un determinado contenido de humedad, sin que el espécimen presente cambios en su estructura.

4.3. Composición del bambú

El Bambú formado por el 50-70% holocelulosa, 30% pentosanoe y 20-25% lignina, con algunos componentes menores (Wang X., Ren H., 2008) [15].

Lybeer B., Goetghebeur P., Van Acker J., 2006 [23], estudiaron la composición química y analizaron la configuración del bambú. En la Figura 3 se muestra un corte longitudinal y sección transversal del culmo de bambú formado por haces vasculares embebido en parénquima

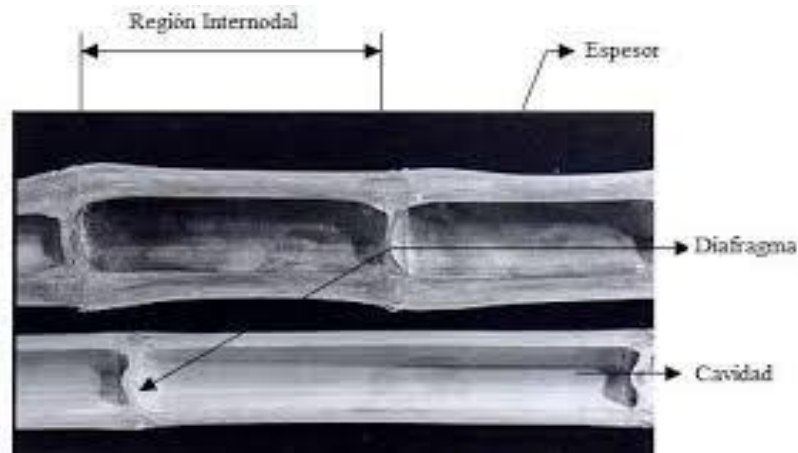


Figura 3. Corte longitudinal del culmo de bambú.

Díaz A., González C., 1992 [24], mencionaron que las células escleriquimatosas aportan al parénquima su forma, tamaño, arreglo y número. En general determina la apariencia transversal del culmo. En la zona perimetral, los haces vasculares son pequeños y más numerosos con sólo unas pocas células de parénquima en el medio y en la zona interna.

Los cortes L longitudinales y T para la orientación transvesal de las microfibrillas en la respectiva lamela seguido por la pared secundaria. En la lamela media, la pared primaria “P” es la más externa lamela seguida por la pared secundaria, primero con la transición lamela “SO” (O indica que no siempre está presente) y luego S1-l, S2-T, S3-l, S4-T, S5-l ETC, alternando las lamela, las cuales son en su mayoría anchas y angostas con longitudinal y transversal orientación, puede ser descrito y designado simultáneamente. La Figura 4 representa el modelo de la estructura de polilaminilla del espesor de la pared de la fibra del bambú, muestra la configuración de las fibras del Bambú rodeada por la matriz de lignina compuesta por la lamela media.

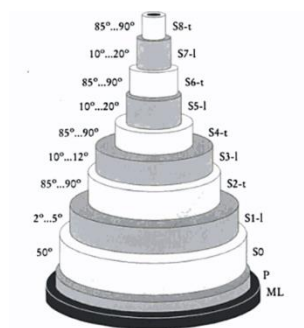


Figura 4. Modelo de la estructura de poli-laminillas en el espesor de la pared del bambú.

Las fibras constituyen el 40 % del volumen del tejido esclerimatoso de el culmo, ellos se producen en los internudos en los haces vasculares como capas de fibras, que rodea la realización de los elementos y en algunos casos genera también el aislamiento de haces de fibras. Genera con solo esclerenquima como su tejido de soporte. Por su parte externa (floema) y por el interno (protoxilema) las fibras tienen dos lados, formando dos decrementos en el tamaño para los culmos.

Osorio J., Vélez J., Ciro H., 2007 [25], estudiaron la composición estructural interna de la Guadua, al ser sometida a tensión disminuye desde la capa externa hacia la interna, las células de parénquima se comportan de manera contraria, generando esfuerzos mayores al material en el momento que se estén realizando pruebas a tensión.

Gutierrez M., Caori P., 2014 [26], Mediante ensayos a tensión, se fallaron 10 probetas de culmos, obtenidos de 3 regiones de Colombia (Valle del Cauca, Quindío, Cundinamarca), el cual, una vez falladas los especímenes, dedujeron que el contenido de humedad del material usado como elemento en construcción, no se ve afectado por el contenido de humedad.

Moreno L., Osorio L., Trujillo E., 2006 [27], estudiaron y profundizaron las propiedades mecánicas de heces de fibra de la Guadua angustifolia, para que puedan ser utilizadas como fase de refuerzo en materiales compuestos, mediante ensayos a tensión y evaluando las fibras en tres factores como son: edad del culmo, altura del culmo y espesor de la pared.

Estudios de Parameswaran y Liese en 1976 [28] revelaron las numerosas capas que constituyen la pared celular del bambú y describieron como las células parenquimosas exhiben una estructura de polilaminillas que consiste en cerca de 15 capas sucesivas arregladas de manera alterna. Las

capas mas amplias se caracterizan por la orientación de las fibrillas de celulosa perpendicular al eje de la celula, y las angostas por fibrillas orientadas en paralelo al eje de la célula. Adicionalmente mostraron que la fibra madura de la pared se caracteriza por capas anchas y angostas alternadas tal y como se muestra en la Figura No 4 Cerca a la franja de la lamela media, en la primera capa de la pared secundaria muestra fibrillas orientadas en un ángulo de 50 ° al eje de las células. En las capas anchas las microfibrillas estan orientadas en un ángulo de 2 a 5° con incrementos hasta de 10-20° hacia la parte interna de la pared. Las capas angostas muestran mas fibrillas orientadas a 85-90°, las cuales permanecen constantes sobre todo el espesor de la pared. Caracteristicamente las fibrillas muestran una pequeña depresión antes de fusionarse dentro de las fibrillas de la siguiente zona laminar. Entre mas se acercan las capas al lumen, estas se vuelven mas angostas en comparación a las mas externas, en la Figura 5 se muestra toda la configuración de capas que encierran el lumen (Goetghebeur, y P. Van Acker., 2006) [23] estudiaron también la ultra estructura de la pared celular de esta planta la cual esta constituida por severas capas. La lamela media consiste en sustancias de pectina altamente hidratadas, la cual actua como un pegamento intercelular en la pared celular (La pared celular primaria es la primera capa de la pared celular). La lamela media y la pared primaria de dos celulas adyacentes cobinadas, constituyen el compuesto de lamela media, este es el compuesto primario de una compleja molecula organica llamada lignina, con algunas pectinas, celulosas, hemicelulosas y otros constituyentes menores. La Figura 5 muestra graficamente lo anteriormente expresado.

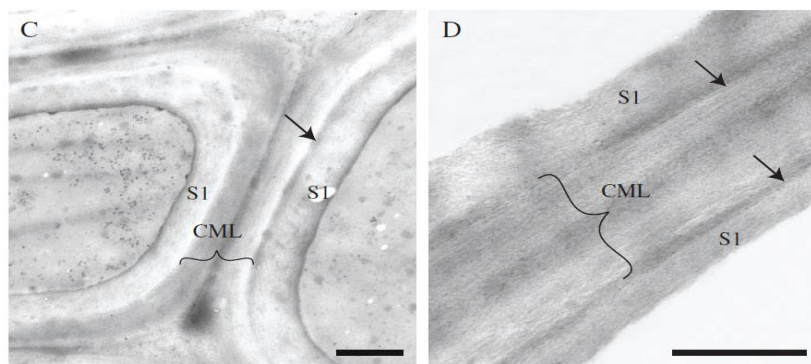


Figura 5 Compuesto de lamela media conformado por matriz de lamela media entre células y la pared primaria de dos células adyacentes combinadas.

Wang X. y Ren H. en el 2008 [15] Midieron la degradación de la superficie del bambú mozo por medio de espectroscopia FT-IR, obteniendo; un pico fuerte de absorción debido al alargamiento de O-H alrededor de 3425 cm^{-1} y un prominente alargamiento de absorción en C-H alrededor de 2931 cm^{-1} , ya que estas bandas tiene contribución de ambos carbohidratos y lignina, ellos presentan un uso limitado en los cambios químicos del bambú debida a la irradiancia. En la región entre 800 y 1800 cm^{-1} hubo picos principales que proveyeron abundante información sobre grupos funcionales presentes en el bambú. Los arreglos no conjugados C=O (en hemicelulosa) se observaron en 1735 cm^{-1} y los esqueletos vibracionales aromáticos en la lignina aparecen en $1508/1512\text{ cm}^{-1}$ y $1596/1604\text{ cm}^{-1}$. Los picos de absorción a 1462 , $1238/1242$ y 1269 cm^{-1} tiene significativa contribución de la lignina. Mientras los picos alrededor 1157 , 1057 y 898 cm^{-1} surgen principalmente de los carbohidratos. También hubo un fuerte pico de carbonilo en la banda 1735 cm^{-1} , indicando una relativa alto contenido de xilan. Ha sido reportado que el 90 % de la hemicelulosa del bambú está conformado por xilan con una única estructura característica, el contenido de lignina del bambú presenta un típico gramíneas de tres unidades de fenilpropane, p- coumaryl, coniferyl y alcoholes sinapyl con un alto contenido de siringil residual. El fuerte pico de absorción en 1242 y 1330 cm^{-1} demostraron la presencia de gran cantidad de unidades de siringil en la lignina. En la Figura 6 y la Tabla 2 se muestra lo anteriormente expuesto.

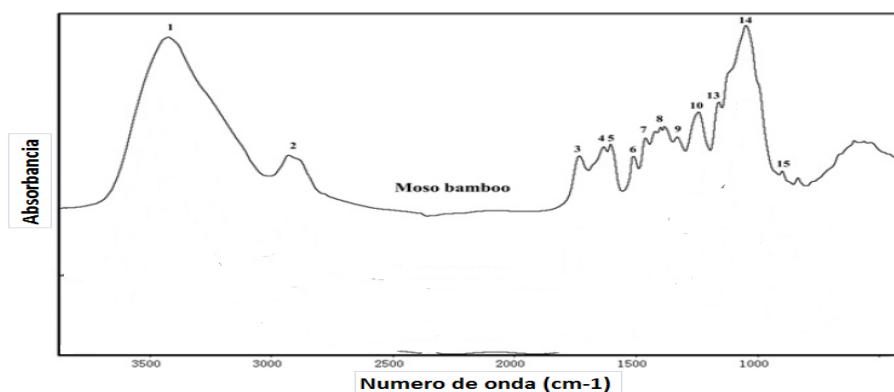


Figura 6. Ensayo de espectrofotometría mediante FT-IR para el bambú mozo sin tratamiento.

Tabla 2. Asignaciones de absorción mediante espectroscopia infrarroja para el bambú mozo sin tratamiento [5]

Numero de Onda (cm-1)	Asignaciones y Comentarios
3425 (1)	Extensión O-H
2931 (2)	Extensión C-H
1735 (3)	No-Conjugado C=O en Hemicelulosa (Xilan)
1639/1654 (4)	Conjugado C-O en lignina
1596/1604 (5)	Esqueletos vibracionales aromáticos en lignina
1508/1512 (6)	Esqueletos vibracionales aromáticos en lignina
1462 (7)	C-H deformación en lignina y carbohidratos
1377 – 1423 (8)	C-H deformación en lignina y carbohidratos
1330 (9)	C-H vibración en celulosa
	C-O vibración en derivados e siringil
1238/1242 (10)	Anillos de siringil y C-O estiramiento en lignina y xilan
1269 (11)	Anillos de guaiacil con extensión C-O
1227 (12)	Anillos de siringil y C-O estiramiento en lignina y xilan
1157 (13)	C-O-C vibración en celulosa y hemicelulosa
1030-1057 (14)	Extensión C-O en celulosa y hemicelulosa
898 (15)	C-H deformación en celulosa

De la misma manera a diferentes tiempos de exposición, en el bambú mozo las intensidades de absorción alusivas a la lignina tal y como se muestra en la Tabla 2 en 1604, 1512, 1462, 1330 y 1242 decrece rápidamente con el tiempo de exposición, en 1604 y 1330 cm^{-1} casi desaparece después de 160 h de irradiación. Desde la absorción pico en 1512 cm^{-1} derivados de aromáticos esqueléticos vibracionales de anillos de benceno son característicos para la lignina, el decremento en la intensidad de estos picos indica degradación de la lignina durante el proceso de irradiación, ya que como se ha documentado anteriormente la lignina es susceptible a la foto-degradación y de-polimerización de la lignina en las superficies de madera debido a la foto-irradiación. (Upreti N., Pandey K., 2005) [29], adicionalmente la intensidad de banda en 1735 cm^{-1} , indicando formación de compuestos de carbonilos no conjugados durante este proceso, también se observa que en las superficies hay procesos de foto-oxidación. Este proceso de degradación se muestra en la Figura 7.

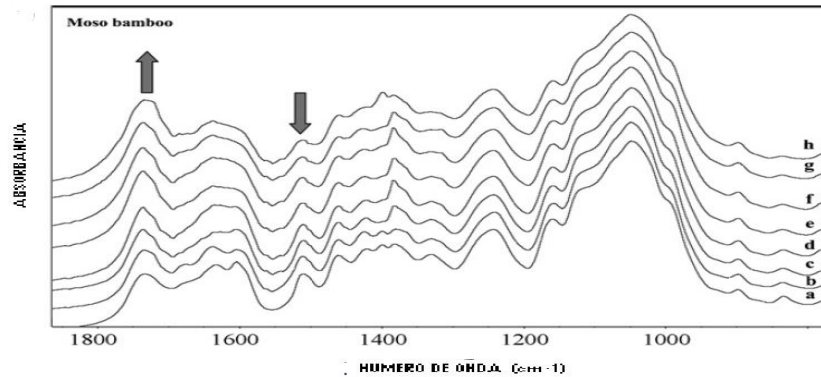


Figura 7. Proceso de degradación del bambú moso expuesto a diferentes tiempos de foto-degradación (a) 0h, (b) 5h, (c) 10h, (d) 20h, (e) 40h, (f) 80h, (g) 120h, (h) 160h, intensidades de las absorbancias para diferentes números de onda.

Bhat I., Khalil A., Awang B., et al, 2010 [30], Modificaron las propiedades de dos especies de maderas “Acacia magnum y Acacia Hybrid” para mirar su degradación en función del tiempo a condiciones de Intemperismo natural en el norte de kepong kuala Lumpur, Malasia para ello generaron muestras de 20 mm * 20 mm * 5 mm (dimensiones radial * tangencial * longitudinal) expuestas a 45° de inclinación y a unas condiciones ambientales como son; 26.5°C de temperatura, 228.2 mm/mes promedio de precipitación y una cantidad de 240h/mes de radiación solar, por un periodo de 12 semanas. A estas muestras se les realizo mediciones alusivas al cambio de color, ensayos de resistencia tales como flexión y tensión, adicionalmente se tomaron imágenes con el microscopio electrónico de barrido sem, obteniendo cambio de color a partir de las 3 semanas de exposición, disminución de la resistencia a flexión a partir de la primera semana, disminución de la resistencia a la tensión a partir de las 3 semanas de exposición. Las imágenes del SEM mostraron la destrucción de la pared celular en particular de las traqueidas que forman este tipo de madera.

Avar L., Bechtold K., 1999 [31], lograron disminuir la degradación de productos maderables por medio de cubiertas mezcladas con ciertos tipos de HALS que son ciertas sustancias que logran obstaculizar el paso de la luz a la superficie que está protegiendo, uno de ellos se basa en acido ester-benzidilico 1, 2, 2, 6,6-pentametilpiperdinol.

Moena R., 2007 [32], implementaron el uso de lasures, los cuales consisten en imprégnate para madera no formadores de película, muy utilizados en Europa para disminuir el ataque de agentes abióticos de intemperie.

5. MARCO TEÓRICO

En el presente trabajo de investigación, se busca medir el grado de deterioro mecánico a esfuerzos de tensión de la guadua rolliza en condición natural, con recubrimiento Impranol de Durespo y recubrimiento en Barnex de Pintuco, sometida a factores de intemperie en la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá durante un periodo de 7608 horas (T1).

Para la construcción de toda estructura prima la seguridad, pero adicionalmente el comportamiento mecánico que está presente en todos los materiales, más aun en los naturales como la Guadua Rolliza, es por ello que en este trabajo se realizó una evaluación y comparación de la durabilidad como producto del tiempo de exposición a la intemperie natural directa y a cambios de resistencia en el material (Zhang J., Zeng Q., Yu T., et al., 2001) [6].

Inicialmente para el desarrollo del trabajo se realiza una caracterización de los materiales, y una selección de la Guadua Rolliza Angustifolia Kunt, identificando sus propiedades físicas.

Posteriormente se elabora un plan de ensayos para estudiar las propiedades mecánicas, mediante ensayos de tensión paralela a la fibra, según lo estipulado en las normas ASTM D638 y ASTM D 3039 [33], velocidad de aplicación de la carga 2 mm/min, con este tipo de ensayo se quiere cuantificar el cambio en esfuerzos últimos, módulos de elasticidad y deformaciones unitarias.

Finalmente se analizan y comparan los resultados de ensayos realizados para dos periodos de tiempo en probetas de guadua rolliza en condición natural, con recubrimiento Impranol de Durespo y recubrimiento de Barnex de Pintuco.

El Intemperismo natural directo es la respuesta adversa de un producto o material al clima, que generalmente causa fallas prematuras y no deseadas en el producto. Los consumidores gastan billones de dólares al año tratando de dar mantenimiento a productos que se degradan inevitablemente y reemplazando aquellos que fallan.

Esta degradación causa en principio, desde descoloración de las superficies hasta la disminución de las propiedades físicas y mecánicas del material expuesto. Un porcentaje muy significativo de

las fallas de estos materiales es el resultado de la exposición al medio ambiente (Muller U., Manfred R., Steiner M., et al., 2003) [34].

Se intenta prevenir el deterioro y las fallas prematuras a través de estabilizaciones químicas o mecánicas, cuya eficacia es evaluada a través de pruebas de Intemperismo que evalúan la durabilidad del producto. Para el desarrollo de productos, es vital entender como diseñar tanto los mecanismos de prevención como los métodos de evaluación, para ello es necesario reconocer los que causan la degradación.

En la Figura 8 se agrupan los factores de Intemperie en dos grandes grupos abióticos y bióticos o factores primarios de intemperie y los factores abióticos:

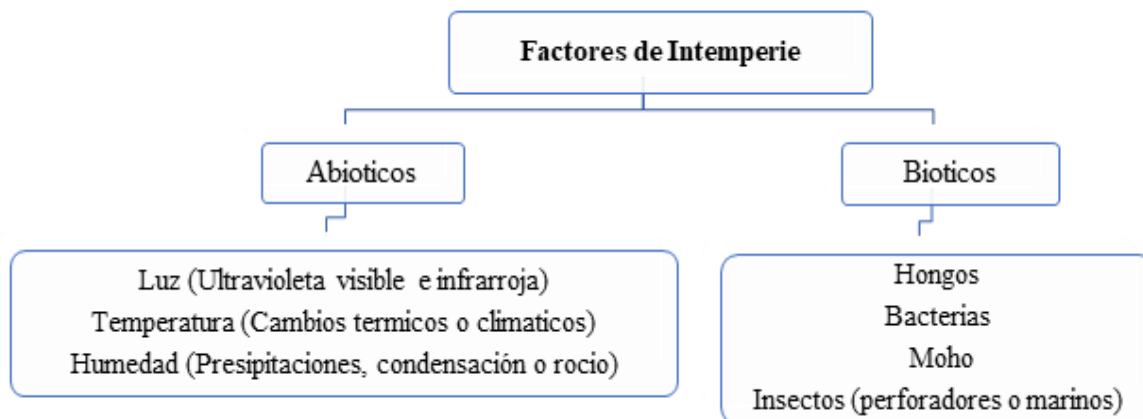


Figura 8. Componentes de los factores abióticos y bióticos de Intemperismo.

5.1. Factores primarios de intemperie

Los tres principales factores del Intemperismo son la radiación solar (energía luminosa), temperatura (cambio térmico) y agua (humedad). Sin embargo, no es sólo el qué tanto de cada uno de estos factores causa la degradación a los materiales, sino que diferentes tipos de radiación solar, diferentes fases húmedas y ciclos de temperatura tienen efectos significativos en los materiales expuestos. Estos factores y otros efectos secundarios, como partículas suspendidas, fenómenos biológicos y lluvia ácida, actúan juntos para causar el Intemperismo (Pickett J., Gibson D., Gardner M., 2008) [35].

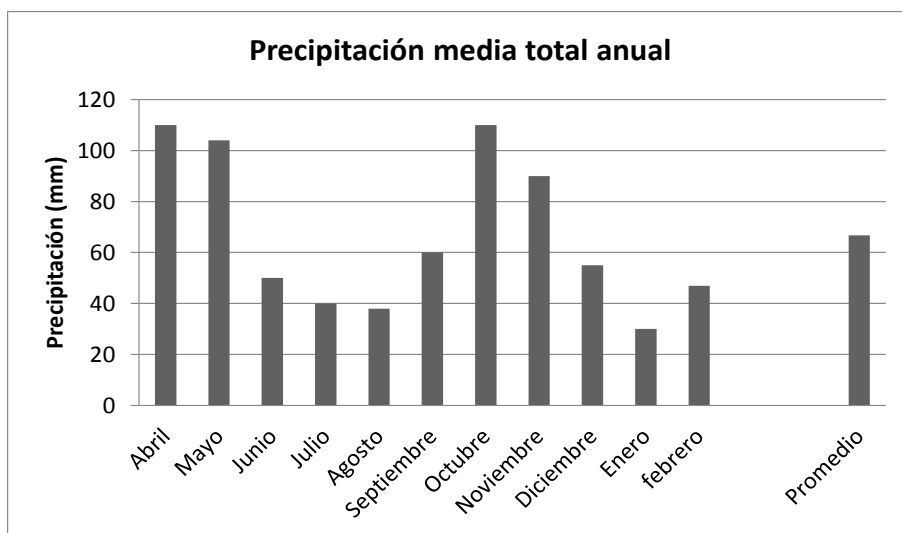


Figura 9. Histograma valores de precipitación mensual para la ciudad de Bogotá. Fuente: (León G, 2018)

El Tiempo de exposición de las probetas corresponde a 7608 horas para un periodo de 10 meses comprendidos entre abril de 2018 a febrero de 2019. En la Figura 9 se observa que durante el tiempo de exposición el valor promedio de precipitación en Bogotá fue de 66,72mm, con una desviación estándar de 30,69, una varianza de 941,62 y coeficiente de Variación de 0,45. [36]

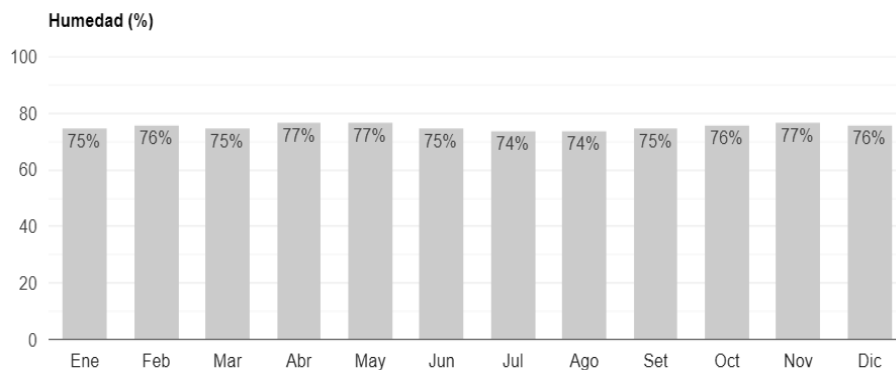


Figura 10. Histograma porcentajes de humedad mensual para la ciudad de Bogotá. Fuente: (León G, 2018)

5.1.1. Radiación Solar

La energía que irradia el sol está compuesta de fotones que viajan a través del espacio como ondas. Su energía (E) es proporcional a su frecuencia (ν) de acuerdo con la ecuación 1.

$$E = h * \nu = h * c / \lambda \quad \text{Ecuación 1}$$

Dónde:

$h = 6,62 \times 10^{-34}$ s J es la constante de Planck

c = Es la velocidad de la luz

λ = Es la longitud de onda

De la ecuación 1, se puede inferir que la energía de los fotones es inversamente proporcional a la longitud de onda.

La radiación solar que llega a la superficie terrestre consiste de ondas de entre 295 y 3000 nm. La luz solar terrestre es comúnmente separada en tres rangos de longitud: ultravioleta (UV), visible (VIS), e infrarroja (IR). Las ondas con una longitud de entre 295 y 400 nm son consideradas la parte ultravioleta (UV) del espectro solar; esto representa entre el 4 y el 7% de la radiación total. La capa de ozono en nuestra estratósfera absorbe y esencialmente elimina toda energía radiante inferior a 295 nm. Solamente se puede registrar radiación inferior a 295 nm con aparatos muy precisos, pero esta medida es descartada por la mayoría de los expertos. La Figura 11 muestra los diferentes rangos que posee el espectro de luz del sol que llega a la superficie terrestre (Brenan P., Fedor C., 2006) [37].

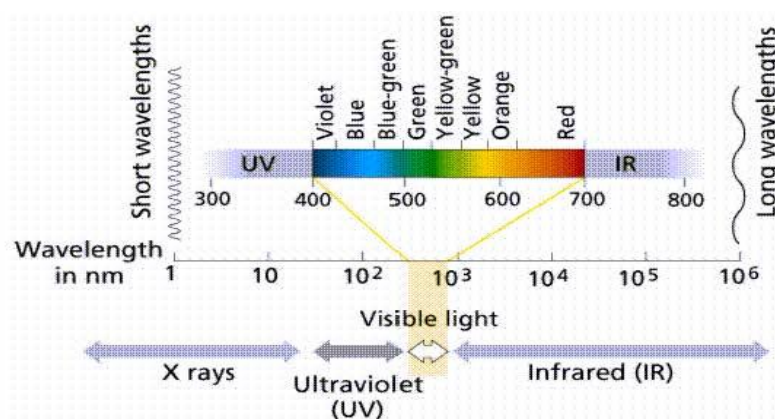


Figura 11. Distribución del espectro de irradiancia del sol

La luz visible (es decir la radiación que puede detectar el ojo humano) se encuentra entre los 400 y 800 nm, lo que representa poco más de la mitad del espectro solar. Alrededor del 40% de la

radiación del sol está en el rango infrarrojo más allá de los 800 nm (Brenan P., Fedor C., 2006) [37].

La Tabla 3 corresponde a Irradiación Espectral total del sol al nivel del mar. (De acuerdo con la Pub. 85, Tab. 4 del CIE), muestra los rangos de longitud de onda según varias fuentes. Estos rangos pueden ser definidos por mediciones de radiómetro, o controlando los parámetros de los instrumentos acelerados en el laboratorio [18].

Tabla 3. Rangos espectrales y su correspondiente Irradiación espectral total del sol.

Rango espectral	nm	Irradiación W/m²
UV-B	280 - 315	2.19
	280 - 320	4.06
UV-A	315 -380	49.43
	315 - 385	54.25
	315 - 400	72.37
	320 - 400	70.50
TOTAL UV	≤ 380	51.62
	≤ 385	56.33
	≤ 400	74.56
TOTAL UV + VIS	≤ 780	658.53
	≤ 800	678.78
IR	780 - 2450	431.87
	800 - 2450	411.62
Total	≤ 2450	1090.40

Para entender mejor los conceptos de radiación solar veremos varios términos que deben ser definidos antes de continuar nuestra discusión.

Irradiación; es el flujo radiante incidente en una superficie por unidad de área, comúnmente expresado en W/m². Para este parámetro, es necesario indicar el rango espectral en el cual se llevaron a cabo las mediciones o para el cual los valores fueron calculados, como por ejemplo 295 - 3000 nm (total solar) o 295-400 nm (UV total). Si fijamos intervalos de longitudes de onda menores, obtenemos la irradiación espectral.

Irradiación espectral; es la medida de energía sobre una superficie para una longitud de onda específica, medida en W/m²/nm.

La exposición radiante; se refiere a la integral del tiempo de irradiancia (espectral), puede ser más importante definido en J/m^2 . La mayoría de las exposiciones se miden ya sea en kJ/m^2 o MJ/m^2 para convertir esta energía a números que se pueden relacionar más fácilmente.

5.1.1.1. Variaciones en radiación solar

Para simular la radiación solar en los instrumentos de intemperismo, se necesita un "sol de referencia" bien definido. El Sol ha existido por billones de años y, a pesar de que el Sol no sigue estándares hechos por el hombre, ha estado emitiendo su radiación, por lo menos el UV, VIS, e IR, de manera muy constante. En 1972 se realizó el primer acuerdo internacional con respecto a un "sol de referencia". Este estándar se encuentra en la publicación No. 20 del Comité Español de Iluminación CIE y aún hoy es un documento válido para las pruebas con simulaciones del Sol. Sin embargo, con los avances de las técnicas de medición se actualizó este "sol de referencia" en la publicación 85 del CIE. Se define el sol de referencia en intervalos de onda más cortos siendo más exactos que la CIE No.20. El sol como todas las estrellas en el universo funciona bajo ciclos solares, para nuestro sol aplican periodos de 11 años (Heikkila A., Tanskanen A., Karha P., et al) [10].

Se puede pensar de los términos utilizados para medir la radiación solar como una tina de baño que se llena con agua. La irradiación será la tasa a la cual el agua sale de la llave y la exposición radiante será la cantidad de agua que hay en la tina en un momento determinado. La irradiación espectral, que define el rango de longitud de onda, será la calidad del agua utilizada para llenar la tina (Weathering testing Atlas Guidebook 2005) [17].

5.1.1.2. Formación del ozono

Se forma a través de reacciones fotoquímicas que involucran radiación solar, una molécula de O_2 y un átomo solitario de oxígeno. También puede ser generado por complejas reacciones fotoquímicas asociadas a emisiones antropogénicas y constituye un potente contaminante atmosférico en la tropósfera superficial. En la Figura 12, se muestra el proceso de formación del ozono, y las capas que la conforman [38].

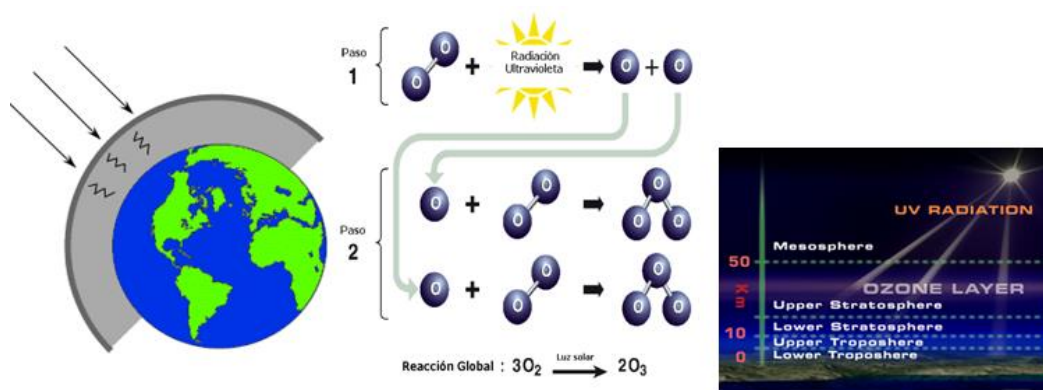


Figura 12. Proceso de formación del ozono en la atmósfera, además de las capas que debe atravesar la radiación solar para llegar a la superficie de la tierra.

El ozono se presenta desde la superficie hasta una altura aproximada de 70 km, pero cerca del 90%, se da en la estratósfera entre los 16 y los 50 km, con una máxima concentración entre los 15 y 35 km. También se forma ozono en la baja tropósfera, cerca de la superficie terrestre, pero en este caso el ozono tiene características de un gas contaminante [38].

La cantidad total de ozono contenido en la columna vertical de la atmósfera sobre la superficie de la Tierra, se expresa en Unidades Dobson (U.D.). La cantidad de ozono presente en la atmósfera es muy pequeña. Si todo el ozono que rodea la Tierra fuera comprimido al nivel del mar, dicha capa de ozono puro tendría aproximadamente 3 mm de espesor. Equivalente a 300 U.D. Los valores de la capa de ozono oscilan entre 200 y 500 UD, en la Figura 13 se muestra el valor de la capa de ozono en unidades de dobson para Colombia [38].

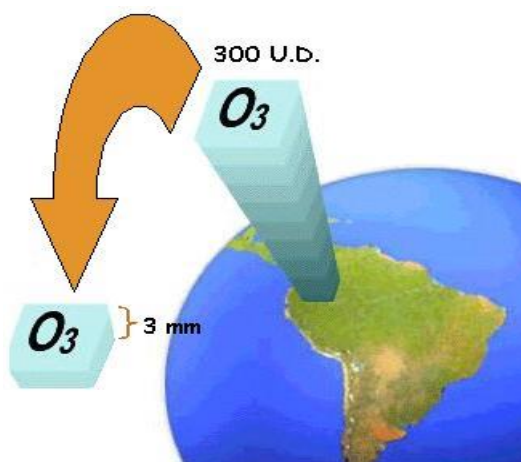


Figura 13. Espesor promedio de la capa de ozono medido en unidades Dobson, para Colombia

5.1.1.3. Efectos climáticos en la radiación solar

La radiación directa es aquella que llega a la superficie de la tierra directamente desde el sol, esto excluye la radiación dispersa en la atmósfera. Para las mediciones de radiometría, esto se define como la energía radiante dentro de un campo de 6° de la vista del disco solar. La radiación difusa es un componente de la energía de radiación que ha sido disperso en la atmósfera y, por lo tanto, alcanza superficies expuestas en todos los ángulos (que no se definen como directos) en un campo de visión de 180° . Esto significa que, en una superficie horizontal, se reciben tanto la radiación directa como la difusa. A esto se le conoce como radiación solar global. Una forma sencilla de entender la radiación directa y difusa es imaginar un edificio alto. La luz directa ocasiona una sombra bien definida. La radiación difusa crea una luz ambiental general, que nos permite ver si nos encontramos parados bajo la sombra del edificio. Es común exponer especímenes en condiciones naturales a un grado de inclinación que incrementará la radiación solar recibida o para mejorar la simulación de las condiciones del uso final. Bajo estas condiciones, la superficie de la muestra aún recibe la radiación directa y difusa. Existe otro tipo de radiación que llega a una muestra además de las otras anteriores. La radiación albedo es aquella que es reflejada por la superficie de la Tierra. La cantidad de radiación reflejada por la Tierra depende de la superficie del suelo. Las rocas, la arena y la grava reflejarán más energía radiante que superficies recubiertas por pasto. El agua y la nieve reflejarán todavía una mayor cantidad de energía radiante. La relación entre las radiaciones directa y difusa que llegan a la superficie terrestre está fuertemente influenciada por las condiciones atmosféricas. El vapor de agua (humedad) y la contaminación incrementan la cantidad de energía radiante en el componente difuso. Un clima desértico tiene mayor porcentaje de energía radiante en el componente directo, que un clima subtropical. Esto se debe a que hay menor vapor de agua en el desierto que en el clima subtropical. En contraste, un lugar con altos niveles de polución, reduce dramáticamente las cantidades de energía radiante directa. [38]. La Figura 14. Trata de explicar los diferentes tipos de radiación que llegan a la superficie de la tierra.

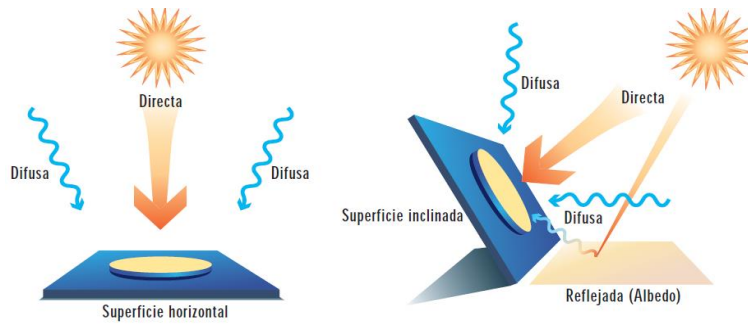


Figura 14. Muestra los tipos de irradiancia que llegan a la superficie de la tierra, directa, difusa y reflejada.

En la Figura 15 se muestran los valores mensuales y el promedio anual de radiación solar para la ciudad de Bogotá. Tiempo de exposición de las probetas de guadua 7608 horas.

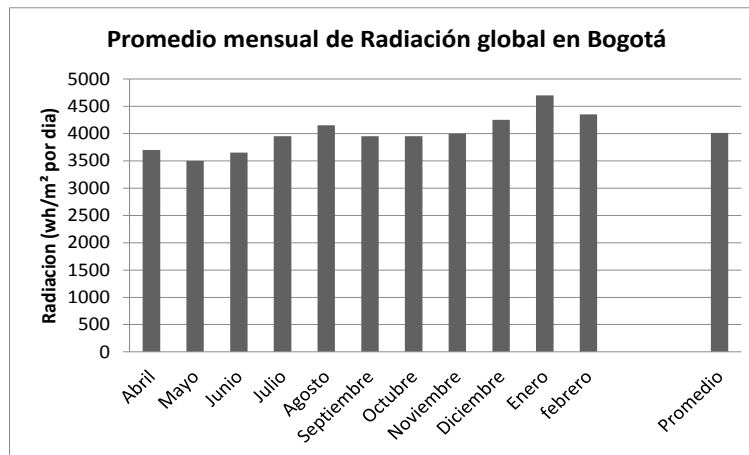


Figura 15. Promedio mensual de radiación global en Bogotá. Fuente: (León G, 2018)

Tiempo de exposición de las probetas para un periodo comprendido entre abril de 2018 a febrero de 2019, igual 7608 horas, el promedio de radiación global en Bogotá es de 4014 Wh/m², con una desviación estándar de 341,39, una varianza de 116545,45 y un coeficiente de variación de 0,08. [36]

5.2. Temperatura

La temperatura de los materiales expuestos a la radiación solar también juega un papel importante en el efecto de la radiación. Las reacciones fotoquímicas usualmente son aceleradas a temperaturas altas. Además, la temperatura determina la velocidad a la cual se realizarán los

pasos subsecuentes de la reacción. Estas reacciones secundarias pueden calificarse usando la ecuación de Arrhenius. Por regla general, las velocidades de reacción se duplican por cada alza de 10° C en la temperatura de un material. Sin embargo, esto puede no verse al observar los cambios físicos y de apariencia. Además, las reacciones termoquímicas que pueden haberse iniciado a temperaturas altas pueden no ocurrir o realizarse muy lentamente a temperaturas bajas [16].

La temperatura de un material expuesto a la radiación solar se determina por un número de factores. La temperatura superficial de la muestra está en función de la temperatura ambiente, el grado de absorción solar de la muestra, irradiación solar y conductividad superficial. Por lo tanto, en la presencia de la luz solar, la temperatura superficial de un objeto es usualmente bastante más alta que la temperatura del aire. El grado de absorción de energía solar en las regiones visible e infrarroja está fuertemente relacionado con el color, con una variación de alrededor de 20% para las superficies blancas y más de 90% para las superficies negras. Por ende, los materiales de distintos colores alcanzarán diferentes temperaturas al ser expuestos. Esta dependencia de la temperatura superficial del color puede tener efectos secundarios (no térmicos) en los materiales [16].

Como resultado de las diferencias en las temperaturas superficiales, el moho y otros microorganismos se desarrollarán y acumularán a diferentes tasas de crecimiento en materiales de diferentes colores. Los materiales blancos, o de colores claros, tienden a ser más aptos para el cultivo del moho que los materiales oscuros. Temperaturas mucho más altas que en una variedad de materiales naturales se obtienen en superficies pintadas o superficies metálicas recubiertas, debido a que la conductividad térmica y capacidad calorífica de los metales es generalmente más alta que en las maderas. La temperatura ambiente del aire, velocidades de evaporación, y el enfriamiento convectivo del aire circundante durante la exposición de la muestra, juegan papeles importantes en la temperatura de un material y por lo tanto tienen una gran influencia en las velocidades de degradación. (Weathering testing Atlas Guidebook 2005) [17].

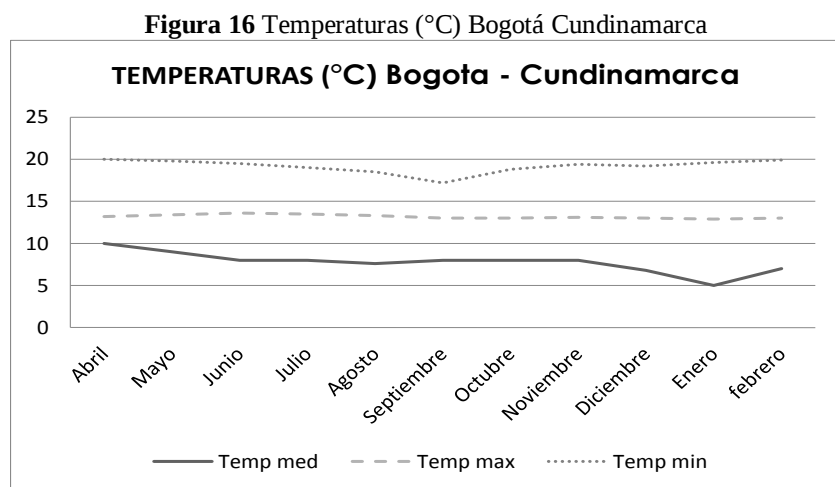


Figura 16. Temperaturas (°C) Bogotá Cundinamarca. Fuente: (León G, 2018)

Tiempo de exposición de las probetas para un periodo comprendido entre abril de 2018 a febrero de 2019, igual 7608 horas. En la Figura 16 se muestra la temperatura máxima para Bogotá, cuyo valor fue de 13,2 °C, con una desviación estándar de 0,24, una varianza de 0,65 y un coeficiente de variación de 0,030. [36].

5.3. Agua (Humedad)

El agua es una de las sustancias de nuestro medio ambiente que se encuentra en todas partes, ya sea como humedad, lluvia, rocío, condensación, nieve, granizo o vapor [7]. Todos los materiales que se utilizan al aire libre están expuestos a estos. El agua afecta los materiales de dos maneras: la absorción de la humedad por materiales sintéticos y recubrimientos o su contacto directo son ejemplos de efectos físicos. A medida que las capas superficiales absorben agua, se produce una expansión del volumen que crea un esfuerzo en las capas secas de la superficie. Después de un período de secado o desorción de agua, las capas superficiales empiezan un proceso de contracción de volumen. Las capas intermedias hidratadas, rechazan esta contracción, llevando a un resquebrajamiento de la superficie por el esfuerzo creado. Los constantes cambios entre los estados húmedos y secos pueden resultar en esfuerzos de fractura. tal y como se muestra en La Figura 17 en la que se observa la configuración de esfuerzos internos que surgen en los materiales debidos a la absorción del agua. (Evans P., Urban K., Chowdhury A., 2008) [18].

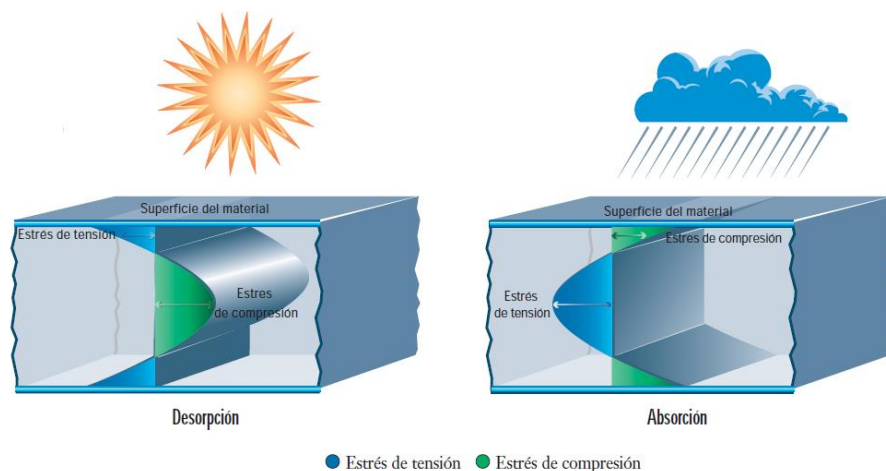


Figura 17. Muestra los tipos de esfuerzos internos que aparecen en los materiales expuestos a condiciones de humedad y calor.

La lluvia, que periódicamente remueve polvo y contaminantes de una superficie, tiene un efecto en el deterioro a largo plazo que es determinado más por su frecuencia que por su intensidad. Cuando la lluvia moja un material, los procesos de evaporación enfrían la superficie rápidamente ocasionándole degradación física al material. La lluvia puede también degradar los materiales debido a la gran fuerza de la energía cinética asociada con su impacto [7].

5.4. Factores secundarios de intemperie

Peña F., 2010 [47] En su investigación de tesis de maestría, midió el grado de deterioro que sufre la *Guadua Rolliza Angustifolia Kunth*, sometida al ataque de la luz, la temperatura y el agua, fenómenos abióticos de intemperie simulados en una máquina de envejecimiento UV test 2000, asignando un ciclo de exposición para medir el cambio a nivel físico, químico y mecánico de la *guadua* sometida a fenómenos de intemperie acelerado simulando el medio ambiente presente en la ciudad de Bogotá.

Estos factores corresponden al tipo biótico como son bacterias, hongos: mohos, cromógenos, pudrición (blanca, blanda, marrón), insectos: coleópteros, isópteros, himenópteros.

En el caso de los factores secundarios de intemperie, la durabilidad hace referencia a la resistencia que ofrecen las especies maderables al ataque de hongos, insectos moho y bacterias. La clase de hongos e insectos que atacan las especies maderables, se les denomina Xilófagos, los

insectos que atacan estos productos son más conocidos como carcomas y termitas. (Díaz B., Peri P., 1999) [40].

En el caso de la *guadua angustifolia* Kunth, es atacada por insectos como escarabajos, termitas y hongos del género *Momillia* S.P. Estos últimos se dan a humedades mayores a 20 % [20].

De acuerdo con lo anterior y puesto que nuestro estudio se enfoca a Intemperismo debido a factores Abióticos, haremos una breve reseña de la degradación de especies maderables por causa del ataque de bacterias hongos e insectos [21].

5.4.1. Bacterias

Son los primeros microorganismos que colonizan la madera en ambientes húmedos, atacan la pared celular y pueden degradar membranas de las punteaduras, las pérdidas de peso ocasionadas por estas, son de bajo rango. Incluso en maderas tratadas, se observan ataques de bacterias, las más conocidas son; *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Flavobacterium*, *Brevibacterium* (Cho C., Ho K., Kim Y., 2000) [41].

5.4.2. Hongos

Estos básicamente afectan la apariencia de la madera y en algunos casos también disminuyen la resistencia mecánica alusiva al impacto, también descomponen todos los componentes estructurales de las especies maderables, causan apariencia blanquecina y fibrosa como resultado de la degradación de la lignina, este ataque a la lignina involucra la oxidación del núcleo aromático y cadenas de propil (Cho C., Ho K., Kim Y., 2006) [41].

Los hongos causan degradación de la celulosa mediante proceso de hidrólisis, pérdida de las propiedades de resistencia, incremento de la solubilidad en alcalinidad (Kim J., Cho C., Lee K., 2008) [41].

5.4.3. Insectos

Se agrupan en Ordenes como son; orden isoptera, orden coleoptera y orden hymenoptera. El orden de Isoptera agrupa las familias; termitidae, kalotermitidae y rhinotermitidae. El orden de

coleóptera corresponde a; cerambycidae, scolytidae, platypodidae – lyctidae, bostrychidae – anobidae – passalidae, scarabacidae (Anagnost, 1998; Levine y Castro, 1998) [20].

La degradación de las especies maderables debida a factores secundarios de intemperie, consiste básicamente en cambios fundamentales en su interior, entre ellos la pérdida de peso por la disminución de la materia leñosa y la desestructuración de paredes y laminillas celulares (Anagnost, 1998; Levine y Castro, 1998) [20].

5.5. Métodos de desgaste

Los métodos de desgaste varían desde el tipo de material expuesto, hasta las condiciones climatológicas del sitio en el cual se encuentre el material, ya que no es lo mismo medir la degradación de un material en la Florida que uno expuesto a las condiciones climatológicas de Bogotá, estas variaciones encierran un gran sin número de variables a tener en cuenta en estos estudios. A continuación, se hará una pequeña reseña acerca de los métodos de Intemperismo, los cuales se agrupan en dos grandes grupos:

- El desgaste debido al Intemperismo natural
- el desgaste simulado en el laboratorio

5.5.1. Intemperismo natural

Es el intemperismo medido en el sitio de interés, y con las condiciones climatológicas reales del lugar de análisis. Este tipo de intemperismo a su vez se subdivide en intemperismo natural directo y natural acelerado (Jacques L., 2000) [39].

5.5.1.1. Intemperismo natural directo

Conocido como intemperismo natural o de exteriores, se define como la exposición directa a la luz solar y otros elementos del clima. Este proceso se realiza generalmente montando el material en algún tipo de estante de exposición. En la Figura 18 se muestran estantes hechos de aluminio anodizado; colocado mirando directamente al sur (en el Hemisferio Norte) a un ángulo fijo. El tamaño de una muestra típica es de 150 x 305 mm. Los ángulos a los que se expone el material normalmente son: cercanos a la horizontal usualmente 5°, 45°, la vertical 90° e iguales a la

latitud del sitio (26° en el sur de Florida y 34° en Arizona central). Las exposiciones llevadas a cabo a 90° no proporcionan las condiciones más severas, pero a menudo corresponden con las del uso final del material probado mejor que cualquier otro ángulo. Las pruebas de este tipo siguen los métodos (Jacques L., 2000) [39].

- ISO 877, Métodos de exposición a intemperismo directo, intemperismo usando filtros de vidrio y a intemperismo intensificado usando espejos Fresnel.
- ISO 2810 Pinturas y Barnices, Intemperismo Natural de recubrimientos Exposición y evaluación.
- ISO 105 B03 Textiles, Ensayos para solidez del color, Solidez del color al intemperismo. Exposición al medio ambiente y ASTM G7 Prácticas recomendada para exposición experimental en materiales no metálicos.



Figura 18. Muestra los tipos de estantes para pruebas de intemperismo directo.

El Intemperismo directo a su vez puede ser del tipo de exposición: Abierta, respaldada, Caja negra, indirectas.

5.5.1.1.1. Exposición abierta

Se llevan a cabo fijando las muestras en sus bordes para que la mayor parte de la muestra sea expuesta a la circulación del aire del ambiente por todos sus lados. Los materiales que normalmente se colocan en un estante abierto son el vidrio, películas, material plástico y metálico para señalamientos, recubrimientos, y lentes plásticos tales como luces traseras para

autos. Es común exponer no sólo una pequeña muestra del material, sino el objeto completo, por ejemplo: una ventana, componentes automotrices o incluso autos y casas.

Aquellos materiales que se utilicen contra un sustrato nunca deberán ser expuestos de esta manera porque el enfriamiento posterior del material, como resultado del aire o la circulación natural, no permitirá que la muestra maneje el mismo ambiente térmico que experimentaría en su uso final. Las fallas prematuras de muchos vinilos y pinturas en su uso final se debieron al continuo uso de este método de exposición (Weathering testing Atlas Guidebook 2005) [17].

5.5.1.1.2. Exposiciones respaldadas

Las exposiciones respaldadas son pruebas de intemperismo al aire libre realizadas montando los especímenes sobre un sustrato (usualmente se usa madera de 12 mm de espesor, cubierta con papel de formaica) para simular el ambiente final al que será expuesto el material. Material en Polivinil Cloruro (PVC), las tejas de techado, y las molduras para autos normalmente se exponen en un soporte de muestras cubierto en la parte de atrás. Siendo el proceso de intemperismo una reacción sinérgica a todos los factores del medio ambiente (radiación solar, temperatura, humedad, etc.) la habilidad para mantener el ambiente térmico de un material en una simulación de las condiciones de uso final, es fundamental para unas buenas prácticas de exposición. (Weathering testing Atlas Guidebook 2005) [17].

5.5.1.1.3. Exposiciones de caja negra

Las exposiciones de caja negra simulan las características de disipación de calor de aire en el cuerpo de un automóvil. Consisten de una caja abierta de metal pintada de negro de alrededor de 150 x 200 cm en longitud y anchura y 25 cm de profundidad. Los paneles en exposición cubren la cara superior abierta de la caja. Para muchos recubrimientos y pinturas para autos, las exposiciones de Caja Negra proporcionan mayores índices de degradación que los de exposiciones estándar abiertas a 5° porque la caja negra produce mayores temperaturas durante el día y permanece húmeda por más tiempo. Las temperaturas de la caja negra son comparables a las encontradas sobre las capotas, techos y cubiertas de los automóviles estacionados bajo luz solar directa. La norma ASTM D4141, método A: Practica Estándar para llevar a cabo

exposiciones aceleradas en el exterior para recubrimientos, especifica el uso del método de exposición de Caja Negra. (Weathering testing Atlas Guidebook 2005) [17].

5.5.1.1.4. Exposición indirecta

El intemperismo indirecto, o bajo cristal es la exposición de materiales que no se exponen típicamente a todas las condiciones de la intemperie. Este método de prueba se utiliza para determinar la durabilidad del color de los materiales con recubrimientos, alfombras, tapicería, interiores automotrices, etc. La metodología fue desarrollada inicialmente por la Asociación Americana de Químicos y Coloristas Textiles (AATCC) para probar sus materiales y fue adoptada posteriormente por la industria automotriz para probar los textiles. Los métodos primarios de intemperismo indirecto son el ISO 877. (Weathering testing Atlas Guidebook 2005) [17].

5.5.1.2. Intemperismo natural acelerado

Mientras se espera que la vida útil de un material aumente, se están desarrollando nuevos materiales para disminuir el tiempo de los ciclos. Por lo tanto, las pruebas aceleradas se desarrollan por motivos económicos y preocupaciones competitivas. Para cualquier propósito práctico, las pruebas que se llevan a cabo en Florida y Arizona (sitios de referencia) pueden ser consideradas aceleradas pues los materiales se degradan con mayor rapidez en estos climas que en la mayoría de los otros ambientes del mundo. Si se toma en cuenta el hecho de que la mayoría de los materiales no están siempre expuestos al sol, podemos con mayor razón considerar estas pruebas aún más como aceleradas. Ahora bien, también influye el ángulo de exposición, En la Figura 19 se muestra que al realizar la prueba a 45° pudiera considerarse una prueba acelerada porque los especímenes a 45° reciben al menos 30% más irradiación. Se ha demostrado que la tasa de degradación es hasta 2.5 veces mayor. Finalmente, si el espécimen se coloca en un estante de seguimiento solar manteniendo las muestras perpendicular al Sol durante todo el día, la radiación total de exposición recibida puede ser hasta 1.7 veces mayor, con tasas de degradación también mucho mayores. (Jacques L., 2000) [39].

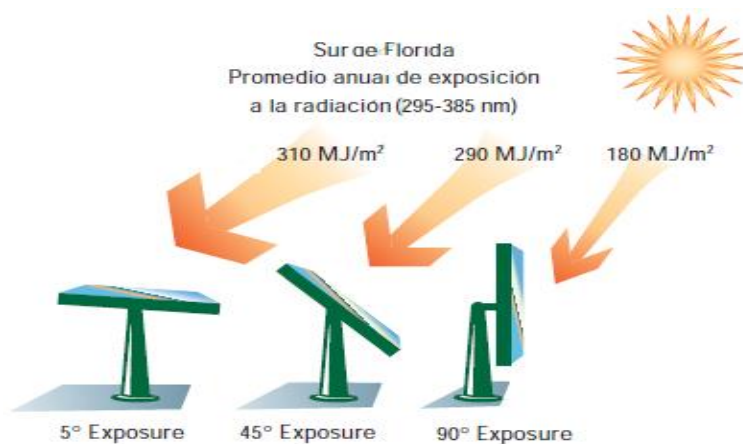


Figura 19. Muestra los tipos de radiación recibida por una superficie a diferentes inclinaciones, nótese como a menor es la inclinación con respecto al suelo mayor es la irradiancia percibida por el material.

5.5.1.2.1. Método de prueba EMMAQUA

Los enfocadores solares Fresnel tales como el EMMA y EMMAQUA son de los elementos más reconocidos y usados para pruebas aceleradas en el exterior. Sus nombres corresponden a sus siglas en inglés (Jacques L., 2000) [39].

- EMMA (Montaje Ecuatorial con Espejos de Aceleración)
- EMMAQUA (Montaje Ecuatorial con Espejos de Aceleración con Agua).

Estos dispositivos fueron desarrollados en la década de los sesenta en los laboratorios DSET (parte del Grupo Atlas de Servicios de Intemperismo). Los espejos de alta calidad del primer nivel enfocan uniformemente la luz solar natural en las muestras a una intensidad aproximadamente ocho veces mayor que la normal en el campo VIS y cinco veces mayor en la porción UV del espectro. Puesto que el método expone las muestras a todo el espectro de luz natural, es esta una de las pruebas aceleradas más realistas. Los parámetros de este dispositivo de pruebas, ciclos de rociado, etc. Las exposiciones en EMMAQUA normalmente se llevan a cabo con base a la exposición UV total anual equivalente a la exposición ultravioleta total en un desierto promedio como Arizona Central o en un ambiente subtropical como en el sur de la Florida. (Jacques L., 2000) [39].

5.5.2. Intemperismo simulado en laboratorio

Debido a la necesidad de evaluaciones más rápidas de la resistencia de materiales al intemperismo, que las que pueden ser obtenidas por las pruebas al aire libre, los dispositivos con fuentes de luz artificiales se utilizan generalmente para acelerar la degradación. Estas fuentes incluyen arco largo de xenón filtrado, lámparas fluorescentes, de metal haluro y arco de carbono. Las fuentes de luz menos usadas incluyen las lámparas de vapor de mercurio y de tungsteno. A veces, a estas pruebas de intemperismo acelerado en laboratorio se les conoce más apropiadamente como intemperismo artificial. La aceleración sobre el intemperismo natural ocurre por varias razones. Principalmente, las pruebas pueden ejecutarse continuamente con irradiaciones naturales o mayores que la radiación solar, sin la interrupción del ciclo natural día/noche, las variaciones estacionales, o las condiciones atmosféricas. Las temperaturas, ciclos térmicos, humedad y exposición al agua también se pueden manipular al máximo, sin ser llevadas a niveles no realistas de tensión. Las muestras se pueden exponer a las energías espectrales más allá de los límites de servicio previstos, aunque se debe tomar precaución para no causar mecanismos de degradación poco naturales. Además de la capacidad de manipular y acelerar las condiciones de intemperismo a voluntad, una ventaja fundamental de una prueba de laboratorio es la reproducibilidad y repetibilidad sobre lo que es esencialmente un fenómeno incontrolado y variable en el clima mismo. Se pueden conducir investigaciones para estudiar la respuesta específica de materiales a los diferentes factores del intemperismo. Cada uno de los factores del desgaste se puede controlar independientemente [42].

La repetibilidad y Reproducibilidad son dos términos comúnmente usados que siempre surgen al discutir las capacidades de los instrumentos de intemperismo de laboratorio. La repetibilidad es la capacidad de un solo Instrumento de intemperismo de replicar sus propios resultados de prueba. Reproducibilidad es la capacidad de varios instrumentos de intemperismo de replicar resultados si todos ejecutan las mismas pruebas. Obviamente, todos los fabricantes de instrumentos de intemperismo procuran hacer sus dispositivos tan repetibles y reproducibles como sea posible. Hay cierta variabilidad que existirá en cualquier instrumento, pero hay otros factores que pueden conducir a pruebas no repetibles, entre ellos: calibración y/o operación incorrecta, variabilidad del rocío de agua, mantenimiento del equipo, variabilidad en muestras y variabilidad del equipo usado para medir el cambio en una propiedad del espécimen [19].

El uso de agua purificada para rociar las muestras se explica con la necesidad de evitar la corrosión dentro del instrumento. Pero esta no es la razón más importante. También para asegurar la limpieza y reproducibilidad de las condiciones de prueba, se necesita agua ultra pura. Adicionalmente, sin agua propiamente tratada para lograr remover cationes, aniones, orgánicos y en particular sílica, las muestras expuestas pueden desarrollar manchas que no ocurrirían naturalmente. Por lo tanto, recomendamos fuertemente que el agua del sistema de rocío contenga un máximo de 1 $\mu\text{g/g}$ de sólidos y 0.2 $\mu\text{g/g}$ de sílica. Para alcanzar este nivel de pureza normalmente se utiliza la destilación o una combinación de des- ionización y osmosis inversa [19].

Según lo expuesto hasta el momento y de acuerdo al tiempo que lleva efectuar ensayos de intemperismo natural, el método de ensayo escogido es el simulado en laboratorio, mediante cámara de envejecimiento que acelere el proceso de degradación en el material y nos garantice una fácil repetibilidad de las pruebas.

A continuación, se hará una pequeña reseña sobre las variables a tener en cuenta en los ensayos de intemperie que se quieren realizar.

5.6. Características mecánicas de la guadua.

Al ser la guadua un material proveniente de la naturaleza, además de los factores abióticos también existen factores externos que afectan y disminuyen su comportamiento mecánico, la humedad de la planta, la edad al momento del corte y los defectos e imperfecciones que ocurren durante el crecimiento del tallo, junto con los tratamientos de preservación aplicados. (Brand R., Ruiz D., Lozano N 2015) [43]

Según América (2013), *“la guadua es una gramínea nativa, de amplia distribución en América, donde ha cumplido un importante papel ambiental, sociocultural y económico. En Colombia se le encuentra ampliamente dispersa, conformando rodales (guadales) casi puros que cumplen indiscutible efecto protector sobre el suelo, las aguas y las rondas de los ríos, contribuyendo a su recuperación y conservación”*. Se puede afirmar que la guadua es un material natural compuesto por fibras inmersas en una matriz. La planta de GAK está compuesta por un culmo hueco dividido en diafragmas de tal forma que cubre las fibras de la planta, la pared del culmo

cambia su espesor dependiendo de la sección de la planta. La guadua es un material funcionalmente ortotrópico lo que significa que las fibras que la componen se distribuyen de una manera heterogénea sobre todas las paredes de la culmo, Wang zheng guo Wenjing (2002).

Los culmos de la guadua están formados por cáscaras cilíndricas o laminillas, esbeltas, y huecas, cuyas cavidades son separadas por diafragmas o tímpanos que actúan como rigidizadores naturales. Una característica física es la que tiene que ver con el espesor de la pared del culmo, el tipo y porcentaje de fibras y su variación a lo largo de toda la longitud del mismo; aspecto importante que debe considerarse al momento de realizar un análisis del material dada su influencia en el comportamiento mecánico, lo cual condiciona sus posibles aplicaciones. (Ghavami y Marinho, 2001).

(Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistentes NSR-10 2010). En su Título G.12-3 establece que la guadua puede ser usada con fines estructurales siempre cuando cumpla las siguientes recomendaciones. - La edad adecuada para su uso con fines estructurales debe estar entre los 4 y los 6 años. - El contenido de humedad de la guadua debe corresponder con el contenido de humedad de equilibrio de la región donde será utilizada. - La guadua estructural debe tener una buena durabilidad natural o estar adecuadamente preservada. Además, se deben aplicar todos los recursos para protegerla mediante el diseño del contacto con la humedad, la radiación solar, los insectos y los hongos. - La clasificación mecánica debe satisfacer las recomendaciones de la NTC 5525, en relación con su capacidad a resistir cargas de compresión paralela, corte paralelo, flexión y tracción, así como, en su módulo de elasticidad. - Los esfuerzos máximos admisibles y los módulos de elasticidad son presentados para un contenido de humedad de 12%, teniendo en consideración de que si la humedad del material no corresponde a lo establecido en la NSR-10.

6. METODOLOGÍA

Se quiere medir la degradación que puede presentar la guadua rolliza, expuesta a diversos agentes de intemperismo, más exactamente a la combinación de los factores primarios de Intemperie, tales como son; la luz, agua y la temperatura, puestos que estos causan su mayor grado de deterioro al aplicarse de forma simultánea, y con el paso del tiempo logran desde cambios de coloración en la superficie, hasta la disminución de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales naturales. Sin embargo, debido a la complejidad de los ensayos, en cuanto al tiempo necesario para obtener resultados cuantificables, existen en el mercado maquinas que pueden acelerar estos procesos de degradación, utilizando la combinación de estos agentes de manera controlada e incrementando sus dosis. Para el caso del presente estudio se optó por exponer los especímenes de guadua a los efectos de intemperismo natural directo, en las instalaciones de la Estación Meteorológica de la Universidad Nacional sede Bogotá, durante un tiempo de 10 meses 11 días, equivalente a un tiempo máximo de exposición de 7608 horas. De acuerdo con lo anterior y según lo expuesto en los capítulos anteriores, a continuación, se explicará el plan de trabajo a seguir.

6.1. Identificación del problema

Schmalz K., Evans P., 2003 establecieron que las superficies de madera expuestas a intemperie natural, sufren descomposición de la lignina y celulosa, siendo estos los mayores constituyentes de la madera. También determinaron mediante el método Infrarrojo de la transformada de fourier (FTIR-IRS), que la degradación de la lignina y la celulosa es acelerada en condiciones naturales, tanto así que al cabo de 4h de exposición a la luz del sol, se encuentra una pérdida de lignina entre 1 a 2 μm y al cabo de 4 días la depolimerización se incrementa en la celulosa, los productos degradados de la lignina, son lixiviados por la lluvia [44].

Temiz A., Terziev N., Eikenes M. et al, 2007, mostraron que los factores que más contribuyen a la degradación en la madera, son la irradiancia UV y el agua, esta degradación por intemperie se define por el cambio de color en la superficie, seguida por rugosidad, aspereza y perdida de brillo, esto se explica por el efecto del componente UV de la luz del sol, la temperatura y la humedad son conocidos como agentes oxidantes, similares al oxígeno y/o ozono, que son

capaces de la de-polimerización de la lignina y algunos polisacáridos en la pared celular de la madera [21].

Wang X., Ren H., 2008 colocan al bambú como un material renovable de rápido crecimiento e ideal para su uso en construcción de estructuras, sin embargo, esta especie maderable expuesta al medio a la intemperie, es susceptible a la degradación, desde la disminución de color y atractivo en su textura, hasta la degradación y de-polimerización del mismo, todo depende de la combinación de factores que se manejen, como son luz, temperatura y humedad. La foto descolorización envuelve un proceso complejo físico y químico de reacciones, estas reacciones empiezan por la formación de radicales libres debido a la irradiancia UV, los polímeros que constituyen este producto muestran diferentes capacidades de absorción UV, la lignina como un fuerte absorbente de luz, deja la formación de radicales aromáticos libres (radicales fenoxilos), estos radicales más allá reaccionan con el oxígeno para producir carbonilos y grupos de carbonilos, resultando en la foto-degradación de la superficie [15].

En la actualidad en Colombia, Costa Rica y otros países de América, han implementado la Guadua rolliza *Angustifolia* Kunth como un material estructural y como tal en muchas ocasiones se ve expuesto a condiciones adversas climatológicas debido a su utilización en exteriores, es por ello y puesto que nadie se ha puesto en la tarea de medir la duración a través del tiempo de esta especie maderable, que se realiza este estudio [22].

La guadua es un producto forestal ampliamente difundida en los Valles interandinos y la zona andina del país, con amplio uso en los departamentos del eje cafetero, Antioquia y el Valle del Cauca, por lo general se usa en actividades de construcción y otras aplicaciones a nivel rural (Perea J., Villegas J., Bahamon Y., et al, 2003) [45].

Básicamente el problema que se tiene es medir el deterioro de la guadua rolliza y posicionar este material entre los productos de construcción más duraderos.

De acuerdo con lo anterior, lo que se quiere medir es el grado de degradación en función del tiempo, que puede presentar este espécimen maderable, para lo cual se escogerá un método de desgaste, según los procedimientos existentes y de acuerdo al procedimiento más acelerado que nos muestre resultados en corto tiempo.

6.2. Determinación de variables

En la determinación de las variables que se deben tener en cuenta para la ejecución de los ensayos de envejecimiento, se tomó como objetivos:

- Medir el deterioro mecánico en basa y sobrebasa de especímenes de guadua rolliza GAK.
- Medir la degradación de estas piezas como elemento estructural expuesto a exteriores, en cuanto a sus propiedades físico mecánicas.
- Minimizar su deterioro, mediante la aplicación de dos cubiertas protectoras, altamente utilizadas en Colombia para productos maderables.

Según los objetivos planteados, surgen ciertas variables que requieren profundización como son:

- Ensayos
- Ciclos de Exposición
- Cubiertas de protección
- Tiempos de Exposición
- Cuantificación de los resultados

6.2.1. Ensayos

Para cuantificar los diferentes niveles de degradación en el material, se optó por desarrollar un grupo de ensayos, los cuales cuantifican a la perfección el grado de deterioro, cuantitativo y cualitativo que presenta la guadua rolliza a diferentes tiempos de exposición, los tipos de ensayo se enumeran a continuación:

- Contenidos de Humedad y Pesos específicos
- Tracción paralela a la fibra
- Determinación de los módulos de elasticidad

6.2.2. Contenidos de Humedad y Pesos específicos

Propiedades físicas, según el cálculo de contenido de humedad y densidades, bajo las normas ASTM D2395 [33] y D4442 [24], con el fin de cuantificar la pérdida de peso y el cambio de porcentaje de humedad de la guadua rolliza a medida que se incrementa el tiempo de exposición a la intemperie.

6.2.3. Tracción

Propiedad mecánica, mediante ensayos de tensión paralela a la fibra, según lo estipulado en la norma ASTM D638 y ASTM D 3039 [33], velocidad de aplicación de la carga 2 mm/min, con este tipo de ensayo se quiere cuantificar el cambio en esfuerzos últimos, módulos de elasticidad y deformaciones unitarias.

6.2.4. Ciclos de Exposición

Wang X. y Ren H. en el 2008 [15], emplearon ciclos de exposición adecuados para los ensayos de intemperismo acelerado en Bambú, estos ciclos se definieron con base a que es necesario, no exponer el material en estudio, a tiempos exagerados de un único factor, puesto que evita que el mismo efectúe sus procesos físico químicos, necesarios en el proceso de degradación estudiado. Es por ello, que este estudio empleara los mismos periodos de exposición que los vistos en la literatura.

6.3. Cubiertas protectoras.

En busca del mejor método de protección para la guadua (GAK), se llegó a la conclusión; que los productos Lasur Impranol de Durespo S.A. y el barniz Barnex de Pintuco, son las cubiertas que mejor se ajustan a la superficie de los especímenes, dado su función protectora para maderas usadas en exteriores.

6.3.1. C1 Impranol.

De procedencia alemana el Impranol es la primera de las cubiertas seleccionadas luego de verificar que este tipo de protección es la más usada para proteger superficies de madera expuestas al aire libre y luego de realizar los análisis de las cubiertas que más se importan para la protección integral de maderas.

Impranol de Durespo es un lasur a base de disolvente para la protección cuyo componente principal es Acido 2-etilhexanoico y acetato de cobalto, logrando excelente penetración en la madera, repele el agua y la humedad. Posee un polvo muy fino que le da a la pintura su color y recubrimiento, los pigmentos protegen contra la corrosión, resisten la luz solar, la humedad y demás condiciones del medio ambiente sin decolorarse, se comporta como la cubierta ideal, ya que absorbe toda la parte UV del espectro solar, y no la luz visible.

6.3.1.1. Aplicación Impranol de Durespo (C1)

Se debe aplicar Impranol con brocha, mínimo dos manos con un día de intervalo entre cada mano, secadas al aire por una semana antes de la exposición.

6.3.2. C2 Barnex de Pintuco

La segunda cubierta corresponde a Barnex de Pintuco, la cual es comúnmente aplicada a las piezas de guadua rolliza en el país. Barnex de Pintuco es una resina alquídica, que por tratarse de un barniz repele el agua que erosiona las superficies expuestas, dándole un acabado brillante agradable a la vista, adicionalmente tiene las siguientes bondades: Excelente protección en ambientes exteriores, alta flexibilidad, reduce la retención de humedad, permite la respiración natural de la madera, evita el desprendimiento, adicionalmente, con la aplicación de base Barnex en exteriores, se previene el ataque de hongos, presenta facilidad de repinte y mantenimiento, diversidad de alternativas de decoración y excelente protección en ambientes exteriores.

6.3.2.1. Aplicación C2-Barnex de Pintuco

Tres a cuatro manos en áreas de exposición directa a intemperie, con intervalo aproximado de 6 a 8 horas entre manos. Los productos del Sistema Barnex se deben aplicar con brocha; la aplicación a pistola no se recomienda, porque puede originar problemas de secamiento, ya que se tiende a realizar pasadas (manos) sin permitir los tiempos de secamiento recomendados para los productos. El Barniz Barnex, debe aplicarse únicamente sobre Base Barnex. El uso de otros preparadores de superficie ajenos al sistema, como selladores, tapaporos o imprimantes, pueden ocasionar problemas de adherencia.

6.4. Tiempos de exposición

Los tiempos de exposición se escogieron teniendo en cuenta que los productos maderables tienden a soportar las inclemencias del medio ambiente, por ello se espera que a partir de las 1000 horas se pueda obtener cambio en las propiedades mecánicas de la guadua rolliza. De acuerdo la Tabla 4 se establecen los dos puntos importantes de tiempos de exposición T0 y T1 para adelantar los ensayos anteriormente descritos.

Tabla 4. Tiempos escogidos para exposición a Intemperie natural directa en la ciudad de Bogotá, aplicada a fibras o piezas de guadua rolliza *Angustifolia Kunth*

Tiempo de Exposición	Horas	Días	Meses
T0	0	0	0
T1	7608	317	10.6

6.4.1. Cuantificación de los resultados

En las propiedades Físicas pertenecientes a pesos específicos y contenido de humedad se busca correlacionar esta pérdida de densidad y cambio de contenido de humedad en función del tiempo de exposición a la intemperie con la resistencia a la tracción de la guadua.

Para la parte mecánica, se realizará un análisis estadístico a fin de encontrar la función que mejor se ajuste y proyecte a futuro la resistencia última de la guadua rolliza basa y sobrebasa, al igual que la variabilidad de los módulos de elasticidad.

De acuerdo a las variables en estudio, La Tabla 5 muestra la matriz de ensayos, que para esta investigación contiene el tipo de ensayos y el número de probetas falladas.

Tabla 5. Matriz de ensayos: Peso Específico (P.E), Contenido de Humedad (C.H). Ensayo de Tensión (E.T). en especímenes Basa y Sobrebasa para tiempos T0 y T1.

ESPECIMEN GUADUA	T0			T1		
	C.H.	P.E.	ET	C.H.	P.E.	ET
Basa sin Cubierta	4	4	4	4	4	4
Sobrebasa sin Cubierta	4	4	4	4	4	4
Basa con Cubierta C1 (Impranol)	2	2	4	2	2	4
Sobrebasa con Cubierta C1 (Impranol)	2	2	4	2	2	4
Basa con Cubierta C2 (Barnex)	2	2	4	2	2	4
Sobrebasa con Cubierta C2 (Barnex)	2	2	4	2	2	4

7. MATERIALES Y EQUIPOS

7.1. Selección del espécimen

Siendo el intemperismo un fenómeno estudiado en nuestro medio y su efecto adverso en los materiales expuestos, tales como el acero y concreto reforzado. Se quiso profundizar en un material orgánico, el cual podría competir en duramen. Por lo anterior y dado que la guadua en nuestro país, es un material muy usado en la construcción de todo tipo de estructuras, se debe garantizar que un alto índice de resistencia a los factores abióticos que están implícitos en la intemperie.

Es de resaltar que la Guadua, está constituida en un gran porcentaje por fibras las cuales ofrecen alta resistencia a esfuerzos de tensión, está a su vez contiene un cementante natural que brinda rigidez, estabilidad y resistencia a la compresión como polímero natural formado por procesos aleatorios de polimerización y que se conoce como lignina, el cual está embebido en una matriz de lamela media compuesta por pectinas, también contiene al igual que otros productos maderables celulosa y hemicelulosa, estos últimos polisacáridos. La lamela media, lignina celulosa y hemicelulosa son los responsables de mantener intactas las fibras al ataque de la luz solar, agua y temperatura. Sin embargo, a exposiciones prolongadas termina siendo insuficiente este tipo de protección natural, al efecto inclemente del ambiente [46].

Es importante conocer las partes de la guadua rolliza para saber que fracciones del espécimen se van a ensayar, las cuales se denominan rizoma, cepa, basa, sobrebasa, varillón y copo. El rizoma es la parte de la guadua que se encuentra por debajo del nivel del suelo, empotrando esta especie, a continuación aparece la cepa cuyo diámetro es grande y es gruesa en su pared puesto que le da su estabilidad y verticalidad, luego viene la basa y sobrebasa con diámetro más reducidos, uno del otro, y las cuales se emplean más para fines estructurales, el varillón y el copo no se emplean en este tipo de ensayos, puesto que su contenido de lignina es bajo y no se utiliza en construcción [46].

De acuerdo con lo anterior, se quiere determinar la manera en que el material se degrada y a su vez medir el grado de degradación que puede presentar la Guadua Rolliza a la exposición de los tres factores más importantes que generan intemperismo.

Según lo anteriormente expuesto, las partes de interés serán la basa y sobrebasa, por su alto grado de utilización en la parte ingenieril y por su alto contenido de lignina celulosa y hemicelulosa, componentes que se destruyen con la exposición al ambiente la Figura 20 presenta las partes que constituyen el cuerpo de la guadua.

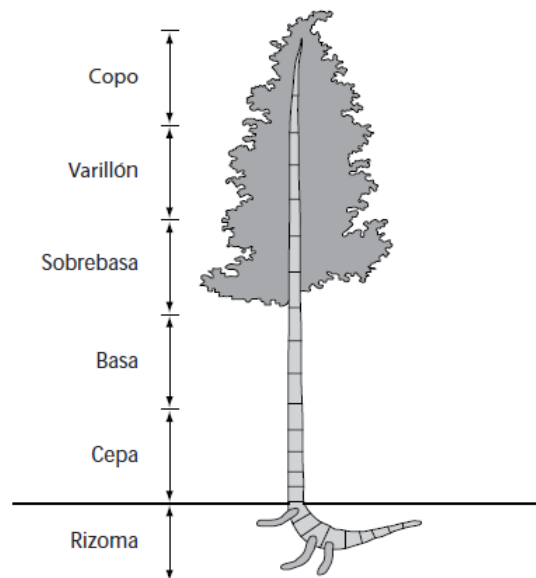


Figura 20. Partes del tallo de la guadua

Para el presente trabajo se emplearon probetas obtenidas de la basa y la sobrebasa, esta ultima catalogada como un material mozo. En La Figura 21, se muestran las probetas de guadua en blanco o en su presentación natural sin ningún tipo de recubrimiento. En la Figura 22 las probetas con cubierta C1 (Impranol) lasur de color café oscuro y la Figura 23 las probetas cubiertas con C2 (Barnex) Barniz transparente.



Figura 21. Especímenes de guadua en blanco (sin cubierta) con exposición T=7608 horas



Figura 22. Probetas de guadua con cubierta C1 (Impranol) con exposición T1=7608 horas



Figura 23. Probetas de guadua con cubierta C2 (Barnex) con exposición T1=7608 horas

7.2. Geometría del espécimen

La geometría de los especímenes propuestos, se determinó luego de establecer el equipo en el cual se realizan los ensayos de tracción en las fibras paralelas a los especímenes. Con base en ello, la probeta cuenta con un ancho de 20 mm en su parte más alejada del nudo, luego muestra una zona curva de transición y continua con un adelgazamiento hasta 10 mm en una extensión promedio de 120mm, el espesor de la misma es de 10 mm a excepción del nudo donde cuenta con un engrosamiento a 15 mm. La Figura 24 muestra con más detalle la descripción y dimensiones de los especímenes a degradar y en la Tabla 6 se encuentra consignada la información técnica de cada una de las probetas.

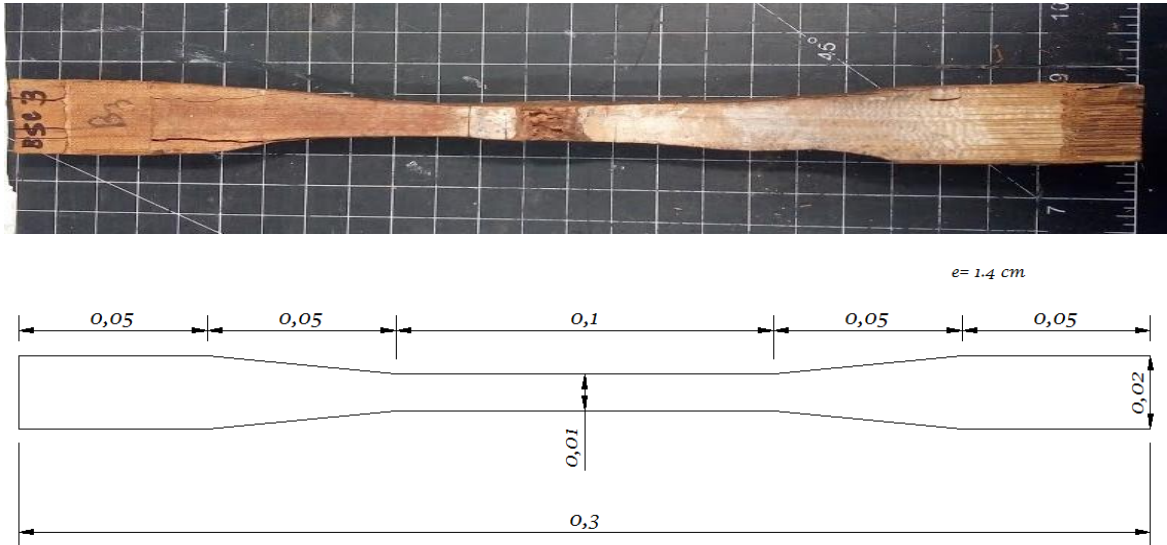


Figura 24. Geometría en cm de la muestra, que se someterá a un proceso de degradación por intemperismo natural y a la cual se le realizará mediciones de resistencia a la tensión.

Tabla 6. Información técnica de las probetas a fallar para Basa y Sobrebasa con cubiertas C1 y C2.

BASA	SIN PROTECCIÓN			CUBIERTA C1 IMPRANOL			CUBIERTA C2 BARNEX		
PROBETA	B-M1	B-M2	B-M3	B-M1	B-M2	B-M3	B-M1	B-M2	B-M3
Velocidad ensayo (mm/min)	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Longitud efectiva (mm) =	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Distancia entre mordazas (mm)	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Tipo fabricación de probeta	Corbatin	Corbatin	Corbatin	Corbatin	Corbatin	Corbatin	Corbatin	Corbatin	Corbatin
Ancho nominal probetas (mm)	12,41	12,30	12,52	13,27	13,30	13,24	12,21	12,18	12,24
Espesor nominal probetas (mm)	10,56	10,57	10,55	9,17	9,14	9,20	10,28	10,25	10,31
Humedad Relativa (%)	52,40	52,35	52,45	52,60	52,55	52,66	52,60	52,5	52,69
Temperatura ambiente (°C)	22,40	22,38	22,42	22,00	22,01	21,99	22,10	22,12	22,07

SOBREBASA	SIN PROTECCIÓN			CUBIERTA C1 IMPRANOL			CUBIERTA C2 BARNEX		
PROBETA	SB-M1	SB-M2	SB-M3	SB-M1	SB-M2	SB-M3	SB-M1	SB-M2	SB-M3
Velocidad ensayo (mm/min)	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Longitud efectiva (mm) =	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Distancia entre mordazas (mm)	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Tipo fabricación de probeta	Corbatin	Corbatin	Corbatin	Corbatin	Corbatin	Corbatin	Corbatin	Corbatin	Corbatin
Ancho nominal probetas (mm)	12,67	12,58	12,76	13,52	13,79	13,25	11,74	11,78	11,7
Espesor nominal probetas (mm)	8,84	8,83	8,85	8,3	8,38	8,22	8,52	8,57	8,47
Humedad Relativa (%)	53,1	53,20	53,00	53	52,98	53,02	53,60	53,56	53,65
Temperatura ambiente (°C)	22	21,99	22,02	22	22,01	21,99	21,90	21,79	22,00

7.3. Equipos

Cada fuente de luz tiene sus propias ventajas y desventajas inherentes de las cuales un experimentador de intemperismo debe estar enterado. Puesto que la energía radiante recibida por un material expuesto se considera la más importante, enfocándose en la calidad de la fuente de luz, como la luz natural del sol y su efecto sobre el material.

7.3.1. Equipo a tensión

Para poder medir la disminución de las propiedades mecánicas en la guadua rolliza sometida a intemperismo natural directo, se utilizó una máquina de prueba MTS, bajo la normatividad ASTM D638 ASTM D3039, el cual establece el procedimiento correcto para ensayos en madera, en este caso tensión paralela a la fibra. La velocidad de aplicación de la carga en el ensayo fue de 2mm/min, y se midió el esfuerzo “ σ ” en la longitud adelgazada contra la deformación unitaria “ ϵ ”, se obtuvo esfuerzos y módulos de elasticidad “E”. En la Figura 25 se observa el tipo de maquina MTS a emplear.

8. RESULTADOS

8.1. Cálculo de las propiedades físicas en función del tiempo de exposición

Para medir la degradación física de la guadua rolliza sometida a intemperismo natural directo en la ciudad de Bogotá, se realizaron ensayos de densidad y contenido de humedad, bajo las normas ASTM D2395 [33] y D4442 [24], en lo referente a las propiedades físicas.

Por lo anterior, se tomó un número determinado de probetas para los tiempos de exposición a intemperismo natral directo de T0 = 0 horas y T1 = 7608 horas, a las cuales se les determino mediante ensayos de laboratorio, el peso inicial seco y los volúmenes teniendo en cuenta el tipo de espécimen (basa y sobrebasa), el tratamiento o cubierta (Impranol o Barnex) aplicado para disminuir el deterioro de las superficies expuestas, además de los especímenes sin protección. Con base en las mediciones realizadas en el laboratorio de ingeniería de la Universidad Santo Tomás, en la Tabla 7 se muestran los resultados físicos obtenidos para las variables en estudio.

Tabla 7. Resultados propiedades físicas, Basa y Sobrebasa, para T0 y T1, probetas en blanco, con Cubierta C1 (Impranol de Durespo) y Cubierta C2 (Barnex de Pintuco).

T	ESPECIMEN	BASA			SOBREBASA		
	CUBIERTA	Contenido de humedad (%)	Peso específico (gf/cm3)	Densidad (gm/cm3)	Contenido de humedad (%)	Peso específico (gf/cm3)	Densidad (gm/cm3)
T0 = 0 HORAS	SIN	9,68	0,7876	0,000803	9,20	0,7518	0,000766
	desv Est	0,61	0,08	0,08	0,14	0,06	0,06
	C.V.	6,30%	9,73%	9,73%	1,54%	8,11%	8,11%
	CUBIERTA 1	9,50	0,8589	0,000876	9,52	0,7880	0,000803
	desv Est	0,14	0,07	0,07	0,10	0,04	0,04
	C.V.	1,49%	7,89%	7,89%	1,06%	4,61%	4,61%
	CUBIERTA 2	9,69	0,7925	0,000808	9,63	0,7441	0,000758
	desv Est	0,12	0,01	0,01	0,24	0,03	0,03
	C.V.	1,26%	1,73%	1,73%	2,54%	3,57%	3,57%
T1 = 7608 HORAS	SIN	18,35	0,6500	0,000663	16,63	0,7325	0,000747
	desv Est	0,30	0,08	0,08	0,21	0,07	0,07
	C.V.	1,65%	12,64%	12,64%	1,26%	9,17%	9,17%
	CUBIERTA 1	18,94	0,6900	0,000703	17,14	0,7025	0,000716
	desv Est	0,82	0,09	0,09	0,63	0,04	0,04
	C.V.	4,35%	13,00%	13,00%	3,66%	5,07%	5,07%
	CUBIERTA 2	19,99	0,6600	0,000673	18,27	0,6050	0,000617
	desv Est	1,13	0,04	0,04	0,47	0,03	0,03
	C.V.	5,64%	5,77%	5,77%	2,55%	5,78%	5,78%

Como se observa en la Tabla 7, el espécimen basa sin protección pierde peso específico a medida que se expone a los factores de intemperismo natural directo, esto significa que el material se vuelve menos denso. De la misma manera, se pudo observar la ocurrencia del mismo fenómeno

en las probetas protegidas previamente con C1 (Impranol) y C2 (Barnex). Con referencia a los contenidos de humedad es evidente el incremento que genera la exposición continua de la guadua GAK a los efectos propios del intemperismo natural directo en la ciudad de Bogotá, dado que, contrario a las densidades, los contenidos de humedad se incrementaron con el paso del tiempo de exposición [9]. Las Figuras 25 y 26 muestran la reducción de peso específico y el incremento porcentual en el contenido de humedad.

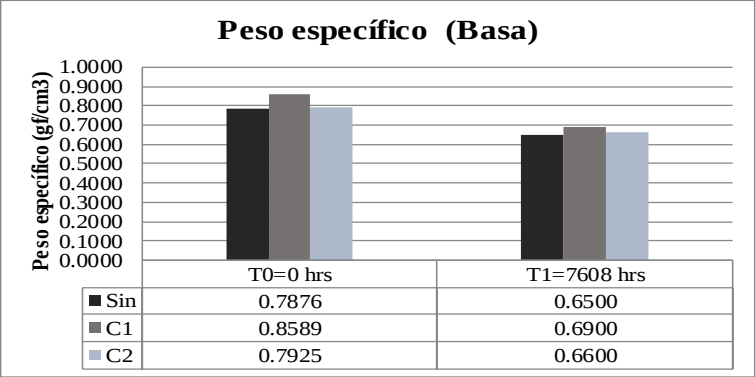


Figura 25. Reducción del peso específico que presenta la guadua rolliza tipo Basa para especímenes en blanco, con protección C1 (Impranol) y C2 (Barnex), al ser sometidas a intemperismo natural directo durante T1.

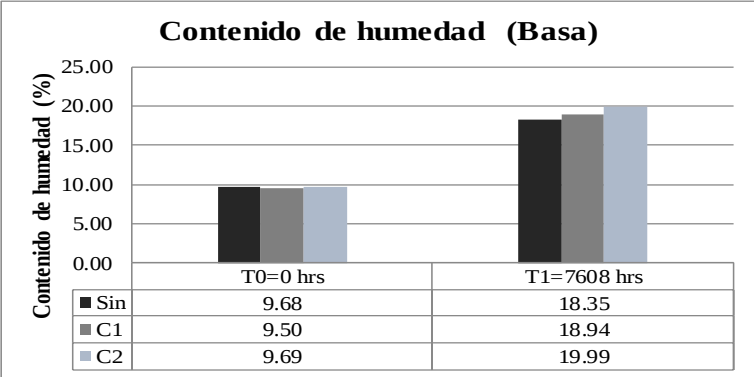


Figura 26. Incremento porcentual del contenido de humedad, que presento la guadua rolliza tipo Basa para especímenes en blanco y con protección C1 (Impranol) y C2 (Barnex), al ser sometidas a intemperismo natural directo durante T1.

Las gráficas, permiten observar que el peso específico y contenido de humedad mantiene una relación inversamente proporcional con respecto al tiempo de exposición, lo que traduce que además de pasar a ser menos denso, aumenta su propiedad de higroscopicidad a medida que se incrementa el tiempo de exposición [10].

El mismo análisis se realizó para los especímenes de sobrebasa, obteniéndose similares resultados, disminución de los pesos específicos e incremento en más del 80% de los contenidos de humedad al final de las 7608 horas de exposición natural directa. A diferencia de la Basa, los pesos específicos se estabilizan y presentan una variación muy baja al finalizar el T1. Las Figuras 27 y 28 muestran la reducción de peso específico e incremento del contenido de humedad que sufren las probetas de guadua rolliza *Angustifolia Kunth* GAK.

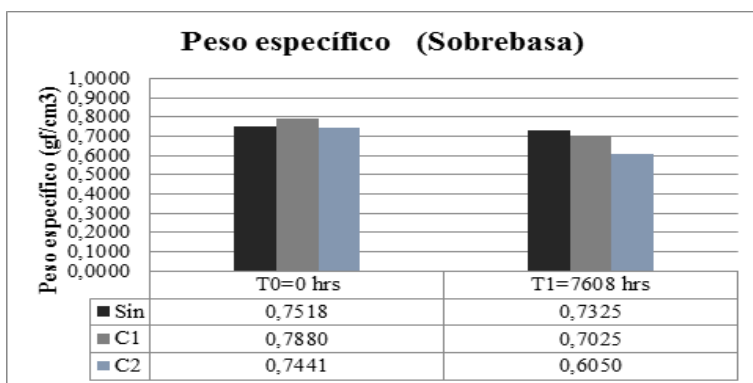


Figura 27. Reducción del peso específico que presenta la guadua rolliza tipo Sobrebasa para especímenes en blanco, con protección C1 (Impranol) y C2 (Barnex), al ser sometidas a intemperismo natural directo durante T1.

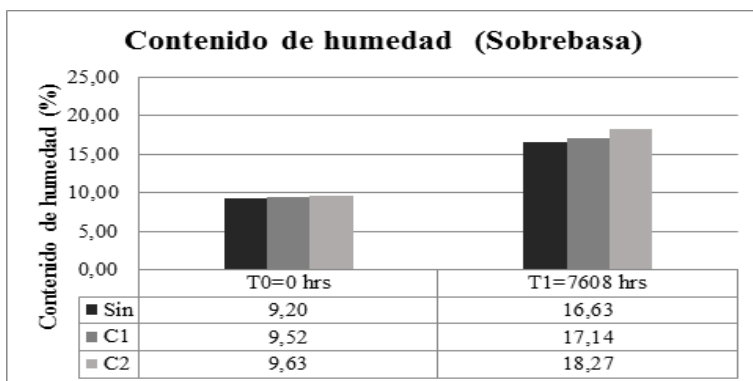


Figura 28. Incremento porcentual del contenido de humedad, que presento la guadua rolliza tipo Sobrebasa para probetas en blanco y con protección C1 (Impranol) y C2 (Barnex) al ser sometidas a intemperismo natural directo durante T1.

8.2. Cálculo de las propiedades mecánicas en función del tiempo de exposición

Para el cálculo de las propiedades mecánicas de los especímenes, se realizaron ensayos a tracción de acuerdo a las normas ASTM-D638 y ASTM D3039 las cuales establecen parámetros, como velocidad de aplicación de la carga (2mm/min) tiempo del ensayo alusivo de 2 a 10 min,

control de las muestras antes de ensayarlas, observación del tipo de cuña de falla para tener en cuenta si el ensayo es correcto o se debe descartar. La geometría de la probeta basada en la norma, con unas pequeñas variaciones cuando se excede el espesor y la longitud recomendadas, todo acorde con el modelo matemático necesario, para que la transmisión de esfuerzos sea la correcta y las probetas fallen por el centro de la zona libre [37].

Cada probeta se llevó a la falla, incrementando la carga de forma uní-axial, a lo largo del eje longitudinal del espécimen (paralela a la fibra) y a la velocidad ya mencionada, con este tipo de ensayo lo que se quiere conocer es la carga máxima que resiste cada espécimen para determinar el esfuerzo de fluencia “ σ_y ”, calcular mediante la pendiente de la curva esfuerzo “ σ ” – deformación “ ϵ ” el módulo de elasticidad “ E ” y el esfuerzo último o de falla “ σ_u ”, para ello se fallaron un total de 48 Probetas, 24 basas y 24 sobrebasas, en blanco o sin protección y con dos clases de tratamiento protector C1 (Impranol) y C2 (Barnex), para los tiempos de exposición T0 y T1. La veracidad de los resultados obtenidos, fueron evaluados mediante el cálculo estadístico de la media aritmética, desviación estándar y el coeficiente de variación, además de la incertidumbre en la medición, definida como el intervalo estadístico dentro del cual se tiene una probabilidad de que se encuentre el valor verdadero; por tanto, se puede afirmar que la incertidumbre es en cierta medida subjetiva y se debe tomar como la duda que se tiene del resultado de la medición, debido a los errores que se cometen y que no se corrigen.

Para la presente investigación y acorde a las normas ASTM-D638 y ASTM D3039 se optó por confiabilidad de 99.70%, con una $\alpha=0.003\%$ y un intervalo de confianza calculado mediante la función “Intervalo de confianza (α, σ, n)” procesada en una hoja electrónica del Software Excel.

Dónde:

$$\alpha = (1-99.7\%) = 0.003$$

s = Desviación estándar

n = Tamaño de la muestra

En la Figura 30, se observar el valor estadístico de “ α ” dependiendo el valor en porcentaje de confiabilidad adoptada para validar los datos.

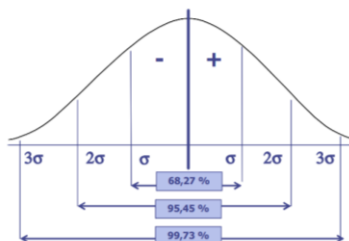


Figura 29. Distribución normal, estimación de la incertidumbre.

El ensayo a tracción realizado, no es el más calificados para determinar el nivel de deterioro de los especímenes en estudio por tratarse de un material ortotrópico, pero si, permite obtener un estimado del tiempo de vida útil del diseño en términos de resistencia de una estructura elaborada con guadua *Angustifolia Kunth* GAK, De la misma forma, podemos proponer métodos de cuidado para estructuras de este tipo, a fin de minimizar la destrucción de la pared celular, retardando la reducción sus propiedades mecánicas. La Figura 30 muestra el montaje de las probetas de guadua rolliza GAK, en la maquina MTS Instron empleada para realizar los ensayos a tracción.



Figura 30. Ensemble del ensayo a tensión paralelo a la fibra en la máquina de prueba MTS Instron, Longitud entre mordazas oscilante entre 13 a 16 cm, deformímetro de 25 mm, duración de 3 a 10 min.

Según lo prescrito en la norma, se tomó registro de los tipos de falla que presentaron las probetas, observándose que la cuña de falla del 90% de las probetas fue por el nudo a 45°, la Figura 31 muestra la falla tipo que se presentó en la mayoría de ensayos, al periodo de exposición T0.



Figura 31. Cuña de falla en el nudo con un ángulo de 45° en probetas en blanco sin cubierta protectora para el tiempo de exposición T0.

Se registro la falla de las probetas basa y sobrebasa al tiempo de exposición T1, para las probetas sin tratamiento, con protección C1-Impranol y C2-Barnex Las Figuras 32, 33 y 34 muestran la línea de falla que presentaron las probetas.

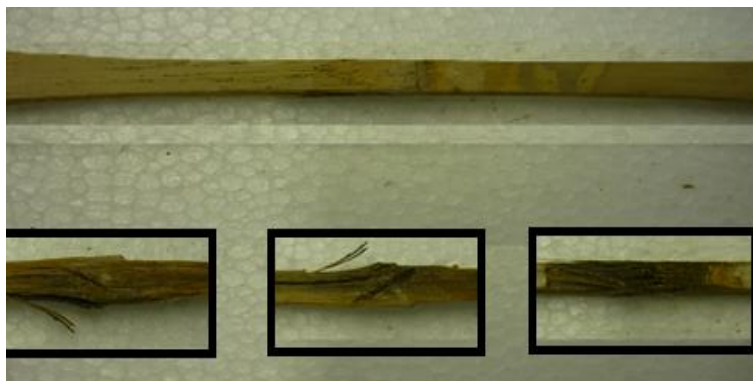


Figura 32. Cuña de falla en el nudo con un ángulo de 45° en probetas en blanco sin cubierta protectora para el tiempo de exposición T1=7608 horas.



Figura 33. Cuña de falla en el nudo con un ángulo de 45° en probetas con cubiertas con C1 (Impranol), para el tiempo de exposición T1=7608 horas.

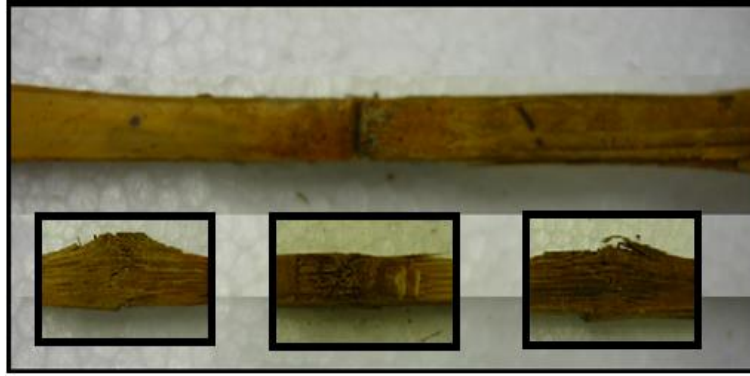


Figura 34. Cuña de falla en el nudo con un ángulo de 45° en probetas con C2 (Barnex), para el tiempo de exposición T1=7608 horas.

Con base en la literatura consultada y el marco teórico, se espera una disminución en los esfuerzos máximos resistidos por la guadua, valores que se exponen en detalle a continuación (Zhang J., Zeng Q., Yu T., et al., 2001) [6]. La Tabla 8 muestra el resumen de los valores promedio obtenidos de los ensayos a tracción paralela a las fibras de la guadua para los tiempos T0 y T1, en lo referente a esfuerzos máximos de fluencia “ σ_y ”, módulos de elasticidad “E” deformaciones unitarias “ ϵ_u ” y esfuerzos últimos “ σ_u ” para los especímenes sin cubierta, y con cubiertas C1(Impranol) y C2 (Barnex).

Tabla 8. Resultados propiedades mecánicas σ_y , E, ϵ_u , σ_u , para especímenes de Basa y Sobrebasa para T0 y T1.

T	ESPECIMEN	BASA				SOBREBASA			
	TIPO CUBIERTA	Esfuerzo de Fluencia σ_y (MPa)	E (Gpa)	Deformación Unitaria ϵ_u	Esfuerzo Último σ_u (MPa)	Esfuerzo de Fluencia σ_y (Mpa)	E (Gpa)	Deformación Unitaria ϵ_u mm/mm	Esfuerzo Último σ_u (MPa)
T0= 0 hrs	SIN	106,69	12,58	0,008484	74,108	108,24	12,23	0,008851	75,823
	Desv Est	9,43	1,95	0,0020	25,937	6,60	0,86	0,0023	36,595
	CV	8,83%	15,52%	22,93%	35,00%	6,10%	7,05%	20,07%	48,26%
	CUBIERTA 1	106,69	12,58	0,008484	74,108	108,24	12,23	0,008851	75,823
	Desv Est	9,43	1,95	0,0020	25,937	6,60	0,86	0,0023	36,595
	CV	8,83%	15,52%	22,93%	35,00%	6,10%	7,05%	20,07%	48,26%
	CUBIERTA 2	106,69	12,58	0,008484	74,108	108,24	12,23	0,008851	75,823
	Desv Est	9,43	1,95	0,0020	25,937	6,60	0,86	0,0023	36,595
	CV	8,83%	15,50%	22,93%	35,00%	6,10%	7,05%	20,07%	48,26%
T1= 7608 hrs	SIN	23,89	20,33	0,00117	6,395	21,19	15,51	0,00137	16,145
	Desv Est	5,46	5,64	0,0005	1,697	5,86	3,82	0,0001	12,758
	CV	22,85%	27,72%	43,19%	26,54%	27,65%	24,61%	10,93%	79,02%
	CUBIERTA 1	21,62	14,46	0,0015	8,385	28,67	20,00	0,0014	10,247
	Desv Est	6,50	7,31	0,0006	3,051	7,43	1,88	0,0005	3,078
	CV	30,05%	50,54%	38,06%	36,38%	25,91%	9,39%	37,18%	30,04%
	CUBIERTA 2	15,12	24,74	0,000611	6,203	38,96	11,19	0,0035	30,393
	Desv Est	2,21	6,88	0,000218	2,108	1,26	4,25	0,0018	24,436
	CV	14,60%	27,80%	35,67%	33,99%	3,23%	38,02%	51,83%	80,40%

Las Figuras 35, 36, 37, 38, 39 y 40 muestran las curvas de esfuerzo - deformación correspondientes a todos los ensayos de tracción realizados para los periodos de exposición T0, en probetas de guadua rolliza sin protección y con cubiertas C1 y C2, para un total de 24 probetas falladas.

Las curvas esfuerzo - deformación permiten obtener los valores iniciales de esfuerzo de fluencia “ σ_y ”, esfuerzo último o de falla “ σ_u ” para la muestra patrón o de referencia contra la cual comparar los resultados al finalizar T1.

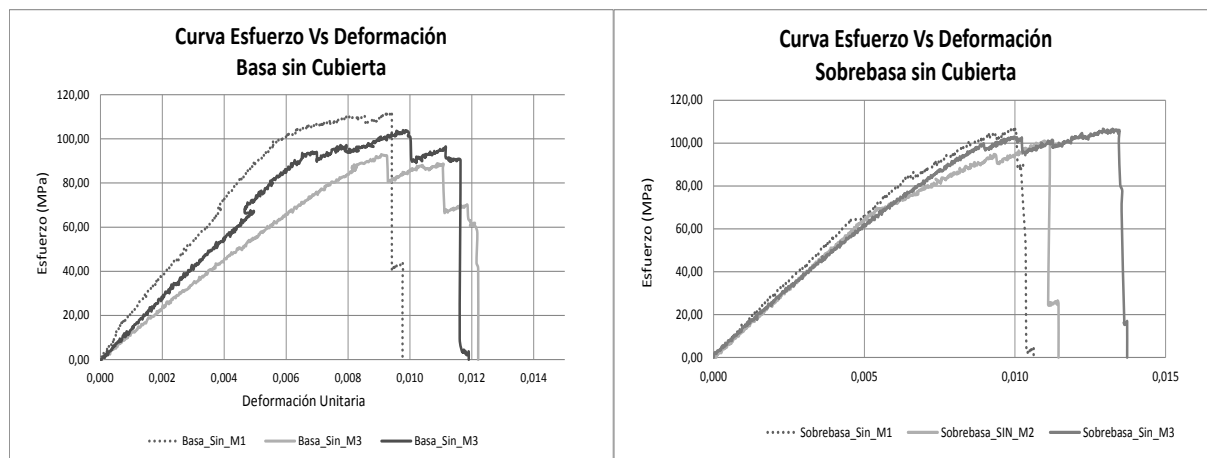


Figura 35. Curvas de σ , ϵ_y , para Basa y Sobrebasa sin cubierta correspondiente a ensayos de tracción realizados para un periodo de exposición T0.

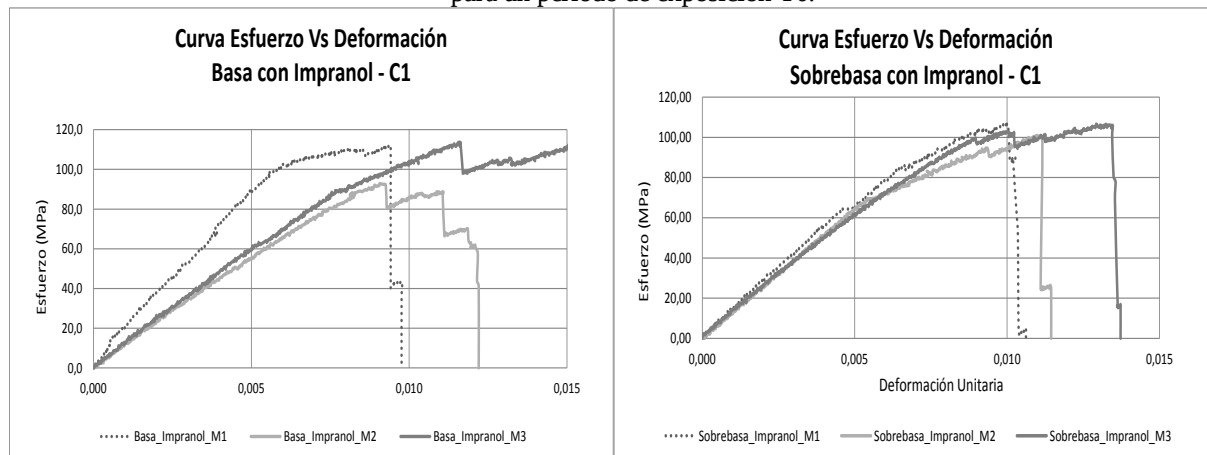


Figura 36. Curvas de σ , ϵ_y , para Basa y Sobrebasa con C1 (Impranol) correspondiente a ensayos de tracción realizados para un periodo de exposición T0.

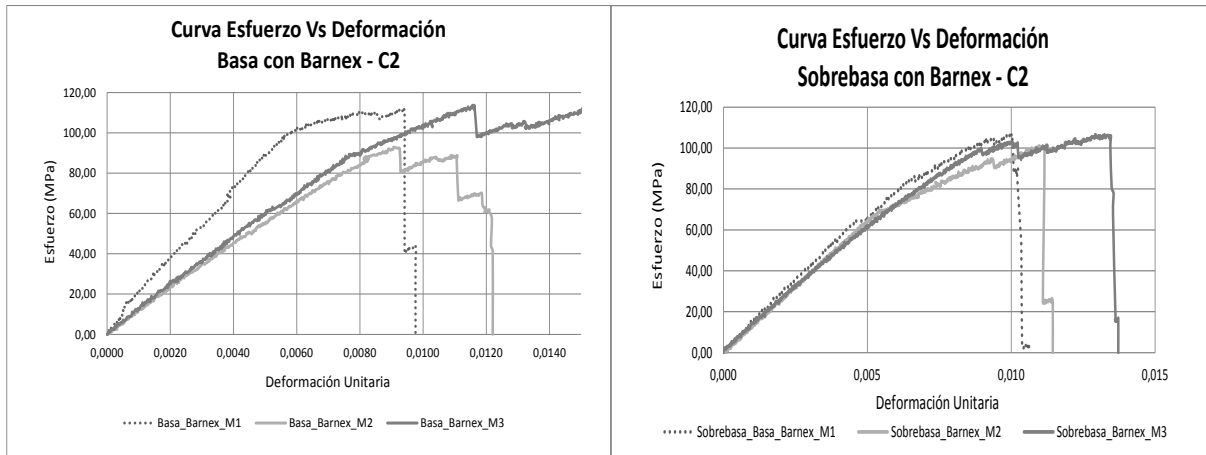


Figura 37.. Curvas de σ , ϵ_y , para Basa y Sobrebasa con C2 (Barnex) correspondiente a ensayos de tracción realizados un periodo de exposición T0.

Las Figuras 38, 39 y 40 muestran las curvas de esfuerzo-deformación correspondientes a todos los ensayos de tracción realizados para los periodos de exposición T1= 7608 horas, en probetas de guadua rolliza sin protección y con cubiertas C1 y C2, para un total de 24 probetas falladas. Las curvas esfuerzo - deformación permiten obtener los valores finales de esfuerzo de Fluencia “ σ_y ” en el punto de inflexión de la curva y el esfuerzo último o de rotura. Lo anterior se realizó para evidenciar la perdida de resistencia del material expuesto a factores abióticos de intemperismo natural directo en la ciudad de Bogotá al finalizar T1.

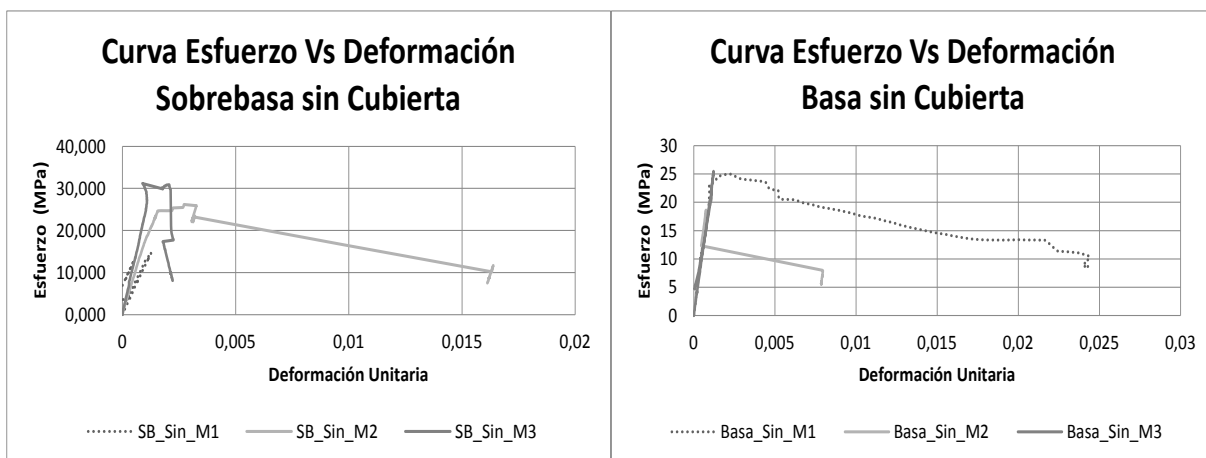


Figura 38. Curvas de σ , ϵ_y , para Basa y Sobrebasa sin cubierta correspondiente a ensayos de tracción realizados para un periodo de exposición T1=7608 horas.

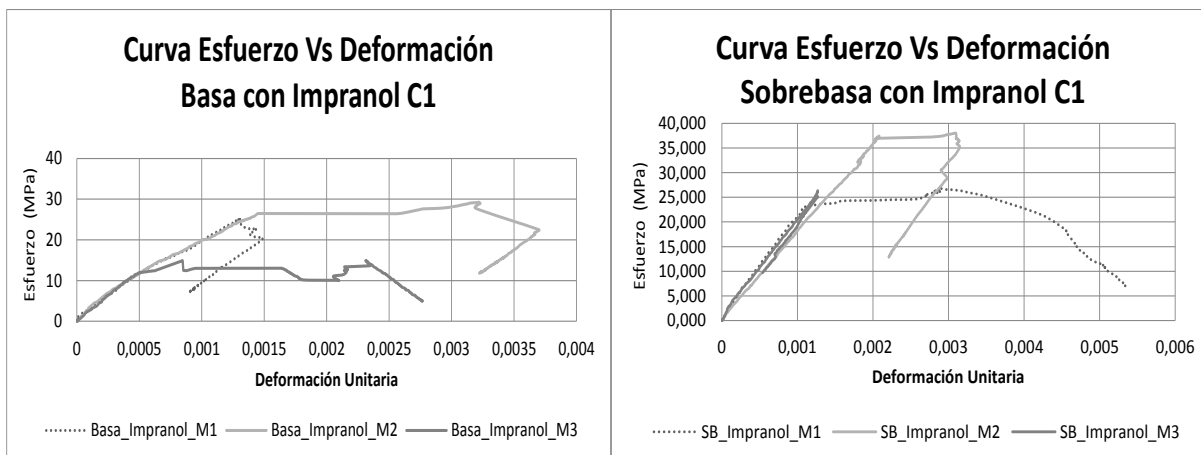


Figura 39.. Curvas de σ , ϵ_y , para Basa y Sobrebasa con C1 (Impranol) correspondiente a ensayos de tracción realizados para un periodo de exposición $T_1=7608$ horas.

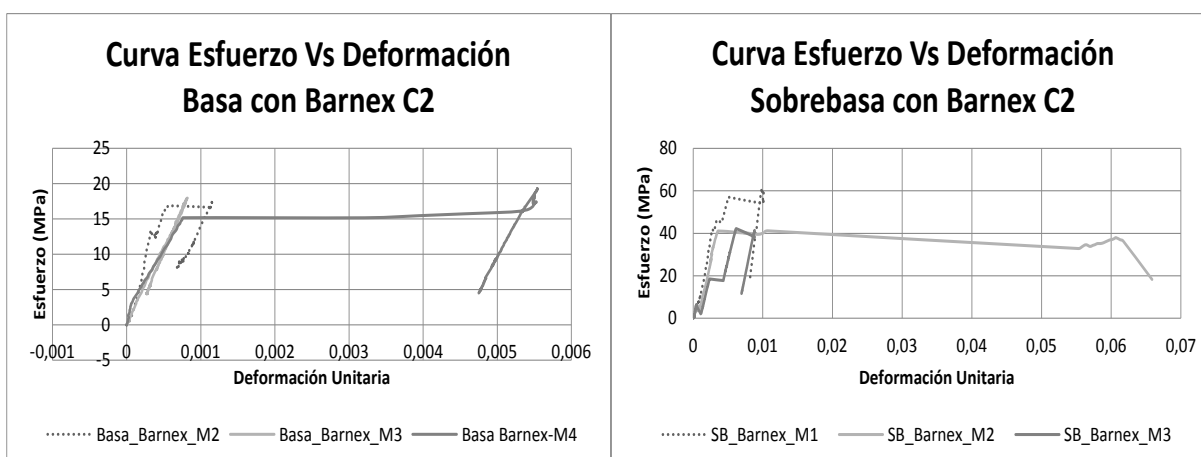


Figura 40. Curvas de σ , ϵ_y , para Basa y Sobrebasa con C2 (Barnex) correspondiente a ensayos de tracción realizados para un periodo de exposición $T_1=7608$ horas.

En las Figuras 40 y 41 se muestran los valores para el esfuerzo de fluencia “ σ_y ” obtenidos para los tiempos T_0 y T_1 . A finalizar las 7608 horas de exposición natural directa, los especímenes tipo basa y sobrebasa presentan una marcada disminución del “ σ_y ” afectando la resistencia mecánica de la guadua.

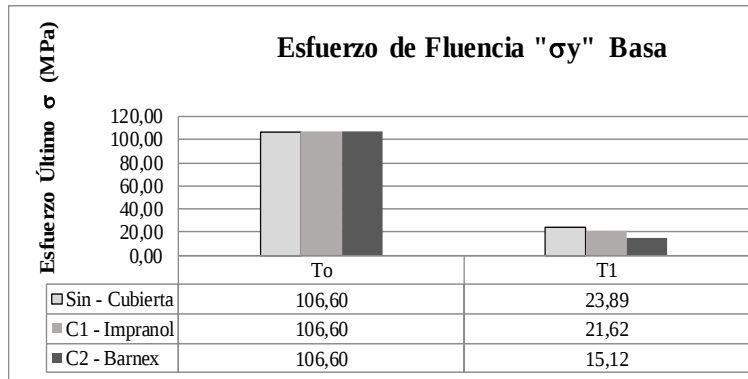


Figura 41. Reducción del esfuerzo de fluencia “ σ_y ” para Basa en función del tiempo de exposición T0 y T1 para la guadua rolliza sin protección y con cubiertas C1 y C2

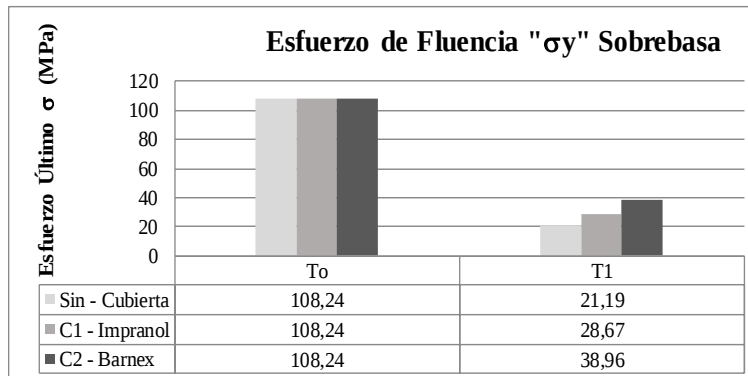


Figura 42. Reducción del esfuerzo de fluencia “ σ_y ” para Sobrebasa en función del tiempo de exposición T0 y T1 para la guadua rolliza sin protección y con cubiertas C1 y C2

Dado que el comportamiento inicial de las curvas Esfuerzo σ - Deformación ε , no se acoplan en su totalidad a una línea recta en la zona elástica. Los valores iniciales para la obtención del Módulo de Elasticidad “E” se ajustaron empleando líneas de tendencia aplicadas a las gráficas.

De acuerdo con lo anterior, se tomó el punto de inflexión (Esfuerzo de Fluencia) en cada curva, recalculando la pendiente para cada línea, obteniendo así, una ecuación para cada recta, cuyos valores son autenticados mediante el coeficiente de determinación (R^2). Ver Tabla 9. En las Gráficas 43, 44 y 45 se observa las líneas de tendencia que permitieron ajustar los valores del Módulo de Elasticidad “E”, para los especímenes sin tratamiento y con cubiertas C1 y C2, transcurridas 7608 horas de exposición.

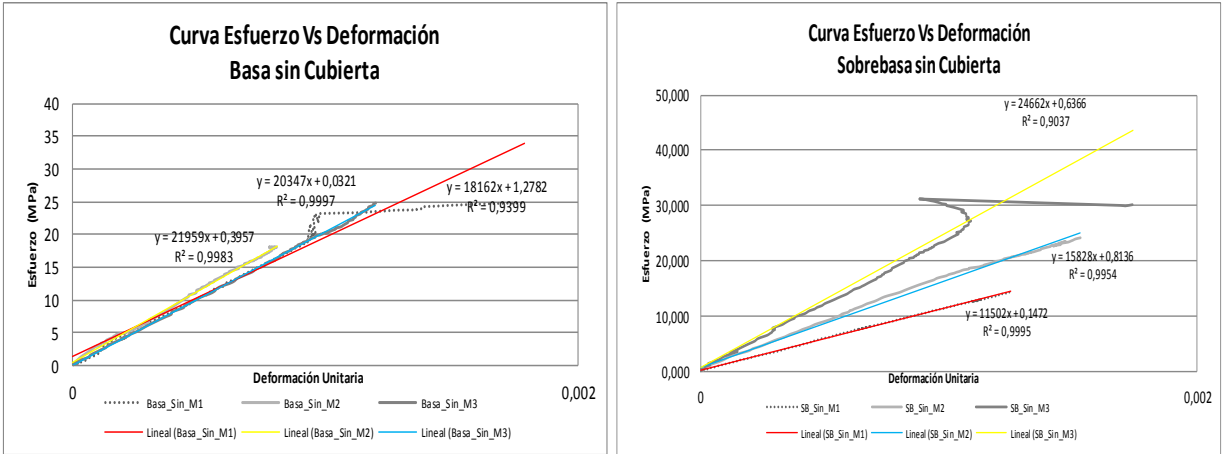


Figura 43. Curvas Esfuerzo “ σ ” – Deformación “ ε ” corregidas en el rango elástico para obtención de los Módulos de Elasticidad “E”, para Basa y Sobrebasa sin protección para T1.

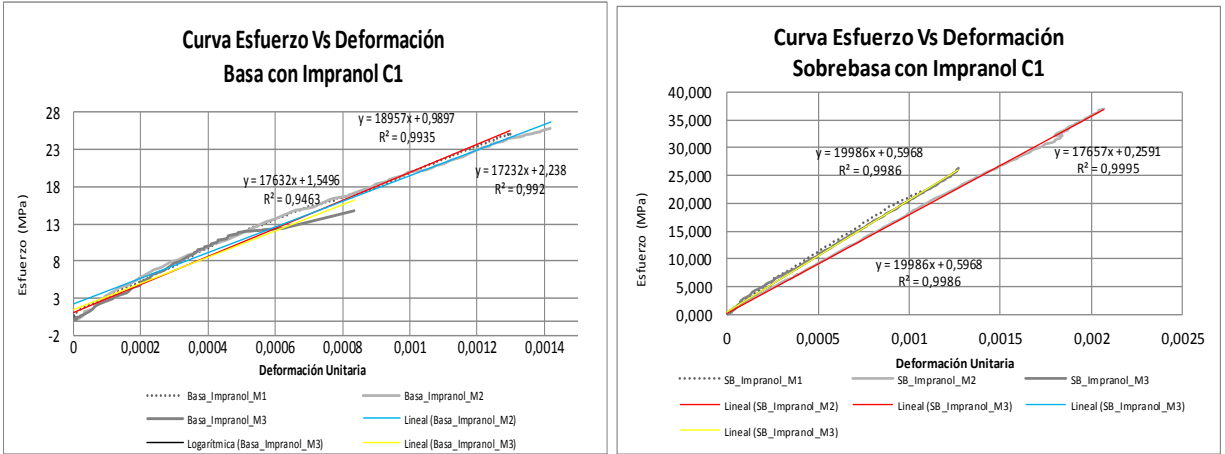


Figura 44. Curvas Esfuerzo “ σ ” – Deformación “ ε ” corregidas en el rango elástico para obtención de los Módulos de Elasticidad “E”, para Basa y Sobrebasa con protección C1-Impranol, para T1.

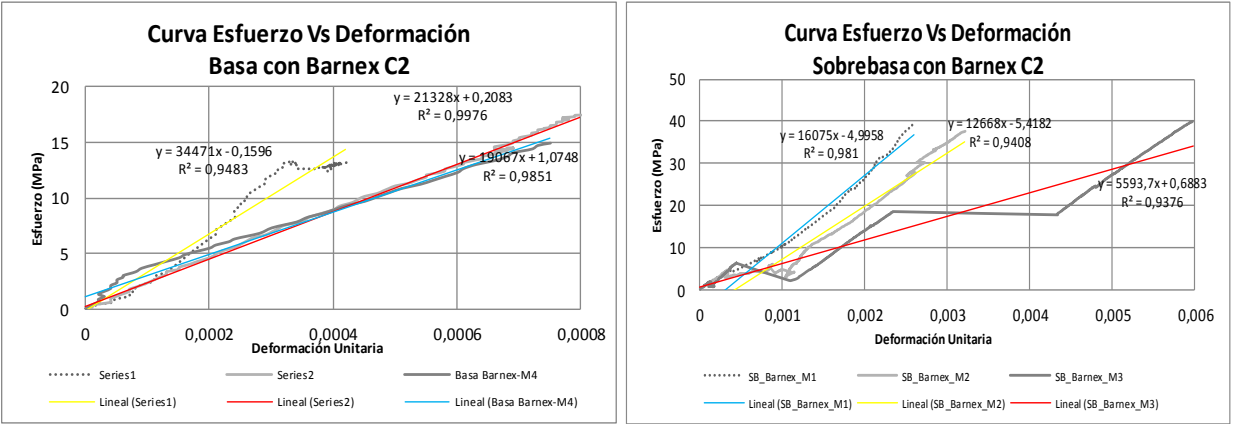


Figura 45. Curvas Esfuerzo “ σ ” – Deformación “ ε ” corregidas en el rango elástico para obtención de los Módulos de Elasticidad “E”, para Basa y Sobrebasa con protección C2-Barnex, para T1.

Tabla 9. Funciones de ajuste lineal para los Módulos de Elasticidad “E” calculados para especímenes Basa y Sobrebasa sin protección y con cubierta C1 y C2. para T1.

FORMULAS DE CORRELACIÓN LINEAL PARA MODULOS DE ELASTICIDAD "E" PARA T1			
Especímen	Cubierta	Función Lineal	Correlación (R ²)
Basa	Sin Protección	$y = 20347x + 0,0321$	0,9997
	C1 Impranol	$y = 18957x + 0,9897$	0,9935
	C2 Barnex	$y = 21328x + 0,2083$	0,9976
Sobrebasa	Sin Protección	$y = 11502x + 0,1472$	0,9995
	C1 Impranol	$y = 17657x + 0,2591$	0,9995
	C2 Barnex	$y = 16075x - 4,9958$	0,981

En las Figuras 46 y 47 se muestran los valores corregidos del Módulo de Elasticidad “E” obtenidos para los tiempos T0 y T1 para especímenes sin protección y cubierta C1 y C2. Al finalizar las 7608 horas de exposición natural directa, los especímenes tipo basa y sobrebasa presentan un incremento del módulo de elasticidad “E” haciendo que el material se vuelva rígido y por ende frágil.

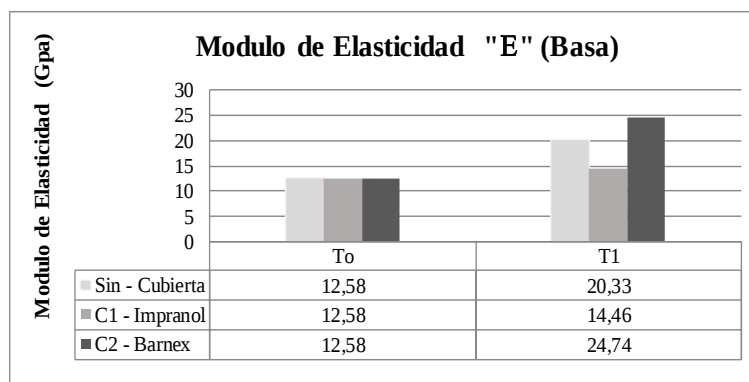


Figura 46. Incremento del módulo de elasticidad “E” para Basa en función del tiempo de exposición T0 y T1, para especímenes sin protección y con cubiertas C1 y C2.

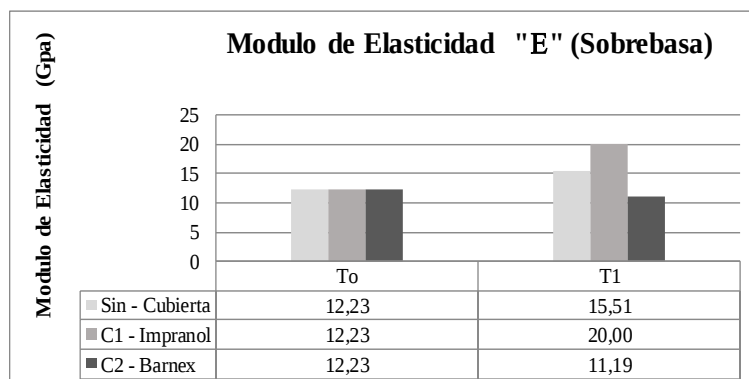


Figura 47. Incremento del módulo de elasticidad “E” para Sobrebasa en función del tiempo de exposición T0 y T1, para especímenes sin protección y con cubiertas C1 y C2.

También se midieron los desplazamientos unitarios en el rango elástico, donde se observó que a medida que los especímenes se veían más expuestos a condiciones naturales de intemperie, disminuyo su desplazamiento unitario, lo que indica que este rango se ve reducido. Es de resaltar que a las 7608 horas. La cubierta C1-Impranol, preservó las propiedades elásticas del material, aspecto atribuido a la coloración de la cubierta que evito que la irradiancia cumpliera su función de rompimiento de los enlaces químicos de las cadenas de lignina, celulosa y hemicelulosa, a diferencia que la C2. Barnex la cual, por ser una cubierta traslucida, no protegió el material de los factores de intemperismo.

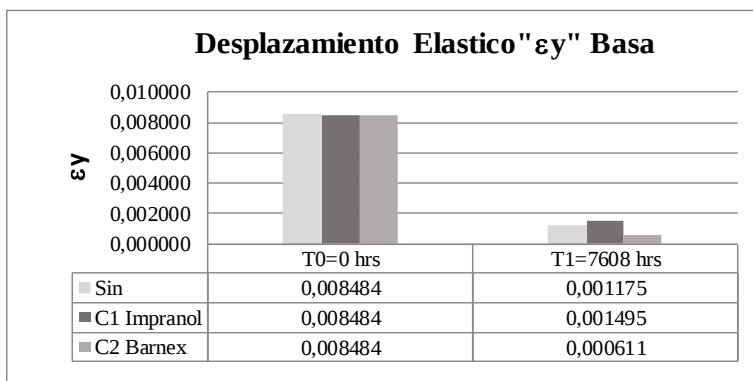


Figura 48. Desplazamiento Elástico " ϵ_y " para Basa en función del tiempo de exposición T0 y T1, para especímenes sin protección y con cubiertas C1 y C2.

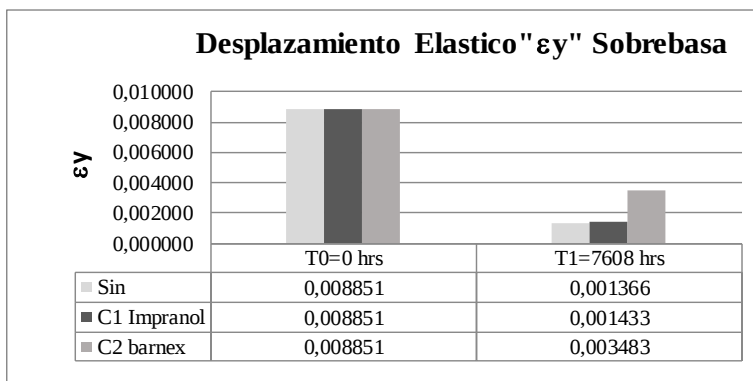


Figura 49. Desplazamiento Elástico " ϵ_y " para Sobrebasa en función del tiempo de exposición T0 y T1, para especímenes sin protección y con cubiertas C1 y C2.

En las Gráficas 50 y 51 se muestran los desplazamientos unitarios últimos " ϵ_u " para especímenes sin protección y con cubiertas C1 y C2. Los valores obtenidos se toman hasta el punto de esfuerzo ultimo " σ_u " o falla del espécimen. Transcurridas las 7608 horas (T1) de exposición a

intemperie natural, los desplazamientos se redujeron, lo que indica que este rango se ve reducido en la zona plástica, acercándose en algunos casos al rango elástico.

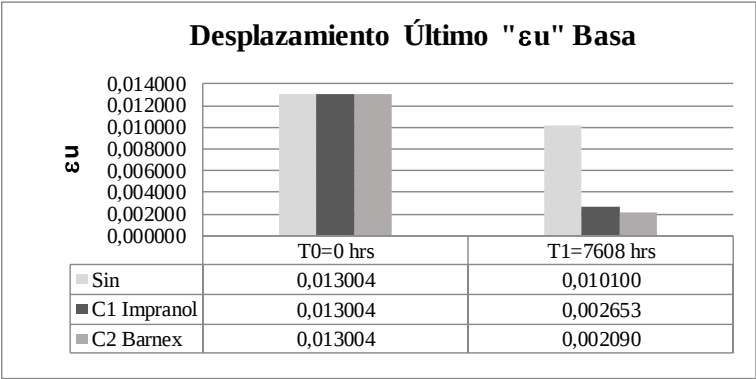


Figura 50. Desplazamiento Último “ ϵ_u ” para Basa en función del tiempo de exposición T0 y T1, para especímenes sin protección y con cubiertas C1 y C2.

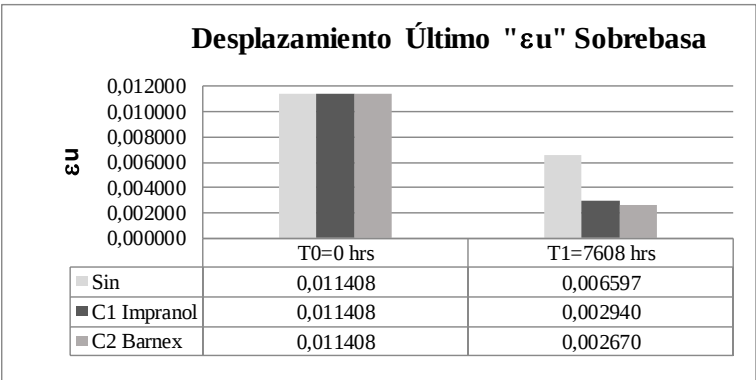


Figura 51. Desplazamiento Último “ ϵ_u ” para Sobrebasa en función del tiempo de exposición T0 y T1, para especímenes sin protección y con cubiertas C1 y C2.

9. ANALISIS DE RESULTADOS

Con el fin de ponderar los resultados obtenidos, los valores de Densidad, Peso Específico y Módulos de elasticidad “E” se compararon con los arrojados por los especímenes de guadua *Angustifolia Kunth* sin protección y con cubiertas C1-Impranol y C2-Barnex sometidos a factores abióticos de intemperie simulados en laboratorio para T0 y T2 =1325 horas de exposición, tal como, se referencia en el trabajo de Maestría “Deterioro mecánico físico – químico de la guadua rolliza sometida a factores abióticos de intemperie simulados en laboratorio” (Peña F., 2010) [47].

En la Tabla 7 y la Figura 25 se presentan los valores de peso específico y masa, para los tiempos de exposición T0 y T1. El espécimen basa sin recubrimiento sufre una disminución del peso específico de 0.14 grf/cm³ (17.47%) con relación a la condición inicial, seguido del espécimen con cubierta C1 (Impranol) con 0,17 grf/cm³ (19.67%), mientras que, para la cubierta C2 (Barnex) el valor se redujo en 0,13 grf/cm³ equivalentes al 16.8%. Lo anterior indica que las dos cubiertas C1 y C2, pierden su acción protectora con el paso del tiempo, siendo mayor la pérdida de peso específico para el espécimen con cubierta C1 (Impranol), tal como, se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10. Porcentaje de pérdida de Peso Específico (grf/cm³), en espécimen tipo Basa sin cubierta y con cubiertas C1 y C2 transcurrido T1= 7608 horas.

Cubierta	T0=0 hrs	T1=7608 hrs	Pérdida de Peso (grf/cm ³)	%
Sin	0,7876	0,6500	0,1376	17,475
C1	0,8589	0,6900	0,1690	19,671
C2	0,7925	0,6600	0,1325	16,721

En la tabla 7 y la Figura 27 se tiene que, los valores de peso específico para sobrebasa se ven reducidos al finalizar el tiempo T1. El espécimen sin cubierta pierde 0.0193 grf/cm³ (2.57%), seguido por la cubierta C1 (Impranol) con 0.0855 grf/cm³ (10.85%) y la cubierta C2 (Barnex) 0.139 grf/cm³ (18.69%). Los resultados de la Tabla 11, muestran que las cubiertas C1 y C2 pierden su acción protectora al finalizar las 7608 horas de exposición, siendo la cubierta C2 (Barnex) la que presenta la mayor la pérdida.

Tabla 11. Porcentaje de pérdida de Peso Específico (grf/cm³), en espécimen tipo Sobrebasa sin cubierta y con cubiertas C1 y C2 transcurrido T1= 7608 horas.

Cubierta	T0=0 hrs	T1=7608 hrs	Perdida de Peso (grf/cm ³)	%
Sin	0,7518	0,7325	0,0193	2,566
C1	0,7880	0,7025	0,0855	10,853
C2	0,7441	0,6050	0,1391	18,689

La Tabla 7 y la Figura 26 muestra la variación porcentual en los contenidos de humedad para la basa, transcurridas 7608 horas de exposición natural directa. El espécimen sin recubrimiento presenta un incremento de 8.67% en su contenido de humedad, seguido de la cubierta C1 con 9.44% y 10.31% para la cubierta C2. Por tanto, se observa que las cubiertas C1 (Impranol) y C2 (Barnex) aumentaron sus porcentajes de humedad, con mayor incremento para la cubierta C2, la cual duplico el valor inicial. tal como se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12. Incremento del Contenido de Humedad (%), en espécimen tipo Basa sin cubierta y con cubiertas C1 y C2 transcurrido T1= 7608 horas.

Cubierta	T0=0 hrs	T1=7608 hrs	Incremento de C.H. (%)
Sin	9,68	18,35	8,67
C1	9,50	18,94	9,44
C2	9,69	19,99	10,31

La Tabla 7 y la Figura 28 muestra la variación porcentual en los contenidos de humedad para la Sobrebasa, transcurridas 7608 horas de exposición natural directa. El espécimen sin recubrimiento presenta un incremento de 7.43% en su contenido de humedad, seguido de la cubierta C1 con 7.62% y 8.64% para la cubierta C2. Por tanto, se observa que las cubiertas C1 (Impranol) y C2 (Barnex) aumentaron sus porcentajes de contenido de humedad, con mayor incremento para la cubierta C2, tal como se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13. Incremento del Contenido de Humedad (%), en espécimen tipo Sobrebasa sin cubierta y con cubiertas C1 y C2 transcurrido T1= 7608 horas.

Cubierta	T0=0 hrs	T1=7608 hrs	Incremento de C.H. (%)
Sin	9,20	16,63	7,43
C1	9,52	17,14	7,62
C2	9,63	18,27	8,64

En la Tabla 14 se presentan la comparación de los pesos específicos obtenidos del trabajo de Tesis “Deterioro mecánico, fisicoquímico de la guadua rolliza sometida a factores abióticos de intemperie simulados en laboratorio” (Peña F., 2010) [47], para T0 y T2 = 1325 horas de exposición simulados en cámara de envejecimiento UV test 2000 para especímenes de guadua rolliza GAK tipo basa y sobrebasa en blanco y con cubiertas C1 (Impranol) y C2 (Barnex), en dicho trabajo se presenta una reducción de los pesos específicos, con 0.135 grf/cm³ (15.74%) para el espécimen tipo basa con cubierta C1 (Impranol), seguido del espécimen sin cubierta con 0.0857 grf/cm³ (10.89%), y la cubierta C2 (Barnex) con 0.028 grf/cm³ (3.54%). El espécimen tipo sobrebasa presenta el mismo comportamiento con decremento de los valores de peso específico de 0.0739 grf/cm³ (9.38%) para el espécimen con recubrimiento C1 (Impranol), 0.0328 grf/cm³ (4.36%) para la muestra sin recubrimiento, y 0.0214gr/cm³ (2.87%) para el espécimen con cubierta C2 (Barnex).

Comparando los dos trabajos de investigación se observa que las basas y sobrebasas de guadua *Angustifolia Kunth*, sin cubierta y con cubiertas C1 y C2, expuestas durante 1325 horas a intemperismo simulado en cámara de envejecimiento, presentan menores valores de peso específico, al igual que los especímenes expuestos a 7608 horas de intemperismo natural directo en la ciudad de Bogotá; con mayor pérdida de peso para el espécimen tipo basa bajo condiciones de exposición natural. Los resultados de la comparación se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14. Comparación de los pesos específicos para guadua natural y con cubiertas C1 y C2 para T2=1325 horas (Peña F., 2010), versus los valores obtenidos en el presente trabajo de investigación para T1=7608 horas.

PESOS ESPECIFICOS								
TIPO	DATOS TESIS (PEÑA F., (2010)					INVESTIGACIÓN ACTUAL		
	Cubierta	T0=0 hrs	T2=1325 hrs	Perdida PE (grf/cm3)	%	T1=7608 hrs	Perdida PE grf/cm3	%
BASA	Sin	0,7876	0,7019	0,0857	10,89	0,6500	0,1376	17,47
	C1	0,8589	0,7237	0,1352	15,74	0,6900	0,1690	19,67
	C2	0,7925	0,7644	0,0281	3,54	0,6600	0,1325	16,72
SOBREBASA	Sin	0,7518	0,7190	0,0328	4,36	0,7325	0,0193	2,57
	C1	0,7880	0,7141	0,0739	9,38	0,7025	0,0855	10,85
	C2	0,7441	0,7227	0,0214	2,87	0,6050	0,1391	18,69

De la misma manera se realizo la comparación de los dos trabajos de nvestigación para determinar la varación de los contenidos de humedad de los espcimenes de guadua rolliza GAK, natural y con cubiertas C1 y C2 para un T2 = 1325 horas de exposición en condiciones de intemperie simulada en cámara de envejecimiento UV test 2000; frente a un T1 = 7608 horas de exposición a factores abioticos de intemperie natural directa en la ciudad de Bogotá. Para el primer caso los contenidos de humedad se reducen en las basas en; 4.02% para la guadua natural o sin recubrimiento, 4.14% para la cubierta C1 (Impranol) y 5.25% para la cubierta C2 (Barnex). El mismo comportamiento presentan las sobrebasa con 3.71% para la guadua natural, 4.51% para la cubierta C2 (Impranol) y 4.49% para la cubierta C2 (Barnex). Para el segundo caso, el fenomeno es inverso, los especimenes tipo basa experimentan un aumento en los contenidos de humedad siendo mayor para la cubierta C2 con 10.30%, seguido de la cubierta C1 con 9.44%, y el especimen sin cubierta con 8.67%. Las Sobrebasa aunque en menor medida, tambien presentan incrementos en los contenidos de humedad, con 8.64% para la cubierta C2, 7.62% para la cubierta C1 y 7.43% para la guadua sin protección, dichos valores se muestran en la Tabla 15.

Tabla 15. Comparación de los Contenidos de Humedad para guadua natural y con cubiertas C1 y C2 para T2=1325 horas (Peña F., 2010), versus los valores obtenidos en el presente trabajo de investigación para T1=7608 horas.

CONTENIDO DE HUMEDAD (%)						
TIPO	DATOS TESIS PEÑA F (2010)				INVESTIGACIÓN ACTUAL	
BASA		T0=0 hrs	T2=1325 hrs	Perdida CH (%)	T1=7608 hrs	Incremento CH (%)
	Sin	9,68	5,66	4,02	18,35	8,67
	C1	9,50	5,36	4,14	18,94	9,44
	C2	9,69	4,44	5,25	19,99	10,30
SOBREBASA	Sin	9,20	5,49	3,71	16,63	7,43
	C1	9,52	5,01	4,51	17,14	7,62
	C2	9,63	5,14	4,49	18,27	8,64

Con el apoyo de las tablas y las gráficas, se puede observar que el peso específico y contenido de humedad mantienen una relación inversamente proporcional con respecto al tiempo de exposición, lo que traduce que los especímenes de guadua además de presentar reducción en la densidad, incrementan su propiedad de higroscopicidad a medida que se acerca a las 7608 horas de exposición [10].

Se resalta que los especímenes que no tuvieron protección, disminuyeron en más del 95% su densidad y que, en aquellas que contaban con cubierta protectora la pérdida fue menor, tal es el caso, de la cubierta C2 (Barnex) que permitió que la basa conservara su densidad en un 83.28%. La pérdida de peso específico, se puede explicar por la lixiviación que genera el agua, por tanto, las cubiertas no fueron muy eficientes al momento de repeler el agua permitiendo que los especímenes absorbieran la humedad [10].

El mismo análisis se realizó para especímenes de sobrebasa, obteniéndose similares resultados, disminución de los pesos específicos e incremento de los contenidos de humedad a las 7608 horas de exposición. A diferencia de la basa, los pesos específicos se reducen en menor proporción, presentando una mejor protección la cubierta C1 (Impranol) que permitió mantener el peso en un 89.15%.

Tablas 14 y 15 se Comparan los datos obtenidos de Peña F (2010) [47], frente a los valores para el tiempo final $T1 = 7608$ horas de la presente investigación, se puede afirmar que la guadua rolliza *Angustifolia Kunth* expuesta a factores abioticos de intemperie natural directa o acelerada en camara UV test 2000 presenta perdida de peso especifico sin importar el tipo de especimen y el recubrimiento que lo protege.

Como se observa en la Tabla 8 y las Figuras 41 y 42, la guadua rolliza *Angustifolia Kunth* GAK tipo basa y sobrebasa, con o sin protección, experimenta una disminución lineal en su resistencia a la tracción paralela al eje de la fibra, reducción que es influenciada por los agentes de intemperismo y se pueden asociar a las propiedades físicas con la perdida simultanea de peso, proceso que se debe atribuir a los productos degradados por el inicio de la foto-degradación y que a su vez son eliminados de los especímenes por un proceso de lixiviación ocasionado por el agua. Este decremento de la resistencia mecánica se ve influenciado por los promedios de la temperatura (13.20°C), radiación solar (4014wh/m^2) y pluviosidad (66.72mm) presentes en la ciudad de Bogotá D.C, durante las 7608 horas de exposición a intemperie natural directa, factores que incrementan la movilidad de las cadenas de la pared celular promocionando la reorganización de la estructura. Sin olvidar que el agua funge como agente ablandador que proporciona mayor flexibilidad en la pared celular y un mayor reordenamiento de la estructura [6]. Adicionalmente el agua causa contracción (encogimiento) e hinchazón (dilatación) de los haces vasculares de la pared celular, lo cual genera además de la destrucción de los mismos, un tipo de sobreesfuerzo interno en el material haciendo que se fisure, efectos que ayudan a reducir la resistencia a la tracción [10].

Analizando con detenimiento los valores obtenidos y plasmados en la Tabla 8, se puede observar que, transcurridas 7608 horas de exposición, las basas y sobrebasas que contaban con algún tipo de protección, presentaron un menor grado de deterioro mecánico, toda vez que este tipo de cubiertas inhibe y retrasa el efecto degradador del sol, el agua y demás factores de intemperie, pero la cubierta C1 – Impranol de Durespo presento una mejor protección (20.2%) para el espécimen tipo basa, y la cubierta C2 – Barnex de Pintuco (35.9%) para la sobrebasa. Ahora bien, si nos enfocamos en el espécimen basa y su respuesta mecánica al periodo de exposición $T1 = 7608$ horas, observamos que las dos cubiertas C1 y C2 con porcentajes de protección tan bajos dejan de cumplir su función principal de protección y permiten que el material siga su

deterioro normal, llegando a niveles de deterioro más altos que la basa sin tratamiento la cual conserva el 22.25% de su resistencia. La Tabla 16 muestra el grado de deterioro de las probetas de guadua rolliza espécimen tipo basa, sin protección y con cubiertas protectoras.

La cubierta protectora C2-Barnex de Pintuco que por ser una cubierta sin pigmentación que le permita absorber la luz solar y evitar el deterioro de la superficie posibilita la degradación y destrucción de la celulosa mostrando el valor más alto (91.58%) de pérdida de resistencia en la basa al ser sometida a esfuerzos de tracción.

Tabla 16. Disminución Esfuerzo de Fluencia " σ_y " (MPa), en espécimen tipo Basa sin cubierta y con cubiertas C1 y C2 transcurrido T1= 7608 horas.

ESFUERZO DE FLUENCIA "σ_y". BASA				
Cubierta	T0=0 hrs	T1=7608 hrs	Diferencia σ_y de Fluencia (MPa)	%
Sin	106,69	23,89	82,81	77,61
C1	106,69	21,62	85,08	79,74
C2	106,69	15,12	91,58	85,83

Para el espécimen sobrebasa y su respuesta mecánica al periodo de exposición T1 = 7608 horas, las cubiertas presentaron un comportamiento similar al obtenido con las basas en su función protectora, disminuyendo un poco más el grado de deterioro. Por tanto, registraron mayor resistencia en los ensayos de tracción, esto se muestra en la Tabla 17, ya que los niveles de resistencia no disminuyeron tanto como las sobrebasas sin protección y las que se protegieron con C1-Impranol. Esta última registro resistencias más bajas que la protección con C2-Barnex, lo que indica que al cabo de un tiempo comprendido entre T0 y T1 =7608 horas de exposición, hubo destrucción total de este tipo de protección, dejando el material totalmente expuesto, rasgo que se evidencio por el levantamiento de la película protectora al final del tiempo T1.

Tabla 17. Disminución Esfuerzo de Fluencia “ σ_y ” (MPa), en espécimen tipo Sobrebasa sin cubierta y con cubiertas C1 y C2 transcurrido T1= 7608 horas.

ESFUERZO DE FLUENCIA "σ_y". SOBREBASA				
Cubierta	T0=0 hrs	T1=7608 hrs	Diferencia σ_y de Fluencia (MPa)	%
Sin	108,24	21,19	87,06	80,43
C1	108,24	28,67	79,58	73,52
C2	108,24	38,96	69,28	64,01

Es importante hacer mención en el cambio de rigidez que tuvieron las basas, ya que a medida que se incrementaba el tiempo de exposición, estas aumentaban su módulo de elasticidad, lo que muestra que el espécimen sufrió un incremento en su rigidez, fenómeno reflejado en una disminución de su rango elástico.

De la misma manera, el cambio en la resistencia de las probetas, se ve influenciado por la variación del contenido de humedad y la densidad en la pieza, toda vez que durante las 7608 horas de exposición al intemperismo natural directo se observó una variación de la densidad y un incremento hasta del 100% de la humedad, variación que produce cambios volumétricos que a su vez generan esfuerzos de contracción en la estructura interna de la guadua con una disminución de la resistencia a tensión.

Otra característica implícita en los materiales e inherente a la resistencia, es el Módulo de elasticidad “E”, el cual indica que tan rígido es el material, se trata de la pendiente de la curva esfuerzo “ σ ” – deformación “ ϵ ”, de cada uno de los especímenes ensayados, obteniéndose los siguientes resultados, a las 7608 horas de exposición correspondientes al T1, la basa con cubiertas protectoras, como sin tratamiento, incremento el módulo de elasticidad del material, lo que nos indica que para el tiempo de exposición T1, la deformación se vio disminuida haciendo que el material presente una falla frágil. Adicionalmente, las cubiertas protectoras lograron contrarrestaron este aumento manteniendo las condiciones de elasticidad del material por debajo del 50% con respecto al T0, a este punto la cubierta C1 - Impranol se comportó mejor impidiendo que el módulo de elasticidad superara 1.88 GPa (13%), mientras que la cubierta C2 - Barnex permitió un mayor valor con 12.16 GPa (49.16%). Nuevamente y debido a la destrucción de estos tratamientos a las 7608 horas de exposición aumentaron los módulos de elasticidad de las basas [17]. En la tabla 18 y la figura 46, muestra lo anteriormente mencionado.

Tabla 18. Incremento Módulo de Elasticidad “E” (GPa), para Basa, con o sin cubierta C1 y C2, transcurrido los tiempos T0 y T1.

MODULO DE ELASTICIDAD "E" (GPa), BASA				
Tipo	To	T1 = 7608 horas	Incremento "E" (GPa)	%
Sin	12,58	20,33	7,75	38,13
C1	12,58	14,46	1,88	13,00
C2	12,58	24,74	12,16	49,16

Para las Sobrebasas el comportamiento fue similar al de las basas, puesto que los módulos de elasticidad también se vieron incrementados al finalizar el tiempo T1 de exposición. La probeta sin tratamiento presento un aumento de su módulo de elasticidad al finalizar las 7608 horas, si nos fijamos la cubierta C1-Impranol aplicada sobre la sobrebasa alcanzo un valor de 7.77 GPa (7.77%), mientras que la cubierta C2-Barnex obtuvo el valor más bajo con 1.04 GPa (8.53%). Los valores citados se pueden ver en la Tabla 19, figura 47.

Tabla 19. Incremento Módulo de Elasticidad “E” (GPa), para Sobrebasa, con o sin cubierta C1 y C2, transcurrido los tiempos T0 y T1.

MODULO DE ELASTICIDAD "E" (GPa), SOBREBASA				
Tipo	To	T1 = 7608 horas	Incremento "E" (GPa)	%
Sin	12,23	15,51	3,28	26,84
C1	12,23	20,00	7,77	63,53
C2	12,23	11,19	1,04	8,53

En cuanto al módulo de elasticidad “E” para basa y sobrebasa, los dos especímenes presentaron un incremento de los módulos tanto en probetas sin protección como las que se protegieron con las cubiertas C1 Impranol y C2 Barnex, en cada una de las curvas se puede observar un incremento en la ductilidad del material.

Comparando los Módulos de Elasticidad “E” del trabajo de Tesis “Deterioro mecánico, físico-químico de la guadua rolliza sometida a factores abióticos de intemperie simulados en laboratorio” (Peña F., 2010) [47], para T=1325 horas y el presente trabajo de investigación con 7608 horas (T1) de exposición natural directa. Para el espécimen sin protección y con cubiertas C1 y C2, se obtienen los siguientes resultados: Para las basas falladas en el primer trabajo bajo T2 = 1325 horas, el Módulo de Elasticidad “E” se incrementó en 2.43GPa (19.32%) para el

espécimen sin protección, seguido de la cubierta C1–Impranol con 2.14GPa (17.01%) y la cubierta C2-Barnex con 1.25GPa (9.94%). Para el mismo tipo de especímenes fallados al finalizar 7608 horas (T1) de exposición a intemperie natural directa, se obtuvo un aumento del Módulo de Elasticidad igual a 7.75 GPa (61.64%) referido el espécimen sin cubierta, 12.16 GPa (96.70%) para la cubierta C2 y 1.88 GPa (14.94%) para la cubierta C1. Los datos consignados en la Tabla 20, muestran que, en las dos investigaciones se presenta un aumento de los Módulos de Elasticidad, siendo mayores para los especímenes expuestos a intemperie natural directa al finalizar el tiempo T1 = 7608 horas. Lo anterior indica que los Módulos de Elasticidad se incrementan con el tiempo y las cubiertas C1 (Impranol) y C2 (Barnex) no redujeron el deterioro de la guadua; no obstante, la cubierta C2 – Impranol presento una mejor acción protectora sobre la basa impidiendo que el Módulo de Elasticidad “E” supere los 13.83 GPa al finalizar las 1325 horas, para la primera investigación (Peña F., 2010) [47]. Por otra parte, para el presente trabajo la cubierta C2 estabilizo el Módulo en 14.46 GPa, al final de las 7608 horas, frente a los 12.58 GPa tomados como valor inicial para ambos estudios.

Tabla 20. Comparación Módulos de Elasticidad “E” (GPa), para Basa, con o sin cubierta C1 y C2, para T2=1325 horas (Peña F., 2010) versus los valores obtenidos en el presente trabajo de investigación para T1 = 7608.

MODULO DE ELASTICIDAD "E" (GPa) BASA							
DATOS TESIS (Peña F., 2010)					INVESTIGACIÓN ACTUAL		
Tipo	To	T2 = 1325 horas	Incremento E (GPa)	%	T1 = 7608 horas	Incremento "E" (GPa)	%
Sin	12,58	15,01	2,43	19,32	20,33	7,75	61,64
C1	12,58	14,72	2,14	17,01	14,46	1,88	14,94
C2	12,58	13,83	1,25	9,94	24,74	12,16	96,70

De la misma manera para las sobrebasas sin protección y con cubiertas C1 y C2, se realizó la comparación de los Módulos de Elasticidad “E” para los dos trabajos de investigación aplicando para el primero T2=1325 horas de exposición simulada en laboratorio (Peña F., 2010) [47] y T1 = 7608 horas de exposición a intemperie natural directa, para el segundo. Los datos consignados en la Tabla 21, muestran que, en la investigación de Peña F., 2010, los Módulos de Elasticidad “E” presentaron una disminución con relación al tiempo inicial T0, obteniendo 1.39 GPa (-11.37%) para el espécimen sin protección, 1.55 GPa (-12.67%) para la cubierta C1 (Impranol) y 0.65 GPa (-5.31%) para la cubierta C2 (Barnex). Continuando con el T1 = 7608 horas para la presente investigación los Módulos de Elasticidad “E” se incrementaron en 3.28 GPa (26.84%)

para el espécimen sin protección, 7.77 GPa (63.53%) para la cubierta C1 (Impranol). Por el contrario, la cubierta C2 presento una disminución de 1.04 GPa (-8.53). Lo anterior indica que para la primera investigación (Peña F., 2010) los Módulos de Elasticidad para las sobrebasas disminuyeron al finalizar las 1325 horas dado que las cubiertas C1 y C2 impidieron el deterioro. Por otra parte, para el presente trabajo la cubierta C1- Impranol no permio superar los 20 GPa.

Tabla 21. Comparación Módulos de Elasticidad “E” (GPa), para Sobrebasa, con o sin cubierta C1 y C2, para T2=1325 horas (Peña F., 2010) versus los valores obtenidos en el presente trabajo de investigación para T1 = 7608.

MODULO DE ELASTICIDAD "E" (GPa) SOBREBASA							
DATOS TESIS (Peña F., 2010)					INVESTIGACIÓN ACTUAL		
Tipo	To	T2 = 1325 horas	Reducción E (GPa)	%	T1 = 7608 horas	Incremento "E" (GPa)	%
Sin	12,23	10,84	1,39	-11,37	15,51	3,28	26,84
C1	12,23	10,68	1,55	-12,67	20,00	7,77	63,53
C2	12,23	11,58	0,65	-5,31	11,19	1,04	-8,53

Es importante hacer mención en el cambio de rigidez que tuvieron las basas y la sobrebasas al finalizar el tiempo T1 = 7608 horas, ya que a medida que se incrementaba el tiempo de exposición, estas aumentaban su módulo de elasticidad, lo que demuestra que los especímenes sufren un incremento en su rigidez, fenómeno reflejado en una disminución de su rango elástico. Por otra parte, se enfatiza que cubiertas protectoras pasan a un segundo plano, permitiendo la posible alteración de las propiedades elásticas del material, en un mayor grado para la basa con cubierta C2- Barnex de Pintuco con una disminución de 0.0078734mm/mm (92.80%), tal como se observa en la Tabla 21. Mientras que la cubierta C1 Impranol de Durespo aplicada en la sobrebasa presento un decremento de 0.0074172mm/mm (83.81%), la tabla 22, muestra dichos grados de reducción elástica.

Comparando los valores obtenidos para Modulo de Elasticidad promedio, con los prescritos en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 y mostrados en la Tabla 22, se tiene que frente al a T0, la basa con cubierta C2 al finalizar T1, presento un CH = 19.99% y la sobrebasa CH = 18.27%, valores superiores al 12% de la norma. Los valores de Modulo de Elasticidad de 24.74 GPa para basa con cubierta C1 y 20.0 GPa para cubierta C2, son superiores a 9500 MPa (9.50 GPa) de la NSR-10.

Tabla 22. Módulos de Elasticidad E_i (MPa), CH =12%.

Módulo promedio $E_{0.5}$	Módulo percentil 5 $E_{0.05}$	Módulo mínimo E_{min}
9.500	7.500	4.000

Fuente: NSR-10 Titulo G. Tabla G. 12.7-1

Las Gráficas 48 y 49 muestran la reducción de los desplazamientos unitarios Elásticos en los especímenes basa y sobrebasa, destacando que cubierta C1-Impranol, presento el menor valor, con 0.01495 mm/mm (82.380%) para la basa, y 0.0053677 mm/mm (60.65%) para la sobrebasa, tal como se muestra en las Tablas 23 y 24. Estos valores demuestran que el reordenamiento de la ultra-estructura de los especímenes de guadua causa, una disminución de los desplazamientos en el rango Elásticos, haciendo el material menos dúctil, proceso atribuido a la destrucción de la estructura de la pared celular después de transcurridas 7608 horas (317 días) de exposición natural directa a los agentes abióticos de intemperie en la ciudad de Bogotá.

Tabla 23. Comparación Desplazamientos Elásticos “ ϵ_y ” para Basa, sin protección y con cubierta C1 y C2, para T1 = 7608 horas de exposición.

DESPLAZAMIENTO ELASTICO "ϵ_y". BASA				
Cubierta	T0=0 hrs	T1=7608 hrs	Diferencia Desplazamiento Elastico ϵ_y	%
Sin	0,008484	0,001175	0,0073096	86,15
C1	0,008484	0,001495	0,0069892	82,38
C2	0,008484	0,000611	0,0078734	92,80

Tabla 24. Comparación Desplazamientos Elásticos “ ϵ_y ” para Sobrebasa, sin protección y con cubierta C1 y C2, para T1 = 7608 horas de exposición.

DESPLAZAMIENTO ELASTICO "ϵ_y". SOBREBASA				
Cubierta	T0=0 hrs	T1=7608 hrs	Diferencia Desplazamiento Elastico ϵ_y	%
Sin	0,008851	0,001366	0,0074847	84,57
C1	0,008851	0,001433	0,0074172	83,81
C2	0,008851	0,003483	0,0053677	60,65

Las Gráficas 50 y 51 muestran la reducción de los desplazamientos unitarios en los especímenes basa y sobrebasa, destacando que cubierta C1-Impranol, presento el menor valor, con 0.0103507 mm/mm (79.60%) para la basa, y 0.0084680 mm/mm (74.23%) para la sobrebasa, tal como se muestra en las Tablas 25 y 26. Estos valores demuestran que el reordenamiento de la

ultra-estructura de los especímenes de guadua causa, una disminución de los desplazamientos últimos, haciendo el material menos dúctil, proceso atribuido a la destrucción de la estructura de la pared celular después de transcurridas 7608 horas (317 días) de exposición natural directa a los agentes abióticos de intemperie en la ciudad de Bogotá.

Tabla 25. Comparación Desplazamientos últimos “ ϵ_u ” para Basa, sin protección y con cubierta C1 y C2, para T1 = 7608 horas de exposición.

DESPLAZAMIENTO ÚLTIMO "ϵ_u". BASA				
Cubierta	T0=0 hrs	T1=7608 hrs	Diferencia Desplazamiento Último ϵ_u	%
Sin	0,013004	0,010100	0,0029040	22,33
C1	0,013004	0,002653	0,0103507	79,60
C2	0,013004	0,002090	0,0109140	83,93

Tabla 26. Comparación Desplazamientos últimos “ ϵ_u ” para Sobrebasa, sin protección y con cubierta C1 y C2, para T1 = 7608 horas de exposición.

DESPLAZAMIENTO ÚLTIMO "ϵ_u". SOBREBASA				
Cubierta	T0=0 hrs	T1=7608 hrs	Diferencia Desplazamiento Último ϵ_u	%
Sin	0,011408	0,006597	0,0048113	42,18
C1	0,011408	0,002940	0,0084680	74,23
C2	0,011408	0,002670	0,0087380	76,60

10. CONCLUSIONES

1. Para un tiempo de exposición de 7608 horas a factores de intemperie directa en la ciudad de Bogotá, se tiene que la guadua rolliza *Angustifolia Kunth* tipo basa y sobrebasa, sin protección y con cubiertas C1 y C2, es afectada severamente por la combinación simultánea de los factores abióticos (luz solar, agua y temperatura), presentando disminución de la densidad, e incremento del peso específico y el contenido de humedad.
2. El incremento de los contenidos de humedad en los especímenes de guadua, generan una destrucción importante de lignina, disminuyendo los esfuerzos y la resistencia mecánica de las basas y las sobrebasas.
3. El incremento de los Módulos de Elasticidad “E” en 15.01 GPa para la basa y 18.84 GPa para la sobrebasa al finalizar las 7608 horas de exposición natural directa en la ciudad de Bogotá, hacen que el material presente una mayor rigidez propiciando la falla frágil.
4. Los valores típicos para el Módulo de Elasticidad de la guadua oscilan entre 13.72 GPa y 30.40 GPa (Hidalgo O., 2003) [48]. En la presente investigación el máximo valor obtenido corresponde a 24.74 GPa para basa y el mínimo 20 GPa para sobrebasa, en este caso los dos valores se ubican dentro del rango expuesto por Hidalgo.
5. Los especímenes de guadua rolliza *Angustifolia Kunth* expuestos a la intemperie natural directa en la ciudad de Bogotá, y usados en la presente investigación, no pueden ser empleados como material de construcción, dado que los contenidos de humedad y los Módulos de Elasticidad “E” superan los máximos exigidos por Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 y la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica “AIS”
6. Los ensayos de tracción paralela a las fibras son los más importantes al momento de diseñar cualquier estructura de guadua, se encontraron diferencias muy notables con los resultados obtenidos en la exposición acelerada simulada en un laboratorio, tal es el caso de la variación de los contenidos de humedad, peso específico y módulos de elasticidad. Dichas diferencias pueden ser originadas por la anisotropía del material, a los parámetros

de operación del ensayo, además, de la variación de las condiciones ambientales. Por tal razón es indispensable estandarizar los procedimientos para la ejecución de las pruebas principalmente en los puntos de anclaje o agarre de las probetas donde se presentan los mayores inconvenientes por desplazamientos.

7. Finalmente se concluye que las cubiertas protectoras C1 Impranol de Durespo y C2 Barnex de Pintuco no lograron evitar la degradación de los especímenes de guadua expuesta al deterioro natural directo en la ciudad de Bogotá D.C durante las 7608 horas de exposición a una temperatura promedio anual de 13.20 °C, una radiación solar 4.014 wh/m², y una humedad media del 75%.

11. RECOMENDACIONES

1. Como recomendación se sugiere realizar un número mayor de ensayos a tracción a diferentes tiempos de exposición natural directa con el ánimo de obtener una mejor aproximación al comportamiento de la guadua *Angustifolia Kunth* en su presentación natural y con diferentes tipos de barnices protectores, pudiendo evaluar su eficacia en cuanto a la reducción de los ataques de los agentes abióticos de temperatura, humedad y radiación al someter los especímenes a cargas de tracción paralela a las fibras.
2. Dada la gran cantidad de errores que se presentan en las lecturas, como consecuencia de los problemas durante el montaje de las probetas, se recomienda diseñar un tipo de mordaza especial que se pueda adaptar a la maquina universal Instron permitiendo un mejor agarre de los especímenes a fallar.
3. Se debe hacer énfasis en la rigurosidad al momento de seleccionar los especímenes a fallar, teniendo en cuenta que la guadua es un material ortotrópico, y las irregularidades en la estructura de la pared celular, sumado al tratamiento térmico, genera rompimiento, y debilitamiento de la pared celular, lo que podría reflejar una posible variabilidad en los resultados obtenidos al momento de evaluar, las propiedades mecánicas en función del tiempo de exposición.
4. Continuar efectuando ensayos de deterioro mecánico, fisicoquímico de la guadua rolliza sometida a factores de intemperie naturales y simulados en laboratorio, para a futuro poder predecir exactamente el tiempo de vida útil.
5. Realizar un trabajo de investigación dirigido a determinar un factor de correlación por contenido de humedad para la resistencia a tracción paralela a la fibra, y flexión de la guadua GAK; esto con el fin de contar con un criterio más especializado del comportamiento mecánico para el diseño de estructuras construidas con este tipo de material.

6. Para lograr que los especímenes de guadua, basa y sobrebasa puedan ser usados en construcciones en la ciudad de Bogotá, bajo los criterios de la NSR-10, los elementos diseñados a tracción deben ser aislados de los efectos directos de la humedad, la radiación solar y la temperatura. El uso de cubiertas podría mejorar la durabilidad ampliando la vida útil, siempre y cuando no se vean expuestas de manera directa a los efectos de intemperismo.
7. La guadua debe estar protegida de la intemperie (sol, agua) y debidamente protegida de la humedad adquirida por capilaridad, por consiguiente, se recomienda instalarla bajo techo protegiéndola con grandes aleros y buenos pedestales que la aíslen de manera segura del suelo, con una altura mínima que la proteja de salpicaduras de la lluvia y el agua por capilaridad.

12. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Instituto Colombiano de Normas Técnicas. Métodos de ensayo para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la Guadua angustifolia Kunth. Bogotá: ICONTEC, 2007 (NTC5525).
- [2] Asociación Colombiana de Ingeniera Sísmica, AIS. Reglamento colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. Título G- Estructuras de madera y estructuras de guadua. Bogotá, Colombia: Marzo de 2010.
- [3] C. E. González, «Resistencia a la compresión paralela a la fibra de la guadua angustifolia y determinación del módulo de elasticidad,» Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2006.
- [4] Castrillón V., Malaver Z., Procedimientos de ensayo para la determinación de las propiedades físico mecánicas de la guadua. Trabajo de grado. Universidad Nacional de Colombia. Sede Bogotá. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola. Unidad de Estructuras. 2004.
- [5] L. O. González, «Elementos para la caracterización mecánica de la guadua Angustifolia Kunt,» Revista Virtual Forestal, 2006.
- [6] Zhang J., Zeng Q., Yu T., et al., Residual properties of reformed bamboo/aluminium laminates after Hygrothermal aging, Composites Science and Technology, 61: 1041-1048, 2001.
- [7] Luna P., Lozano J., Takeuchi C., Determinación experimental de valores característicos de resistencia para guadua angustifolia, Ciencia y tecnología, Universidad del Bio, 16(1):77-92, 2014.
- [8] Echezuria H., El bambú como recurso sustentable para construcción de viviendas de bajo costo, Revista Tekhné, Vol 21, Num 2:052-068, 2018.

- [9] Santos D., Costa M., Santos M., Performance of polyester and modified polyester coil coatings exposed in different environments with high UV radiation, *Progress in Organic Coatings*, 58: 296-302, 2007.
- [10] Heikkila A., Tanskanen A., Karha P., et al. Adjusting timing of weathering test to account for seasonal variations in UV exposure, *Polymer Degradation and Stability*, 92: 675-683, 2007.
- [11] Papp G., Preklet E., íková B., et al. Effect of UV laser radiation with different wavelengths on the spectrum of lignin extracted from hard wood materials, *Journal of photochemistry and Photobiology, A* 163: 187-192, 2004.
- [12] Leon G., Datos de irradiancia año 1998 para Bogotá, Estación del Dorado, Instituto de hidrología, Meteorología y estudios ambientales de Colombia IDEAM, 2009.
- [13] Fengel D., Wegener G., *Wood. Chemistry, Ultrastructure, Reactions*, DeGruyter, berlin, 345-370.
- [14] Rodriguez R., Talavera F. Factores que intervienen en el proceso de envejecimiento de la madera, *Ciencias Forestales y del Ambiente*, 9(1): 95-100, 2003.
- [15] Wang X., Ren H. Comparative study of the photo-discoloration of moso bamboo (*Phyllostachys pubescens* Mazel) and two Wood species, *Applied Surface Science*, 254: 7029-7034, 2008.
- [16] Murata K., Minoru M. Microscopic observation of transverse swelling of latewood tracheid: effect of macroscopic/mesoscopic structure, *J. Wood Sci*, 52: 283-289, 2006.
- [17] Sudiyani Y., Tssujiyama S. Imamura Y., et al. Chemical Characteristics of surfaces of hardwood and softwood deteriorated by weathering, *J. Wood Sci*, 45: 348-353, 1999.
- [18] Borrega M., Karenlampi P., Three mechanisms affecting the mechanical properties of spruce wood dried at high temperatures, *J. Wood Sci*, 56: 87-94, 2010.

- [19] Evans P., Urban K., Chowdhury A., 2008, Surface Checking of wood is increased by photodegradation caused by ultraviolet and visible light, 42: 251-265, 2008.
- [20] Sik J., Singh P., Gon S., et al., Ultrastructural Characteristics of cell wall disintegration of pinus spp. In the windows of an old Buddhist temple exposed to natural weathering, International Biodeterioration & Biodegradation, 61: 194-198, 2008.
- [21] Temiz A., Terziev N., Eikenes M., et al., Effect of accelerated weathering on surface chemistry of modified wood, Applied surfaces Science, 253: 5355-5362, 2007.
- [22] Gutiérrez M., Bonilla J., Cruz M., Quintero A. expansión lineal y punto de saturación de las fibras de la Guadua angustifolia Kunth, Colombia Forestal, Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, Vol. 21. No 1, pp 69-80, 2017.
- [23] Lybeer B., VanAcker J., Goetghebeur P., variability in fibre and parenchyma cell walls of temperate and tropical bamboo culms of different ages, Wood Sci Technol, 40: 477-492, 2006.
- [24] Díaz A., González C., Propiedades físicas y mecánicas de la Guadua angustifolia Kunth. Medellín, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agropecuarias, 103p 1992.
- [25] Osorio J., Vélez J., Ciro H., Estructura interna de la guadua y su incidencia en las propiedades mecánicas, Dyna, Universidad Nacional de Colombia, vol. 74, núm. 153, noviembre, pp. 81-94, 2007.
- [26] Gutierrez M., Caori P., Efecto del contenido de humedad en la resistencia a tensión paralela a la fibra del bambú Guadua Angustifolia Kunth, Scienza et Technica, Universidad Tecnológica de Pereira, Vol. 19, No. 3, 2014.
- [27] Moreno L., Osorio L., Trujillo E., Estudio de las propiedades mecánicas de heces de fibra de Guadua angustifolia, Ingeniería y Desarrollo, Universidad del Norte, núm. 20, julio-diciembre, pp. 125-133, 2006.
- [28] Parameswaran N., Liese W., On the fine structure of bamboo fibres, Wood Sci Technol, 4: 231-246, 1976.

- [29] Upreti N., Pandey K., Role of Pretreatments in the Protection of Wood Surface and Finishes in the Weathering of Pterocarpus Marsupium wood, *Journal of Tropical Forest Science*, 17(1): 141-150, 2005.
- [30] Bhat I., Khalil A., Awang B., et al, Effect of Weathering on physical, mechanical and morphological properties of chemically modified wood materials, *School of Industrial Technology, University Sains Malaysia*, 2010.
- [31] Avar L., Bechtold K., Studies on the Interaction of Photoreactive Light Stabilizers and UV-absorbers, *Progress in Organic Coatings*, 35: 11-17, 1999.
- [32] Moena R., Impregnantes Tipo Lasur Para la Protección Superficial de Madera y Tableros, *Agro-Ciencia*, 23(1): 25-36, 2007.
- [33] ASTM D638 y ASTM D 3039. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, *ASTM Institute for Standards Research*, April 1997.
- [34] Muller U., Manfred R., Steiner M., et al., Yellowing and IR-changes of spruce wood as result of UV-irradiation, *Journal of Photochemistry and Photobiology*, B69:97-105, 2003.
- [35] Pickett J., Gibson D., Gardner M., Effect of irradiation conditions on the weathering of engineering thermoplastics, *Polymer Degradation and Stability*, 93: 1597-1606, 2008.
- [36] Leon G., Datos de irradiancia año 2018 para Bogotá, Estación del Dorado, *Instituto de hidrología, Meteorología y estudios ambientales de Colombia IDEAM*, 2019.
- [37] Brenan P., Fedor C., Sunlight, ultraviolet and accelerated weathering, *Coating Technology Handbook*, Third Edition: 12-1 - 12-9, 2006.
- [38] Delgado H., Guadalupe E., Perez A., Florez M., Estimación de la incertidumbre en métodos de ensayos de construcción, *Secretaria de Comunicaciones y Transportes Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica No. 275 Sanfandila, Qro*, 2005.

- [39] Jacques L., Accelerated and outdoor/natural exposure testing of coatings, Prog. Polym. Sci, 25: 1337-1362, 2000.
- [40] Díaz B., Peri P., Ajuste de técnica de ensayo de la durabilidad de Madera de Populus nigra en laboratorio, Publicación técnica forestal, 7P, 1999.
- [41] Cho C., Ho K., Kim Y., Micromorphological Charecteristics of Degradation in Bamboo Attacked by White Rot Fungus Lentinus edodes, Department of Forest Products & Technology, Chonnam National University, Gwangju 500-757, 2006.
- [42] Comerford L., Technical Aticles and practical Informaction about testing with Atlas Weather-Ometer and Fade-Ometers, Atlas Sun Spots, Vol.15, issue 35, 1985.
- [43] Brand R., Ruiz D., Lozano N., Caracterización física y mecánica de la guadua rolliza de la especie angustifolia kunth mediante procesamiento digital de imágenes, Universidad Militar Nueva Granada, Facultad de Ingeniería Civil, 2015.
- [44] Schmalzl K., Evans P., Wood surface protection with some titanium, Zirconium and manganese compounds, Polymer Degradation and Stability 82: 409-419, 2003.
- [45] Perea J., Villegas J., Bahamon Y., Evaluación y Documentación de Prácticas Sobresalientes Sobre el Manejo de la Cosecha y Maduración de la Guadua en el departamento del Huila, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural: 1-122, 2003.
- [46] Ghavami K., Marinho A., Propriedades físicas e mecanicas do colmo inteiro do bamboo da especie Guadua Angustifolia, Revista Brasileira de Engenharia Agricola e Ambiental, v.9, n.1: 107-114, 2005.
- [47] Peña F., Deterioro Mecánico, Físico - Químico De La Guadua Rolliza Sometida A Factores Abióticos De Intemperie Simulados En Laboratorio, 2010.
- [48] Hidalgo O., Bamboo the Gift of the Gods, hipertexto ltda, 2003.