



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS
DE HIDALGO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA
DE LA MADERA**



**“IMPREGNACIÓN DE MADERA DE *Quercus laurina* Humb. & Bonpl. CON
SALES DE BORO Y SALES DE COBRE AZOL POR LOS MÉTODOS DE
INMERSIÓN, BAÑO CALIENTE-FRÍO Y BETHELL”**

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN TECNOLOGÍA DE LA MADERA

**PRESENTA:
MARIANO CISNEROS HERRERA**

**DIRECTOR:
MAESTRA EN CIENCIAS. LUZ ELENA A. ÁVILA CALDERÓN**

**CO-DIRECTOR:
DR. DAVID RAYA GONZÁLEZ**

MORELIA, MICHOACÁN. FEBRERO DEL 2015.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|------|
| ÍNDICE GENERAL | ii |
| ÍNDICE DE CUADROS | v |
| ÍNDICE DE FIGURA | vi |
| RESUMEN | viii |
| ABSTRACT | ix |
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 2. ANTECEDENTES | 3 |
| 3. GENERALIDADES | 6 |
| 3.1. Generalidades de la especie de encino..... | 6 |
| 3.2. Generalidades de sustancias preservantes..... | 9 |
| 3.2.1. Sales de boro | 9 |
| 3.2.2. Sales de cobre azol | 10 |
| 3.3. Generalidades de los métodos de impregnación..... | 11 |
| 3.3.1. Métodos de tratamiento sin presión | 11 |
| 3.3.1.1. Brochado y pulverizado | 11 |
| 3.3.1.2. Inmersión..... | 11 |
| 3.3.1.3. Baño caliente-frío..... | 11 |
| 3.3.2. Métodos de tratamiento a presión | 12 |
| 3.3.2.1. Proceso Bethell (célula llena)..... | 12 |
| 3.3.2.2. Proceso Rueping..... | 12 |
| 3.3.2.3. Proceso Lowry (célula vacía)..... | 12 |
| 3.4. Generalidades de las propiedades mecánicas. | 13 |
| 3.4.1. Compresión paralela a la fibra | 13 |
| 3.4.2. Flexión estática..... | 13 |
| 4. OBJETIVOS | 14 |
| 4.1. General..... | 14 |
| 4.2. Específicos | 14 |

| | |
|---|----|
| 5. MATERIALES Y MÉTODOS | 15 |
| 5.1. Procedencia de la madera..... | 15 |
| 5.2. Preparación de la madera antes de su preservación..... | 15 |
| 5.3. Material y equipo utilizado para los métodos de impregnación | 15 |
| 5.4. Concentración y preparación de las soluciones preservantes | 16 |
| 5.4.1. Sales de boro | 16 |
| 5.4.2. Sales de cobre azol tipo B | 16 |
| 5.5. Procesos de impregnación..... | 17 |
| 5.5.1. Tratamiento por inmersión | 17 |
| 5.5.2. Tratamiento de baño caliente-frío | 18 |
| 5.5.3. Proceso Bethell..... | 18 |
| 5.6. Control de calidad de los tratamientos..... | 19 |
| 5.6.1. Determinación de la absorción | 19 |
| 5.6.2. Determinación de la retención..... | 20 |
| 5.6.3. Determinación de la penetración..... | 20 |
| 5.6.3.1 Solución para determinar la penetración de las sales de boro..... | 21 |
| 5.6.3.2 Solución para determinar la penetración de los azoles de cobre..... | 21 |
| 5.6.4. Rango de tratabilidad | 22 |
| 5.7. Propiedades mecánicas | 22 |
| 5.7.1. Compresión paralela a la fibra | 22 |
| 5.7.1.1. Determinación del esfuerzo máximo (\bar{O}_w) y módulo de elasticidad en compresión paralela a la fibra (MOE)..... | 22 |
| 5.7.2. Flexión estática..... | 23 |
| 5.7.2.1. Esfuerzo de ruptura (\bar{O}_{bw}) y módulo de elasticidad (E_w)..... | 23 |
| 5.8. Diseño experimental | 25 |
| 5.8.1. Diseño experimental para la retención | 25 |
| 5.8.2. Diseño experimental para las propiedades mecánicas (compresión paralela a la fibra y flexión estática)..... | 26 |
| 6. RESULTADOS Y ANÁLISIS | 29 |
| 6.1. Resultados del control de calidad de los tratamientos | 29 |
| 6.1.1. Determinación de los resultados de absorción, retención y penetración de las sales de boro por los métodos de inmersión, baño caliente-frío y Bethell..... | 29 |

| | |
|---|-----------|
| 6.1.2. Determinación de los resultados de absorción, retención y penetración de las sales de cobre azol por los métodos de inmersión, baño caliente-frío y Bethell..... | 32 |
| 6.1.3. Determinación del rango de tratabilidad de los tratamientos..... | 35 |
| 6.2. Resultados de las pruebas mecánicas..... | 35 |
| 6.3. Análisis de varianza..... | 36 |
| 6.3.1. Análisis de varianza para la retención..... | 36 |
| 6.3.2. Análisis de varianza para las propiedades mecánicas..... | 38 |
| 6.3.2.1. Análisis de varianza para los resultados de compresión paralela a la fibra (P_{max} , \bar{O}_w y MOE) entre la madera impregnada y sin impregnar..... | 38 |
| 6.3.2.2. Análisis de varianza para los resultados de flexión estática (P_{max} , \bar{O}_{bw} y E_w) entre la madera impregnada y sin impregnar..... | 41 |
| 6.3.2.3. Análisis de varianza para los resultados de compresión paralela a la fibra (P_{max} , \bar{O}_w y MOE)..... | 44 |
| 6.3.2.4. Análisis de varianza para los resultados de flexión estática (P_{max} , \bar{O}_{bw} y E_w).. | 50 |
| 7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS | 57 |
| 8. CONCLUSIONES | 62 |
| 9. RECOMENDACIONES | 63 |
| 10. REFERENCIAS | 64 |
| 11. ANEXOS | 70 |
| Anexo 1. Secuela de secado empleada para el tratamiento de la madera de <i>Q. laurina</i> .. | 70 |
| Anexo 2. Norma NMX-C-322-ONNCCE-2003 de clasificación, condición de uso y ejemplos del uso de madera de acurdo al grado de riesgo en servicio de la madera. | 70 |
| Anexo 3. Retención mínima recomendada del preservante boro de acuerdo a la norma mexicana NMX-C-322-ONNCCE-2003. | 71 |
| Anexo 4. Especificación de los valores de retención del preservante cobre azol tipo B (CA-B) de acurdo a su designación de categoría de uso conforme a la norma U1-13 de la AWPA..... | 71 |
| Anexo 5. Designaciones de categoría de uso para las condiciones de servicio de acuerdo a la norma U1-13 de la AWPA..... | 72 |

ÍNDICE DE CUADROS

| | |
|---|----|
| Cuadro 3.1. Valores anatómicos de <i>Q. laurina</i> | 8 |
| Cuadro 3.2. Propiedades físicas y mecánicas de la madera de <i>Q. laurina</i> | 8 |
| Cuadro 6.1. Promedios de los resultados en compresión paralela (P_{max} , σ_w y MOE) y flexión estática (P_{max} , σ_{bw} y E_w) de la madera de <i>Q. laurina</i> sin impregnar e impregnadas con sales de boro | 35 |
| Cuadro 6.2. Promedios de los resultados en compresión paralela (P_{max} , σ_w y MOE) y flexión estática (P_{max} , σ_{bw} y E_w) de la madera de <i>Q. laurina</i> sin impregnar e impregnadas con sales de CA-B | 36 |
| Cuadro 6.3. ANOVA para la retención | 36 |
| Cuadro 6.4. ANOVA para la carga máxima (P_{max}) | 39 |
| Cuadro 6.5. ANOVA del esfuerzo máxima (σ_w) | 39 |
| Cuadro 6.6. ANOVA del módulo de elasticidad (MOE) | 40 |
| Cuadro 6.7. ANOVA para la carga máxima (P_{max}) | 41 |
| Cuadro 6.8. ANOVA para el esfuerzo de ruptura (σ_{bw}) | 42 |
| Cuadro 6.9. ANOVA para el módulo de elasticidad (E_w) | 43 |
| Cuadro 6.10. ANOVA para la carga máxima (P_{max}) | 44 |
| Cuadro 6.11. ANOVA para el esfuerzo máximo (σ_w) | 46 |
| Cuadro 6.12. ANOVA para el módulo de elasticidad (MOE) | 48 |
| Cuadro 6.13. ANOVA para la carga máxima (P_{max}) | 50 |
| Cuadro 6.14. ANOVA para el esfuerzo máximo (σ_{bw}) | 52 |
| Cuadro 6.15. ANOVA para el módulo de elasticidad (E_w) | 54 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 3.1. Distribución geográfica de <i>Q. laurina</i> | 7 |
| Figura 5.1. Caballete utilizado en la prueba de flexión estática | 24 |
| Figura 6.1. Probetas impregnadas con los preservantes: boro y cobre azol | 29 |
| Figura 6.2. Absorción de las sales de boro de los métodos utilizados | 30 |
| Figura 6.3. Retención de las sales de boro de los métodos utilizados | 30 |
| Figura 6.4. Penetración de las sales de boro con el método de inmersión | 31 |
| Figura 6.5. Penetración de las sales de boro por el método de baño caliente-frío | 31 |
| Figura 6.6. Penetración de las sales de boro por el proceso Bethell..... | 32 |
| Figura 6.7. Absorción de las sales de cobre azol de los métodos utilizados | 32 |
| Figura 6.8. Retenciones de las sales de cobre azol de los métodos utilizados | 33 |
| Figura 6.9. Penetración de las sales de cobre azol por el método de inmersión..... | 34 |
| Figura 6.10. Penetración de las sales de cobre azol con el método de baño caliente-frío..... | 34 |
| Figura 6.11. Penetración de las sales de cobre azol con el método célula llena..... | 34 |
| Figura 6.12. Gráfica de medias de la retención de las sales preservantes | 37 |
| Figura 6.13. Gráfica de medias de la retención de los tratamientos de impregnación | 37 |
| Figura 6.14. Gráfica de medias de la interacción de las sales preservantes y los tratamientos de impregnación | 38 |
| Figura 6.15. Gráfica de medias de la carga máxima en compresión paralela | 39 |
| Figura 6.16. Gráfica de medias del esfuerzo máximo en compresión paralela | 40 |
| Figura 6.17. Gráfica de medias del módulo de elasticidad en compresión paralela..... | 41 |
| Figura 6. 18. Gráfica de medias de la carga máxima en flexión estática | 42 |
| Figura 6.19. Gráfica de medias del esfuerzo de ruptura en flexión estática..... | 43 |
| Figura 6.20. Gráfica de medias del módulo de elasticidad en flexión estática..... | 44 |
| Figura 6.21. Gráfica de medias de P_{max} para las sales preservantes | 45 |

| | |
|--|----|
| Figura 6.22. Gráfica de medias de P_{max} para los tratamientos de impregnación..... | 45 |
| Figura 6.23. Gráfica de medias de interacción de las sales preservantes y los tratamientos de impregnación | 46 |
| Figura 6.24. Gráfica de medias de σ_w para las sales preservantes | 47 |
| Figura 6.25. Gráfica de medias de σ_w para los tratamientos de impregnación | 47 |
| Figura 6.26. Gráfica de medias de interacción de las sales preservantes y los tratamientos de impregnación | 48 |
| Figura 6.27. Gráfica de medias de MOE para las sales preservantes..... | 49 |
| Figura 6.28. Gráfica de medias de MOE para los tratamientos de impregnación..... | 49 |
| Figura 6.29. Gráfica de medias de interacción de las sales preservantes y los tratamientos de impregnación | 50 |
| Figura 6.30. Gráfica de medias de P_{max} para las sales preservantes..... | 51 |
| Figura 6.31. Gráfica de medias de P_{max} para los tratamientos de impregnación | 51 |
| Figura 6.32. Gráfica de medias de interacción de las sales preservantes y los tratamientos de impregnación | 52 |
| Figura 6.33. Gráfica de medias de σ_{bw} para las sales preservantes..... | 53 |
| Figura 6.34. Gráfica de medias de σ_{bw} para los tratamientos de impregnación..... | 53 |
| Figura 6.35. Gráfica de medias de interacción de las sales preservantes y los tratamientos de impregnación | 54 |
| Figura 6.36. Gráfica de medias de E_w para las sales preservantes..... | 55 |
| Figura 6.37. Gráfica de medias de E_w para los tratamientos de impregnación | 55 |
| Figura 6.38. Gráfica de medias de interacción de las sales preservantes y los tratamientos de impregnación | 56 |

RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivos impregnar madera de encino (*Q. laurina*) con sales de boro y sales de cobre azol (CA-B) a una concentración de 1,5%, por los métodos de inmersión, baño caliente-frío y Bethell, así como conocer los efectos de la preservación en algunas de las propiedades mecánicas de la madera impregnada.

La madera fue colectada del bosque en aprovechamiento de la Comunidad Indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán. Para verificar la calidad de los tratamientos se determinó la absorción de cada método de acuerdo a la norma ITINTEC 251.033 citada por Guevara (1996), la retención de acuerdo a las normas NMX-C-322-ONNCCE-2003 y U1-13 AWWPA y la penetración se clasificó de acuerdo a JUNAC (1988). En la determinación de las propiedades mecánicas se emplearon las normas ISO 3787 y DIN 52185 para determinar la resistencia mecánica en compresión paralela a la fibra y para determinar la resistencia en flexión estática se emplearon las normas ISO 3133 e ISO 3349. Se aplicó un diseño factorial 2 x 3 para determinar las diferencias estadísticas de la retención y las propiedades mecánicas entre las sustancias preservantes, los métodos de impregnación y la interacción de las mismas. También se aplicó un análisis de varianza simple para las propiedades mecánicas evaluadas entre madera impregnada y la madera sin impregnar.

Los resultados mostraron que el tratamiento de baño caliente-frío presentó los mejores resultados en cuanto a la absorción y retención en la madera impregnada de *Q. laurina* con las sales de boro y sales de cobre azol, no obstante el proceso Bethell mostró una mayor penetración utilizando las sales de boro. Los resultados obtenidos de las pruebas mecánicas mostraron que las sales de boro y las sales de cobre azol utilizadas en la impregnación de la madera de encino afectan significativamente en los esfuerzos de compresión paralela a la fibra en relación con la madera sin impregnar. Por otro lado, los esfuerzos de flexión estática no son afectados estadísticamente por las sustancias impregnantes con respecto a la madera sin impregnar.

Palabras clave: madera de encino, preservación, sales de boro, sales de cobre azol (CA-B), propiedades mecánicas.

ABSTRACT

The present work had as objectives impregnate wood of oak (*Q. laurina*) with boron salts and copper azole (CA-B) at a concentration of 1.5 %, by the methods of immersion, hot-cold bath and Bethell, as well as know the effects of the preservation in some of the mechanical properties of the impregnated wood.

The wood was collected from of forest of the indigenous Community of New San Juan Parangaricutiro, Michoacán. To check the quality of the treatments was determined the absorption of each method according to the standard ITINTEC 251.033 cited by Guevara (1996), the retention according to with the standards NMX-C-322-ONNCCE-2003 and U1-13 AWWPA and the penetration is classified according to JUNAC (1988). In the determination of the mechanical properties were used the standards ISO 3787 and DIN 52185 to determine the mechanical strength in compression parallel to grain and to determine the ultimate strength in static bending were used the standards ISO 3133 and ISO 3349. We applied a factorial design 2 x 3 to determine statistical differences of the retention and the mechanical properties between the substances preservatives, the methods of impregnation and the interaction of the same. It was also applied a simple analysis of variance for the mechanical properties evaluated between impregnated wood and the wood without impregnating.

The results showed that the treatment of hot-cold bath presented the best results in terms of the absorption and retention in the impregnated wood of *Q. laurina* with boron salts and copper azole, however the process Bethell showed greater penetration using the salts of boron. The results of the mechanical tests showed that boron salts and copper azole used in the impregnation of wood of oak significantly affect in the efforts of compression parallel to grain in relation to the impregnated wood. On the other hand, static bending efforts are not statistically affected by impregnating substances with respect to wood without impregnating.

Keywords: oak wood, preservation, boron salts, copper azole (CA-B), mechanical properties.

1. INTRODUCCIÓN

La demanda de productos maderables ha ejercido un agotamiento en los bosques naturales y en determinadas especies de alta durabilidad; esto ha originado la búsqueda de especies opcionales y métodos como la preservación para obtener un producto de igual o mayor durabilidad (JUNAC, 1988).

Desafortunadamente, se desconocen en México las propiedades de impregnación de innumerables especies forestales, entre las que se encuentran los encinos (*Quercus spp.*); género que en razón de su abundancia, son el grupo de latifoliadas más importante de las regiones templadas de México (Rzedowski, 1978); con alrededor de 150 especies (Martínez, 1981 y Nixon, 1993) a 161 (según Arizaga *et al.*, 2009); ocupan a nivel nacional el segundo lugar en aprovechamiento maderable (0,5 millones de m³r), después del pino (4,7 millones de m³r) (SEMARNAT, 2013). De los subgéneros de *Quercus spp.* que existen en México el grupo de los encinos rojos (*Erythobalanus*) es el más utilizado en aprovechamiento industrial en comparación con el grupo de los encinos blancos (*Leucobalanus*), sin descartar a los encinos negros (*Protobalanus*) (De la Paz *et al.*, 2000).

En cuanto a la preservación en nuestro país existe un alto potencial de crecimiento en el uso de madera aserrada preservada que es relativamente nuevo; como resultado de la humedad y de los insectos que existen en algunas regiones del país; así como en la utilización de áreas turísticas y marinas; el uso residencial de las casas construidas anualmente para el seguimiento de población de alto ingreso económico y el uso en aplicaciones estructurales a largo plazo (Ávila *et al.*, 2012).

De acuerdo con sus características particulares los preservadores se pueden destinar a usos generales o específicos, dependiendo del tipo de pieza de la madera, el uso que se le dará y las condiciones a las que estará expuesta durante su vida útil.

En los últimos años algunas de las principales sustancias preservadoras usadas en el tratamiento de la madera han sido objeto de restricciones, que van de la prohibición de su uso, hasta restricciones en cuanto a sus aplicaciones. Por eso, en los últimos tiempos ha habido cambios considerables en cuanto a los tipos de preservadores convenientes y se ha incrementado la búsqueda de nuevas sustancias que sean menos dañinas al hombre y a los ecosistemas en general (Domratcheva, 2005).

Países como Canadá, E.U., Australia, Japón y algunos países Europeos han optado por reemplazar el uso de sustancias CCA (Arsenato cromado de cobre) que aún son utilizadas en México, por productos alternativos para el uso residencial y comercial; como son las sales CC (Citrato amoniacal de cobre), CCB (sales cupro-cromo-bóricas), ACQ (compuestos cuaternarios de cobre alcalino), CA (cobre azol o azoles de cobre), Cu-HDO (di-(N-ciclohexildiazoniumdióxido)-cobre), ACZA (Arsenato de cobre y zinc amoniacal) entre otras (Lebow, 2004; Salas, 2005; Lebow *et al.*, 2005 y Groenier, 2006). En la

actualidad estas alternativas son un poco más caras que las sales CCA, pero probablemente a largo plazo cueste más la salud y los costos de limpieza de la madera tratada con arsénico.

Considerando lo anterior, si las sales CCA fueran restringidas en México, en lo que respecta al uso residencial, muchas de las alternativas más seguras se podrían producir a mayor escala; lo que generaría un producto de igual precio en comparación con la madera tratada con arsénico.

Hoy en día es importante hacer notar el uso de nuevas sustancias preservantes y aportar información que permita dar un mayor enfoque en la preservación de madera de encino y colaborar con el conocimiento de las propiedades tecnológicas de la madera preservada. En la presente investigación se impregnó madera de *Quercus laurina* Humb. & Bonpl con sales de boro y sales de cobre azol tipo B (CA-B), por tres métodos de impregnación: inmersión, baño caliente-frío y presión (Bethell o célula llena). Para comprobar la eficacia de los tratamientos se determinó la absorción, retención y penetración de las sustancias preservantes en la madera; así mismo se realizó un análisis estadístico de la retención entre las sustancias preservantes, los métodos de impregnación y la interacción de las mismas. Además contribuyendo al conocimiento de este abundante género se realizaron pruebas mecánicas de compresión paralela a la fibra y flexión estática en la madera impregnada.

2. ANTECEDENTES

Los resultados de algunos estudios de impregnación con sales de boro y sales de cobre azul realizados en el país y en el extranjero se mencionan a continuación:

Raya (1999) preservó madera de *Quercus scytophylla* Liemb. (encino) impregnándola con sales de boro a una concentración de 20% (de ácido bórico equivalente) con el método de baño caliente a baja presión (0,20 kg/m³), obtuvo valores de retención de 9,31 kg/m³ y una penetración de 7,78 mm, en este estudio la absorción no fue determinada.

Aburto (2006) realizó pruebas de impregnación con maderas de mango (*Mangifera indica* L.) a 24, 72 y 168 horas con sales CCA y sales de boro por los métodos de inmersión y célula llena. Los resultados efectivos fueron, para el método de inmersión empleando sales de boro a 72 h, una absorción de 197,09 kg/m³ y retención de 3,94 kg/m³ que cumple para un nivel de riesgo R1 (2,70 kg/m³ para sales de boro) según la norma Mexicana NMX-C-322-ONNCCE-2003. Para el método de presión empleando sales de boro obtuvo una absorción de 375,25 kg/m³ y una retención (7,50 kg/m³) suficiente para ser empleada en el nivel de riesgo R2 (6,40 kg/m³). En cuanto al color de las probetas tratadas con las sales de boro se tornaron de un color amarillento.

Reyes (2006) comparó el grado de absorción de dos retardantes al fuego en madera de pino mediante los métodos de inmersión, baño caliente-frío y presión (Bethell). Los mayores valores de las variables analizadas se obtuvieron por los dos últimos métodos. Menciona que para los resultados de absorción en los tratamiento de inmersión y baño caliente-frío, existe la relación entre el tiempo de tratamiento y la absorción, por lo que, a mayor tiempo de impregnación hay una mejor absorción del producto.

Berrocal y Rojas (2007) determinaron el grado de resistencia de la madera de *Tectona grandis* L. f. (teca) proveniente de plantaciones forestales jóvenes ante el ataque de termitas de madera seca, comprobó que preservar la madera de albura y duramen con sales inorgánicas de boro, es altamente efectivo para controlar el ataque de *Cryptotermes brevis* (Walker).

Simsek *et al.* (2010) determinaron algunas propiedades mecánicas (resistencia a la compresión paralela a la fibra y módulo de ruptura en flexión estática) y la resistencia al deterioro en la madera sin tratamiento y tratada con boratos ecológicos (tetrahidruoborato de sodio (SFB), tetrafluoruro de boro (AFB) y pentaborato octahidratado de amonio (APB)). Sus muestras de madera se prepararon a partir de *Fagus orientalis* L. (haya oriental) y *Pinus sylvestris* L. (pino silvestre). Antes de los ensayos las muestras de madera se impregnaron con soluciones acuosas a diferentes concentraciones (0,25%, 0,50%, 1,50% y 3,00%) por un método de presión; obteniendo mejores retenciones en las muestras de *F. orientalis* en las concentraciones de 0,25% (1.422 kg/cm²) con la sustancia AFB, 0,50% (2,69 kg/cm²) y 3,00% (17,42 kg/cm²) con la sustancia SFB. Para la concentración de

1,50% la mejor retención se presentó en la madera de *P. sylvestris* (8,42 kg/cm²) con la sustancia SFB. Los resultados de las pruebas mecánicas mostraron que la resistencia a la compresión paralela a la fibra y el módulo de elasticidad en flexión estática de la madera impregnada con los boratos fueron menores en comparación con las muestras de control no impregnadas. En general, los resultados mostraron que las propiedades mecánicas fueron inferiores para las muestras impregnadas con niveles de concentración más altas.

Ando *et al.* (2011) investigaron la comparación de la retención, penetración y lixiviación del preservante azol de cobre (CA-B) en los métodos de célula llena e impregnación pasiva en madera de duramen de *Heritiera fomes* Buch.-Ham. (sundri). Sus resultados en la retención con impregnación pasiva (1,33 kg/m³) y célula llena (1,43 kg/m³) no fueron significativos; en cambio, para la penetración el método de impregnación pasiva (66%) obtuvo los mayores resultados. En la lixiviación encontraron que la madera tratada con el método de célula llena (1,18 %) fue significativamente mayor la lixiviación del preservante que por el método de impregnación pasiva (0,92 %).

Casimiro (2012) impregnó madera de *Pinus pseudostrobus* Lindl con sales de boro y sales de cobre azol (CA-B) por los métodos de inmersión y de baño caliente-frío. La madera impregnada con las sales de boro por el método de inmersión muestra una absorción de 284,80 kg/m³ en 48 h y una retención máxima de 2,89 kg/m³ en igual periodo de tiempo. En cuanto a la penetración máxima alcanzada para este método fue de 10 mm. En la madera impregnada por el método de baño caliente-frío con las sales de boro se obtuvo una retención máxima de 3,88 kg/m³, una penetración de 12 mm y absorción de 388 kg/m³. En el caso de la madera impregnada con sales de cobre azol por el método de inmersión se determinó una absorción de 301,46 kg/m³, una retención de 3,01 kg/m³ y una penetración total regular. Para el método de baño caliente-frío con las sales de cobre azol se obtuvo una penetración total irregular, una absorción promedio de 381,86 kg/m³ y una retención de 3,81 kg/m³. Menciona que las probetas impregnadas con las diferentes sustancias presentaron cambio de color. La madera impregnada con sales de boro se deslavaron ligeramente, en cambio las probetas impregnadas con sales de cobre azol (CA-B) tuvieron un cambio en su color tornándose de color verde azulado.

Islam *et al.* (2013) trataron postes de madera de Cedro japonés (*Cryptomeria japonica* (L. f.) D. Don) con azoles de cobre tipo B (CAz-B) y carbonato de polifosfato (PPC) en condición verde (97% de contenido de humedad (CH)) y seca al horno (18% CH) por el método de impregnación pasiva (inmersión con incisiones de láser de CO₂ en la madera). En la prueba de impregnación con los azoles de cobre por el que se obtuvo una mayor retención en la madera verde (4,97 kg/m³) en comparación con la madera secada al horno (4,88 kg/m³).

Villasante *et al.* (2013) determinaron el efecto de tratamiento de la madera de *Pinus sylvestris* L. (pino silvestre) con sustancias preservantes en las propiedades mecánicas. Utilizaron muestras de madera de *P. sylvestris* sin tratamiento y tratadas con un preservante oleosoluble (Vacsol Azure WR 2601) y un preservante hidrosoluble (cobre azol) evaluando la resistencia mecánica en flexión estática, módulo de elasticidad y la fuerza de compresión paralela a la fibra. Sus resultados principales indican que la madera tratada con ambas sustancias presentan un aumento estadísticamente significativo en la resistencia mecánica para las tres características mecánicas. Mencionan que no hay una correlación entre la resistencia a la compresión paralela y el grado de impregnación de la madera con sales de cobre azol; los autores indican que la explicación más probable para sus resultados se debe a los cambios en la presión durante el tratamiento.

Díaz (2014) evaluó los métodos de impregnación por inmersión, baño caliente-frío y presión (Bethell), utilizando sales de boro y azoles de cobre en madera de *Quercus rugosa* Née. Obtuvo retenciones que pueden ser empleadas en un nivel de riesgo R1 con los métodos de inmersión y presión utilizando las sales de boro; en cuanto al método de baño caliente-frío los resultados de las retenciones obtenidos con las sales de boro (2,10 kg/m³) no cumplieron con la retención mínima para la clase de riesgo R1. La madera impregnada con azoles de cobre por los métodos de inmersión, baño caliente-frío y presión presentaron retenciones de 2,88 kg/m³, 2,09 kg/m³ y 3,50 kg/m³ respectivamente.

Islam *et al.*, (2014) impregnaron madera para construcción de Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* Franco) y Cedro japonés (*Cryptomeria japonica* (L. f.) D. Don) con azoles de cobre tipo B y un retardante de fuego (PPC) utilizando el método de impregnación pasiva. Determinaron retenciones de 5,32 y 5,58 kg/m³ en condición verde y seca al horno en la madera de Cedro japonés y de 5,01 y 4,81 kg/m³ para la madera de Douglas fir. Obtuvieron una penetración del 100% aproximadamente en toda la madera impregnada. Menciona que es posible tratar la madera de condición verde en 48 horas y que la técnica de impregnación pasiva podría ser útil para la aplicación industrial.

3. GENERALIDADES

3.1. Generalidades de la especie de encino (Bello y Labat, 1987)

| | |
|---------------------------|----------------|
| Reino | Plantea |
| División | Magnoliophyta |
| Clase | Magnoliopsida |
| Orden | Fagales |
| Familia | Fagaceae |
| Género | <i>Quercus</i> |
| Epíteto específico | <i>laurina</i> |

Nombre científico: *Quercus laurina* Humb. & Bonpl.

Nombres comunes: encino laurelillo, encino prieto, encino colorado, encino blanco, encino chilillo y encino urikua.

Descripción: Árbol de 10-40 m de alto, diámetro de 15-100 cm; ramillas de 2-4 mm de grueso, con mayor frecuencia de 4 mm, con tomento amarillo cuando son jóvenes, en la madurez de color café oscuro y con pocas lenticelas amarillentas; yemas ovoides, agudas, glabras, cafés rojizas, de 2-4 mm de largo; estípulas oblanceoladas subuladas, escamosas, color café rojizo, pubescentes, de 3-4 mm o menos de largo; hojas jóvenes cubiertas por pelos simples, rojizos, con pubescencia, dispersas y pelos estrellados; hojas maduras cariáceas y rígidas, de verdes a ligeramente cafés, lustrosas, de elíptico-oblanceoladas a lanceoladas, de 3,3-14,5 cm de largo por 1-5 cm de anchos, agudas o atenuadas, generalmente con una arista de 2 mm de largo en el ápice, base redondeada, subcordada o subaguda, márgenes engrosados, enteros, o bien con 1-3 aristas, dientes o serraciones en la mitad superior de la hoja, 5-13 nervios laterales a cada lado, envés de la hoja verde a verde-amarillo, brillante, casi glabro, excepto por mechones de pelos en los ángulos que se forman entre las venas laterales y el nervio central; peciolo de 0,8-3,6 cm de largo, con abundante tomento amarillo; fruto bianual, solitario o en pares, sobre un corto pedúnculo, de 3-8 mm de largo, involucre hemisférico de 10-17 mm de diámetro por 7-10 mm de alto, escamas leñosas, de canescentes a casi glabras, bellota corta, ovoide, de 15-20 mm de largo por 13-17mm de ancho.

Hábitat: ladera de cerro, barrancas húmedas, sitios montañosos, suelos generalmente profundos, someros, rara vez rocosos; en ocasiones forma parte del bosque mesófilo de montaña, usualmente asociados a especies de encino, pino, oyamel y otras como son *Quercus rugosa*, *Q. crassipes*, *Q. candicans*, *Q. martinezii* y *Q. magnoliifolia*; *Pinus pseudostrobus*, *P. montezumae*, *P. michoacana* y *P. leiophylla*; *Abies religiosa*; *Symplocos peionophylla*, *Ternstroemia pringlei*, *Clethra mexicana*, *Styrax ramirezii* y *Tila mexicana*. Se distribuye entre los 1500-3200 msnm.

Distribución botánica de la especie: en Michoacán presenta una distribución más o menos continua a lo largo de la Cordillera Neovolcánica y pequeños manchones en la parte sur de la Depresión del Río Lerma, así como en la parte central y Oeste de la Sierra Madre del Sur. En México se presentan en los siguientes estados: Aguascalientes, Guanajuato, Querétaro, Chiapas, Hidalgo, Tamaulipas, Durango, San Luis Potosí, Colima, Guerrero, Jalisco, Estado de México, Distrito Federal, Morelos, Tlaxcala, Puebla, Veracruz, Nayarit, Oaxaca y Sinaloa (De la Paz Pérez y Dávalos, 2008) (figura 3.1).

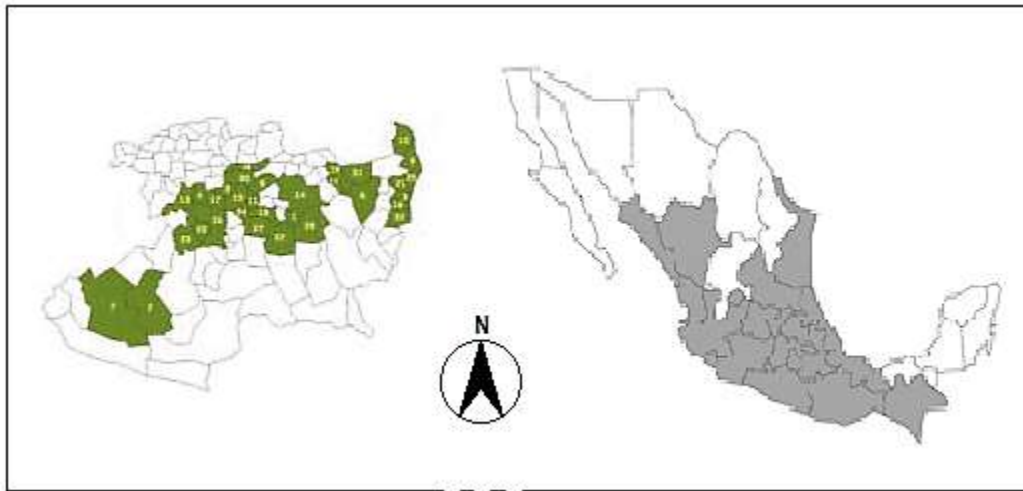


Figura 3.1. Distribución geográfica de *Q. laurina* (Fuente: Arizaga *et al.* 2009; De la Paz Pérez y Dávalos, 2008).

Características macroscópicas de la madera: De la Paz Pérez *et al.* (2006) reportaron que la madera no presenta diferencia de color entre albura y duramen, es de color castaño rojizo claro 5YR 6/4 (Munsell, 1990), los radios multiseriados son de color castaño rojizo 2,5YR 5/3 (*ibid*) contrastando con los demás elementos celulares. No tiene olor ni sabor característicos, el brillo es mediano, el vetado pronunciado, la textura gruesa y el hilo recto. Los anillos de crecimiento están marcados por una hilera de fibras y poros de mayor diámetro que los del resto del anillo.

Características microscópicas de la madera: La madera presenta porosidad semianular, los poros de la madera temprana son más grandes que los de la madera tardía, forman de una a dos hileras. Los poros son exclusivamente solitarios y se arreglan en hileras radiales y diagonales. Son poco numerosos, de contorno oval y circular, de diámetro tangencial mediano en la madera temprana y pequeño en la tardía. Los elementos de vaso son de longitud mediana, con platina de perforación simple, paredes terminales oblicuas y punteaduras areoladas alternas de forma oval. Las punteaduras vaso-radio son simples, con bordes reducidos y arreglo vertical. Alrededor de algunos vasos de la madera temprana se encuentran traqueidas vasicéntricas. El parénquima axial es difuso agregado. Algunas células presentan cristales de forma romboidal. Los radios son uniseriados y multiseriados, homogéneos, formados por células procumbentes. Los primeros son numerosos, de 11

células de altura. Los multiseriados son poco numerosos, altos y anchos. Presentan gran cantidad de taninos. Las fibras son de tipo libriforme y fibrotraqueidas, de longitud mediana, diámetro fino y pared mediana (De la Paz Pérez *et al.*, 2006). En el cuadro 3.1 se incluye el valor de media para la longitud de los vasos, altura y anchura de los radios y longitud, diámetro y grosor de la pared de fibras de la madera de *Q. laurina*.

Cuadro 3.1. Valores anatómicos de *Q. laurina*.

| ESPECIE | VASOS | RADIOS MULTISERIADOS | | FIBRAS | | |
|-------------------|------------------------|-------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|----------------------|
| | Longitud μm | Altura cm | Anchura μm | Longitud μm | Diámetro μm | Grosor μm |
| <i>Q. laurina</i> | 442-632 | 1,5-2,0 | 280-457 | 1186-1548 | 8 | 5-8 |

Características físicas y mecánicas: De la Paz Pérez y Dávalos (2008) mencionaron que la madera es pesada a muy pesada, de contracciones altas a muy altas, dura a muy dura, rígida a muy rígida, resistente a muy resistente a la compresión paralela y a la compresión perpendicular y moderadamente resistente a resistente al cortante paralelo (cuadro 3.2).

Cuadro 3.2. Propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Q. laurina*.

| VALORES FÍSICOS | | | | | | |
|-------------------|----------|---------------------------|-------|----------------------------|----------------------|------------------------|
| Densidad básica | | Contracción volumétrica % | | Coeficiente de anisotropía | | |
| 0,652 | | 18,48 | | 2,63 | | |
| VALORES MECÁNICOS | | | | | | |
| Dureza (N) | | Flexión (MPa) | | Compresión (MPa) | | Cortante (MPa) EMAX |
| lateral | extremos | MOR | MOE | Paralela EMAX | perpendicular ELP | |
| 6740 | 6620 | 73,6 | 14620 | 37,9 | 8,6 | 10,1 |

Usos: De la Paz Pérez *et al.*, (2006) recomiendan que la madera de *Q. laurina* puede ser utilizada en la elaboración de productos de alta calidad que pongan de manifiesto sus características estéticas tales como: ebanistería, chapa, pisos, lambrín, cancelos, accesorios y decoración en general, juguetes, muebles infantiles, partes de instrumentos musicales, artículos torneados en general, cajas, adornos, diversos tipos de recipientes, etc.

Bello y Labat (1987), señalan que los tallos son utilizados para la fabricación de cabos de herramientas y postes para cerca, los fustes y ramas son usados como leña y carbón, al igual que son utilizado para arados, redilas y vaquetas para tambor.

3.2. Generalidades de sustancias preservantes

La industria de la preservación de madera, ha descubierto numerosas sustancias tóxicas, que aplicadas racional y convenientemente, protegen la madera de sus enemigos naturales. Estos compuestos químicos puros o mezclados, varían ampliamente en naturaleza, costo y eficacia; aspectos que están directamente relacionados con el uso al que se va destinar la madera (Vaca, 1998).

En los últimos años han aparecido productos alternativos al CCA; esto se ha venido concediendo desde su restricción por la U.S. EPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos) y las industrias de madera tratada de este mismo país en él 2004; en el 2006 por la APVMA (Autoridad de Medicina Veterinaria y Pesticidas Australianas) y en Europa por la Comisión Directiva de la Unión Europea (acta 2003/2/CE) que limitó la comercialización y uso del arsénico, incluyendo el tratamiento de la madera. Para el 2012 en Reino Unido; el Departamento del Medio Ambiente, Alimentación y Asuntos Rurales (DEFRA) clasificó los residuos de la madera tratada con CCA como residuos peligrosos (USEPA, 2003; Kear *et al.*, 2008; E-CENTRO, 2012).

Respecto a la implementación y utilización de nuevas sustancias preservantes a continuación se menciona la descripción de las sustancias utilizadas para los tratamientos de impregnación del presente estudio.

3.2.1. Sales de boro

Los compuestos de boro fueron inicialmente utilizados como productos retardadores de la acción del fuego, pero posteriormente se comprobó que tenían acción efectiva contra algunos insectos de la madera como los líctidos (JUNAC, 1988). En la actualidad los boratos han desempeñado un papel cada vez más importante en la preservación de la madera en todo el mundo y especialmente en los E.U. desde la cancelación voluntaria del CCA para los patrones de uso de madera residencial en 2004 (Freeman *et al.*, 2009).

La madera tratada con boro debe utilizarse solamente en aplicaciones donde la madera no esté expuesta al agua de lluvia, humedad o en contacto con el suelo. Los preservantes de boro son las sales de sodio, tales como octaborato de sodio, tetraborato de sodio y pentaborato de sodio que se disuelven en agua. Estas formulaciones han recibido una atención creciente en los últimos años, ya que son baratos y tienen baja toxicidad para los mamíferos. El boro de la madera tratada es también inodoro e incoloro, y puede ser pintado o teñido. Los boratos son preservantes efectivos contra hongos de pudrición e insectos. Son difusibles y en prácticas apropiadas de un buen tratamiento pueden lograr una excelente penetración en las especies que son difíciles de tratar con otros preservantes. Sin embargo, el boro en la madera sigue siendo soluble en agua y puede filtrarse fácilmente en el suelo o por el agua de lluvia. Los preservantes de boro están estandarizados por la American Wood

Protection Association (Asociación Americana de Protección de la Madera) (AWPA), pero sólo para aplicaciones que no se expongan al agua líquida. Un ejemplo de tal uso es en la construcción de edificios de madera en zonas de alto riesgo de termitas (Lebow, 2004).

Los compuestos de boro son algo corrosivos, por eso deben mezclarse cantidades equivalentes de ácido bórico y bórax para contrarrestar ese efecto negativo. La proporción más recomendada es de 40% de ácido bórico y 60% de bórax (1 parte de ácido bórico equivale a 1,5 de bórax). Al utilizarse para preservar maderas en construcción de viviendas, muebles y artesanías, la concentración expresada como equivalente en ácido bórico debe ser del 2 al 3% (JUNAC, 1988).

3.2.2. Sales de cobre azol (Lebow, 2004; AWPA, 2013)

Azoles de cobre o sales de cobre azol es una formulación preservante libre de arsénico desarrollada hace más de 25 años en Europa, que se basa principalmente en el carbonato de cobre (cobre amina) y compuestos orgánicos (co-biocidas) llamados azoles, para proteger la madera de la descomposición y el ataque de insectos. Se ha llegado a un amplio uso en Canadá, E.U., Chile, Europa, Japón y Australia después de las restricciones de las sales CCA. Se comercializan ampliamente bajo la marca Wolmaniced en América del Norte y la marca Tanalith en toda Europa y otros mercados internacionales.

La primera formulación de azoles de cobre fue tipo A (CBA-A), que contiene 49% de cobre, 49% de ácido bórico y 2% Tebuconazol. Más recientemente, se formuló el cobre azol tipo B (CA-B). El CA-B no contiene ácido bórico y se compone de 96% de cobre y 4% Tebuconazol. La madera tratada con cualquier formulación de cobre azol tiene un color marrón verdoso y poco o ningún olor. Las formulaciones se enumeran en las normas de la AWPA para el tratamiento de una variedad de especies de madera blanda utilizada sobre el suelo o en contacto con él. Aunque aparece como una formulación de amina, el cobre azol también se puede formular con un disolvente de amoníaco de amina. La inclusión de amoníaco, sin embargo, es probable que tenga efectos leves en el aspecto de la superficie y el olor inicial de la madera tratada.

Actualmente existen nuevas formulaciones de cobre azol; cobre azol tipo C (CA-C) adaptado en el 2009 en el libro de normas de la AWPA y cobre azol disperso o cobre azol micronizado (μ CA-C) las cuales reducen el impacto en ambientes acuáticos y terrestres, y son menos corrosivas para los sujetadores metálicos.

Las retenciones estándar que presenta la norma U1-13 AWPA para las sales CA-B es de 1,7 kg/m³ para aplicaciones por encima del suelo y construcción en interiores y exteriores, 3,3 kg/m³ para aplicaciones de componentes no críticos en contacto con el suelo (madera enterrada) y en contacto con el agua dulce. Retenciones de 5,0 kg/m³ para aplicaciones en contacto con el suelo o agua dulce y componentes críticos o de difícil reemplazo.

3.3. Generalidades de los métodos de impregnación

Entre los métodos de preservación que protegen la madera a largo plazo se tienen los siguientes procesos:

3.3.1. Métodos de tratamiento sin presión

3.3.1.1. Brochado y pulverizado

Son métodos sencillos en los que se aplican sustancias tóxicas a la madera ya instalada o puesta en servicio y utilizada en construcciones, se logran penetraciones pequeñas y los productos más utilizados son los oleosolubles, es necesario aplicar dos a tres veces para cubrir totalmente la superficie, al manipular el producto para proteger la madera se debe tener mucho cuidado (Vaca, 1998).

3.3.1.2. Inmersión

El tratamiento de inmersión se lleva a cabo introduciendo la madera que se pretende impregnar en recipientes apropiados a los tamaños de las piezas a tratar, en una solución preservadora como pueden ser sales hidrosolubles. A las piezas que se tratan se les coloca algún contrapeso encima para evitar que la madera flote. El tiempo de inmersión puede ser breve o prolongado dependiendo de la cantidad de preservante que se pretenda introducir a la madera. Después de la operación se recomienda dejar secar la madera para que se fijen los preservantes antes de ser puesta en uso (Ávila y Herrera, 2010).

3.3.1.3. Baño caliente-frío

Este tratamiento consiste en sumergir la madera en agua caliente ya sea con preservantes o sin ellos, posteriormente se pasan las piezas a una solución preservadora a temperatura ambiente teniendo el cuidado de que las piezas estén completamente sumergidas colocándoles un contrapeso. Lo importante de este tratamiento es procurar una diferencia de temperatura considerable ya que al calentarse la madera, el aire que se encuentra en su interior se expande y sale de ella; y al poner la madera en una solución fría se produce un vacío parcial que favorece a la penetración del preservante que se pretende utilizar, ya que las sales hidrosolubles se descomponen por encima de los 45 °C, pero a los productos oleosos (pentaclorofenol y creosota) les favorece mayores temperaturas. Una consideración importante es que se recomienda que el tiempo del baño frío sea del doble que el del baño caliente (COFAN, 1999).

3.3.2. Métodos de tratamiento a presión

3.3.2.1. Proceso Bethell (célula llena)

Para la aplicación del método Bethell se requiere de una instalación o planta de tratamiento que debe contar con una autoclave, bomba de vacío, bomba de presión, recipiente de disolución y depósito de reserva. El proceso inicia al introducir la madera al autoclave y se comienza con un vacío inicial de 600 mmHg al nivel del mar de entre 15 a 60 minutos dependiendo de la madera que se esté tratando; sin quitar el vacío se deja pasar el preservante al autoclave hasta llenarlo y posteriormente se aplica presión de entre 8 a 14 kg/cm²; esta presión se obtiene hasta obtener la retención deseada. Posteriormente se devuelve el líquido preservante al tanque de almacenamiento y por último se aplica un vacío por unos minutos para evitar que la madera salga escurriendo y así poder abrir el autoclave. Se recomienda dejar secar la madera para que se fijen los productos químicos a la madera antes de ponerse en servicio (JUNAC, 1988).

3.3.2.2. Proceso Rueping (Vaca, 1998)

Generalmente este proceso es empleado para soluciones oleosolubles, tiene como característica principal la aplicación de una presión preliminar de aire a la madera antes de inyectar el preservante caliente oleosoluble, esta presión inicial suele ser de 4-5 kg/cm², llenando el autoclave con el producto químico, de manera que el aire inyectado quede aprisionado en la madera.

La penetración del producto es mediante la aplicación de una presión mayor, hasta obtener la absorción deseada comprimiendo aún más el aire que había quedado en la madera. Finalmente se disminuye la presión; se vacía el autoclave y se somete la carga a un vacío final.

3.3.2.3. Proceso Lowry (célula vacía)

Este proceso también es denominado de célula vacía al igual que el Rueping, sus absorciones son relativamente bajas, son muy útiles para preservar madera permeables, no se hace presión inicial como en el método Bethell, sino que una vez colocada la madera en el cilindro de tratamiento, se llena con la solución a presión atmosférica, se eleva la presión a 10-12 kg/cm² manteniendo a cierto tiempo, luego se bombea el preservante al tanque de almacenamiento y se hace el vacío final, para luego recuperar el exceso de líquido y secar la superficie de la madera (Vaca, 1998).

3.4. Generalidades de las propiedades mecánicas (Herrera, 1992)

Las propiedades mecánicas de la madera, a diferencias de las físicas, requieren de la aplicación de una fuerza externa para poder determinarlas.

La determinación de estas propiedades, arrojan resultados que nos conducen a conocer el nivel de resistencia y elasticidad de la madera, de ahí que resulten de gran importancia, no solo para la construcción con madera, sino en la elaboración de gran variedad de artículos.

3.4.1. Compresión paralela a la fibra

Es la resistencia de la madera a una carga en dirección paralela a las fibras, la que se realiza en columnas cortas para determinar la tensión de ruptura, tensión en el límite de proporcionalidad y módulo de elasticidad.

La resistencia a la compresión paralela a la fibra, es de gran importancia en la utilización de la madera como elemento estructural. Los resultados obtenidos de esta prueba, proporcionan una propiedad mecánica característica y permite concluir sobre la calidad estructural de la madera.

Los factores que influyen en la resistencia a la compresión paralela son la inclinación de la fibra, la densidad, la humedad, la temperatura, los nudos y la constitución química (Santillán, 2013).

3.4.2. Flexión estática

La flexión es uno de los esfuerzos a la que se ve sometida la madera de construcción más comúnmente, la forma como se mide la resistencia en este caso, es aplicada con una carga concentrada en el centro de la longitud de la muestra apoyado en sus extremos; cuando se flexiona la muestra o el elemento ensayado, se presenta a la vez dos tipos de esfuerzos en el espesor de la pieza; en la parte superior de compresión y en la inferior de tensión. Este comportamiento se debe a las diferencias en las relaciones esfuerzo-deformación de la madera sometida a compresión o a tensión. Por regla general las fallas por flexión se inician con el aplastamiento de las fibras externas sometidas a compresión, a la que sigue la rotura de las fibras en tensión. Sin embargo, en algunas maderas duras de especies de latifoliadas el comportamiento puede ser inverso, iniciándose la falla en las fibras externas sometidas a tensión (Sánchez y Bocanegra, 2006).

Para la flexión estática, los factores que la afectan son la inclinación de la fibra, el peso específico, el contenido de humedad, la temperatura, las dimensiones de la probeta con la que se ensaye, los nudos y grietas y la fatiga (Santillán, 2013).

4. OBJETIVOS

4.1. General

Evaluar la impregnación de la madera de *Quercus laurina* Humb. & Bonpl con sales de boro y sales de cobre azol tipo B empleando los métodos de: inmersión, baño caliente-frío y Bethell.

Conocer el efecto de la impregnación en algunas de las propiedades mecánicas de la madera preservada de *Q. laurina*.

4.2. Específicos

Determinar la calidad de los tratamientos (absorción, retención y penetración de las sustancias preservantes en la madera de *Q. laurina*).

Determinar la resistencia mecánica en flexión estática y en compresión paralela a la fibra en la madera preservada de *Q. laurina*.

Determinar las diferencias estadísticas de la retención entre las sustancias preservantes, los métodos de impregnación y la interacción de las mismas.

Determinar las diferencias estadísticas de las propiedades mecánicas entre la madera impregnada y la madera sin impregnar y entre las sustancias preservantes, los métodos de impregnación y la interacción de las mismas.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Procedencia de la madera

El material de estudio fue colectado en la comunidad indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro, municipio de Nuevo Parangaricutiro, Michoacán de árboles seleccionados que proporcionó la comunidad. La especie fue identificada por el M. C. Miguel Ángel Silva Farías de la Facultad de Biología de la UMSNH.

5.2. Preparación de la madera antes de su preservación

De los árboles seleccionados se dimensionaron pequeñas trozas las cuales fueron trasladadas de la comunidad al aserradero del Laboratorio de Física y Tecnología Mecánica de la Madera de la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera para ser aserradas y acondicionadas para su preservación. Para el dimensionado se procuró que el corte fuera radial en la mayoría de las tablas y tablonés.

Posteriormente se sometieron a un tratamiento de secado en una estufa experimental marca Hildebrand, con capacidad de carga de 1,0 m³, con ventilación forzada, sistema de control automático y depresión psicométrica. La madera se apiló en la estufa utilizando separadores de ¾” de espesor entre camas. El proceso de secado se realizó utilizando la secuela T3-C1 para un espesor de 5/4” y 9/4” (anexo 1); con la cual se obtuvo un contenido de humedad promedio de 9%. Lo anterior se realizó siguiendo los procedimientos recomendados por los Programas de secado para maderas comerciales templadas y tropicales (Boone *et al.*, 1988).

Concluido el secado, las tablas y tablonés fueron cepilladas, canteadas y dimensionadas en listones; a partir de ellos se obtuvieron 90 probetas de 2 cm x 2 cm x 30 cm y 48 probetas de 2 cm x 2 cm x 6 cm para los tratamientos de preservación. En la selección del material de estudio se procuró que tuvieran el mínimo de defectos por ejemplo nudos, alabeos y corazón podrido. A continuación se pasaron a sellar los extremos de cada una de las probetas con tres aplicaciones de esmalte anticorrosivo alquidálico con un tiempo entre aplicaciones de 60 minutos. El sellar los extremos de las probetas fue con el objetivo de evitar que la penetración del preservante se lleve a cabo por los extremos de la probeta.

5.3. Material y equipo utilizado para los métodos de impregnación

Tratamiento por inmersión

- Recipiente de inmersión
- Contrapesos (tabique)
- Balanza digital marca Ohaus con precisión de 0,0001 g.
- Flexómetro y vernier marca Mitutoyo con precisión de 0,01 mm.
- Guantes y overol

Tratamiento de baño caliente-frío

- Baño maría marca Lab. Companion
- Recipiente de inmersión
- Contrapeso (tabique)
- Balanza digital marca Ohaus con precisión de 0,0001 g.
- Flexómetro y vernier marca Mitutoyo con precisión de 0,01 mm.
- Termómetro
- Guantes y overol

Tratamiento de célula llena

- Autoclave experimental con una capacidad del cilindro de 12,566 litros.
- Balanza digital marca Ohaus con precisión de 0,0001 g.
- Flexómetro y vernier marca Mitutoyo con precisión de 0,01 mm.
- Cronómetro
- Guantes y overol

5.4. Concentración y preparación de las soluciones preservantes

La concentración de cada una de las soluciones de impregnación para este estudio fueron de 1,5%. Las proporciones de los componentes de la mezcla de las sales de boro se basaron en las especificaciones de la norma NMX-C-178-ONNCCE-2001 (ONNCCE, 2006b) y para el caso de las sales de cobre azol tipo B (CA-B), la proporción de los componentes de la mezcla se establecieron de acuerdo a la norma P5-10 AWPA (AWPA, 2013b) o norma P32-10 AWPA, (AWPA, 2013a).

5.4.1. Sales de boro

Las sustancias utilizadas fueron: 39,40% de ácido bórico (H_3BO_3) y 60,60% de borato de sodio decahidratado ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$) ambas marca Karal, que se disolvieron en 19,7 litros (L) de agua para obtener una solución de 20 L.

El pH se determinó dentro de un rango de 7,9 a 9,0.

5.4.2. Sales de cobre azol tipo B

Para este proceso las sales de cobre azol tipo B tuvieron la siguiente composición: 96,1% de Sulfato cúprico pentahidratado ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$) como cobre y 3,9 % de Tebuconazol (PREVENTOL OF) como Azoles.

Lo anterior se disolvió en una solución de etanolamina en agua para obtener 20 L de solución. El peso de la etanolamina contenida en la solución de tratamiento fue entre $3,8 \pm 0,2$ veces el peso del cobre.

La composición del preservante presente en la solución de tratamiento podrá variar dentro de los límites siguientes:

| | Min % | Max % |
|-------------------------|-------|-------|
| Cobre como Cu | 95.4 | 96.8 |
| Azoles como Tebuconazol | 3.42 | 4.6 |

5.5. Procesos de impregnación

A continuación se describen los procesos de impregnación que se basaron en la propuesta de Ávila y Herrera (2010). Para cada tratamiento y en cada una de las soluciones (sales de boro y sales de cobre azol) se emplearon 15 probetas de 2 cm x 2 cm x 30 cm y 8 probetas de 2 cm x 2 cm x 6 cm.

Antes de ser ingresadas las probetas a cada tratamiento se determinó el contenido de humedad (CH) de acuerdo a la fórmula de Vaca (1998); con la cual se obtuvo un CH promedio de 9% (± 0.2).

Fórmula utilizada para el contenido de humedad:

$$CH = \frac{Ph - Ps}{Ps}$$

Dónde:

CH = Humedad de la madera expresada como un porcentaje de su peso anhidro.

Ph = Peso de la madera en estado húmedo o peso inicial.

Ps = Peso de la madera en estado anhidro o peso final.

5.5.1. Tratamiento por inmersión

Para este proceso se tomaron las medidas de grueso, ancho y largo de cada una de las probetas con precisión de 0,01 mm y se pesaron con precisión de 0,0001 g para obtener el peso inicial. Las probetas se colocaron en unas rejillas de madera para un mejor acomodo en el recipiente de inmersión; se colocaron contrapesos sobre la rejilla para que no flotarán las probetas.

Una vez colocadas las piezas, se agregó una cantidad suficiente de solución preservante para cubrir completamente las probetas y se dejaron sumergidas durante 48 horas. Después de este lapso de tiempo se retiraron los contrapesos para extraer las probetas una por una escurriéndoles el exceso de la solución. De inmediato se pesaron y se registró el peso final. Finalizada la impregnación se dejaron secar a temperatura ambiente durante 10 días.

5.5.2. Tratamiento de baño caliente-frío

Se registraron las medidas de ancho, largo, espesor y peso inicial de cada una de las probetas de igual forma que en el método anterior. Las probetas fueron colocadas en dos rejillas para su mejor acomodo dentro del baño caliente.

Se agregó agua destilada al contenedor del baño que fue calentada a una temperatura de 60 °C, cuando alcanzó dicha temperatura se sumergieron las probetas en el contenedor y se colocaron contrapesos para que éstas no flotaran. El baño se mantuvo a una temperatura promedio de 60 °C, por un periodo de 16 horas. Se retiraron las probetas del baño maría una vez concluido el tiempo. Dejando escurrir el excedente de agua, se registraron las medidas de ancho, largo, espesor y su peso antes de sumergirse en el recipiente que contenía la sustancia preservante.

Teniendo la sustancia en el recipiente, se sumergieron las probetas, colocándoles un contrapeso para que permanecieran sumergidas, esto por un periodo de 32 horas. Transcurrido el tiempo se retiraron los contrapesos y se extrajeron las probetas, dejando escurrir el excedente de la sustancia para después registrar el peso final. Finalizada la impregnación se dejaron secar al aire libre durante 10 días.

5.5.3. Proceso Bethell

Se registró grueso, ancho y largo con precisión de 0,01 mm de cada una de las probetas y se pesaron con precisión de 0,0001 g para registrar el peso inicial. La solución se colocó en el depósito de la planta piloto y se agitó antes de la impregnación para homogenizar la solución.

Se colocaron las probetas dentro de la autoclave experimental separadas por una rejilla de madera y se procedió a cerrar la tapa apretando cada uno de los tornillos siguiendo el orden en la misma. Se verificó que todas las llaves estuvieran cerradas y que el depósito de la bomba de vacío tuviera agua necesaria para el proceso. Siguiendo con el método se abrió la llave de paso del vacuómetro y la llave que va de la autoclave a la bomba de vacío. Se encendió el interruptor de vacío hasta alcanzar un valor de 50 cmHg durante 5 min. En el mismo momento de encender el interruptor de vacío, se abrió la llave de paso del depósito de agua y la bomba de vacío. Se cerró la llave de la autoclave a la bomba de vacío y se apagó el interruptor de vacío.

Posteriormente se cerró la llave del depósito del agua y enseguida la llave del vacuómetro. Después se abrió la llave de paso del depósito de las sales y al igual la llave del manómetro. Se encendió la bomba de presión cuidando que no excediera un valor de 8 kg/cm². Se purgó la autoclave por la llave superior para sacar la burbuja de aire que pudo haberse formado dentro.

Después se volvió a aplicar presión hasta alcanzar una presión constante de 8 kg/cm². Se purgó nuevamente para asegurar que no hubiera aire dentro de la autoclave. Se abrió la llave de la autoclave para liberar la presión y extraer la solución preservante.

Se tomó un tiempo para que se drenara la solución y enseguida se pasó a cerrar la llave, en seguida se cerró la llave del manómetro y se abrió la llave del vacuómetro y la llave del autoclave a la bomba de vacío. Se encendió la bomba de vacío y se abrió la llave de paso del agua para hacer el sello de agua de la bomba. Se realizó un vacío durante 5 minutos, después se cerró la llave de la autoclave a la bomba de vacío, se apagó la bomba de vacío y se cerró la llave de sello del agua.

A continuación se liberó el vacío abriendo la llave inferior del vacío. Se cerró la llave del vacuómetro y se destapó la autoclave, se tomaron los pesos de las probetas y se registraron.

5.6. Control de calidad de los tratamientos

Una vez finalizadas las impregnaciones con las sales de boro y las sales de cobre azol por medio de los tres métodos empleados se verificó la efectividad de los tratamientos determinándose la absorción de acuerdo a la norma ITINTEC 251.033 citado por Guevara (1996), la retención de acuerdo a las normas NMX-C-322-ONNCCE-2003 (ONNCCE, 2006) y U1-13 AWPA (AWPA, 2013d) y la penetración de acuerdo a JUNAC (1988).

5.6.1. Determinación de la absorción

La absorción es el volumen de solución preservante que ingresa a la madera, por unidad de volumen de madera realmente impregnada (kg/m³), (ONNCCE, 2002).

Para poder determinar la absorción en los tres métodos de impregnación y en ambas sustancias preservantes, se utilizó la siguiente ecuación.

Ecuación para la determinación de la absorción (Ávila y Herrera, 2010).

$$A = \frac{(P_2 - P_1)}{V} ; \left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right]$$

dónde:

A= Absorción (kg/m³)

P₁= Peso de la probeta antes del tratamiento (kg)

P₂= Peso de la probeta después del tratamiento (kg)

V= Volumen de la madera tratada (m³)

Los resultados se clasificaron de acuerdo a los siguientes rangos (norma ITINTEC 251.033 citado por Guevara, 1996):

Absorción alta (AA). Más de 200 kg/m³;
Absorción buena (AB). De 150 a 200 kg/m³;
Absorción mala (AM). De 100 a 149 kg/m³;
Absorción nula (AN). Menos de 100 kg/m³;

5.6.2. Determinación de la retención

La retención es la cantidad de componentes tóxicos activos del preservante que permanece en la madera al término del proceso de impregnación expresada en kilogramos de sustancia activa (óxido del preservante) por metro cúbico de madera (kg/m³), (ONNCCE, 2002).

Para determinar la retención de las dos sustancias preservantes y en ambos métodos de impregnación, fue necesario utilizar la siguiente ecuación.

Ecuación para la determinación de la retención (Ávila y Herrera, 2010).

$$R = A \cdot \frac{(C)}{100}; \left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right]$$

dónde:

R= Retención (kg/m³)

A= Absorción (kg/m³)

C= Concentración (%)

Los valores de retención de las sales de boro se clasificaron de acuerdo a la Norma Mexicana NMX-C-322-ONNCCE-2003 “Industria de la construcción-Madera preservada a presión-Clasificación y requisitos” (anexo 2 y 3) y mediante la norma U1-13 AWWA “Sistemas de categorías de uso: Especificaciones de uso para madera tratada” (anexo 4 y 5) se clasificaron los valores de retención de las sales de cobre azol tipo B.

5.6.3. Determinación de la penetración

La penetración es la distancia que cubre el preservante de la superficie al centro de la pieza de madera. Se expresa en centímetros o en porcentaje de albura (ONNCCE, 2002). Cuanto más sea la zona penetrada por el preservante, mejor será la protección de la madera.

Para determinar la penetración de las sustancias preservantes en cada uno de los métodos de impregnación empleados en este estudio, se utilizaron métodos colorimétricos, estos fueron, reactivos químicos que nos ayudaron a determinar la profundidad de la zona penetrada por el preservante en la madera.

5.6.3.1 Solución para determinar la penetración de las sales de boro (ONNCCE, 1999)

Solución 1: Se mezcló 1 g de curcumina con 90 g de alcohol etílico. Se agitó y filtró la solución.

Solución 2: En un matraz volumétrico de 100 ml se colocaron 20 ml de ácido clorhídrico concentrado y se aforó con alcohol etílico. Se vertió todo el contenido a un vaso de precipitado y se agregó ácido salicílico hasta la saturación (aproximadamente 13 g/100 ml).

Procedimiento: Se aplicó la solución 1 con una pipeta en la superficie de la madera estando ésta limpia y seca, sin escurrimientos, se dejó secar durante unos minutos. Aplicando de la misma forma la solución 2 en las áreas que se ha coloreado de amarillo debido a la aplicación de la solución 1. Se observaron los cambios de color en un intervalo de 10 a 20 minutos. En presencia de boro aparece una coloración roja.

5.6.3.2 Solución para determinar la penetración de los azoles de cobre

De acuerdo con la norma A3-08 de la AWWA (AWWA, 2013c) y a la norma NMX-C-410-ONNCCE-1999 (ONNCCE, 1999), se determinó la penetración del cobre ya que la concentración de este elemento se presenta en mayor proporción.

Se utilizó una solución de cromo-s-azurol-acetato de sodio: se disolvieron 0,5 g de cromo azurol y 5 gramos de acetato de sodio en 80 ml de agua destilada, se diluyó todo a 500 ml.

Procedimiento: Con la ayuda de una pipeta, se aplicó la solución de cromo-s-azurol-acetato de sodio en las superficies tratadas, evitando escurrimientos, la aparición de un color azul oscuro reveló la profundidad alcanzada por el cobre.

Posteriormente a la identificación de la presencia de las sustancias activas del preservante por medio de las reacciones colorimétricas, se procedió a clasificar con los siguientes criterios (JUNAC, 1988):

| | |
|-------------------------|--|
| Total regular (Tr): | Cuando toda la sección esta penetrada con concentración uniforme. |
| Total irregular (Ti): | Cuando en la zona penetrada existen lagunas pequeñas con secciones de mayor concentración. |
| Parcial regular (Pr): | Cuando la zona penetrada es periférica y más o menos uniforme. |
| Parcial irregular (Pi): | Cuando la zona penetrada es periférica y presentan lagunas que no sigue un patrón fijo. |
| Parcial vascular (Pv): | Cuando la penetración se realiza siguiendo los elementos de conducción (penetración longitudinal). |
| Penetración nula (Pn): | Cuando no existe penetración significativa en la zona examinada. |

5.6.4. Rango de tratabilidad

Una vez determinadas las absorciones y penetraciones se obtuvieron los rangos de tratabilidad de acuerdo a JUNAC (1988).

| | |
|------------------------------|---|
| Fácil de tratar (FT): | Absorción alta (AA) y penetración total regular e irregular (Tr y Ti). |
| Moderadamente tratable (MT): | Absorción buena (AB) y penetración parcial regular e irregular (Pr y Pi). |
| Difícil de tratar (DT): | Absorción mala (AM) y penetración parcial vascular (Pv) |
| Imposible de tratar (IT): | Absorción nula (AN) y penetración nula (Pn). |

5.7. Propiedades mecánicas

Los ensayos mecánicos se llevaron a cabo en una máquina universal de pruebas mecánicas marca Shimadzu de 10 000 kg de capacidad máxima, con la opción de fijar una escala más baja según las exigencias del ensayo. La cantidad de probetas impregnadas para los ensayos se vió limitado de acuerdo al material orientado a las zonas anuales de crecimiento.

Antes de cada ensayo se determinó para cada una de las probetas el contenido de humedad en base a la norma ISO 3130 (ISO, 1975a).

Fórmula para la determinación del contenido de humedad:

$$W = \left[\frac{(m_1 - m_2)}{m_2} \right] 100$$

Dónde:

W = Es el contenido de humedad expresado en porcentaje (%)

m_1 = Es la masa de la probeta en gramos antes del secado

m_2 = Es la masa de la probeta en gramos después del secado

5.7.1. Compresión paralela a la fibra

5.7.1.1. Determinación del esfuerzo máximo (σ_w) y módulo de elasticidad en compresión paralela a la fibra (MOE)

Estos ensayos se realizaron bajo la norma ISO 3787 (ISO, 1976) y DIN 52185 (DIN, 1976), las cuales requieren de probetas de 2 cm x 2 cm x 6 cm orientadas respecto a las zonas anuales de crecimiento, libres de cualquier defecto, estableciéndose la falla en un periodo de 60 a 90 segundos con una velocidad constante de carga de 6 mm/min del cabezal de carga de la máquina, hasta el fallo de la pieza.

Se midieron las dimensiones de las probetas de cada especie en la sección transversal en el punto medio de la longitud, con un vernier digital con precisión de 0,1 mm. De cada probeta, se obtuvo una gráfica carga-deformación y un registro de la carga máxima que se empleó en la determinación del límite de proporcionalidad y las deformaciones involucradas en los diferentes cálculos.

Las ecuaciones utilizadas para determinar los ensayos de compresión paralela a la fibra fueron las siguientes:

$$\sigma_w = \frac{P_{max}}{a \times b}$$

Determinación del esfuerzo máximo en compresión paralela a la fibra (σ_w); donde:

σ_w = Esfuerzo máximo en compresión paralela a la fibra; en megapascales (MPa).

P_{max} = Carga máxima; en newtons (N).

a y b = Dimensiones de sección transversal de las piezas de ensayo; en milímetros (mm).

$$MOE = \frac{\Delta F \cdot L}{\Delta d \cdot a \cdot b}$$

Determinación del módulo de elasticidad en compresión paralela a fibra (MOE); donde:

MOE = Módulo de elasticidad, en MPa.

ΔF = Cualquier diferencia de fuerza en el campo elástico, en N.

L = Campo donde fue medida la deformación, en mm.

Δd = Deformación ocurrida en el intervalo ΔF , en mm.

a = Lado de la probeta, en mm.

b = Lado de la probeta, en mm.

Después que el ensayo fue llevado a cabo; se determinó el contenido de humedad conforme a la norma ISO 3130 (ISO, 1975a), tomando una parte de las piezas ensayadas de 25 mm de largo, lo más cerca posible de la falla.

5.7.2. Flexión estática

5.7.2.1. Esfuerzo de ruptura (σ_{bw}) y módulo de elasticidad (E_w)

Las normas ISO 3133 (ISO, 1975b) e ISO 3349 (ISO, 1975c) fueron utilizadas para obtener el esfuerzo de ruptura (σ_{bw}) y módulo de elasticidad (E_w) en flexión estática. Las normas especifican probetas de 2 cm x 2 cm x 30 cm, perfectamente orientadas con respecto a la zona anual de crecimiento. La aplicación de la carga fue tangencial a los anillos de

crecimiento y al centro del claro entre soportes, mismo que fue de 24 cm. La falla se realizó dentro de un lapso de tiempo de 60 a 90 segundos.

Para realizar este ensayo se modificó el caballete superior ya que la norma señala que la carga se ejerce en 4 puntos (Figura 5.1).



Figura 5.1. Caballete utilizado en la prueba de flexión estática.

Se midieron las dimensiones de las probetas de cada especie en la sección transversal en el punto medio de la longitud, con un vernier digital con precisión de 0,1 mm.

De cada probeta, se obtuvo una gráfica carga-deformación y un registro de la carga máxima que se empleó en la determinación del límite de proporcionalidad y las deformaciones involucradas en los diferentes cálculos.

Después que el ensayo fue llevado a cabo, se determinó el contenido de humedad conforme a la norma ISO 3130, tomando una parte de las piezas ensayadas de 25 mm de largo, lo más cerca posible de la falla.

Las ecuaciones utilizadas para el esfuerzo de rotura en flexión estática (σ_{bw}) (a) y módulo de elasticidad (E_w) (b) fueron las siguientes:

$$(a) \quad \sigma_{bw} = \frac{3P_{max} l}{2 bh^2}$$

Dónde:

σ_{bw} = Es el esfuerzo de ruptura en flexión estática, en MPa.

P_{max} = Es la carga de ruptura, en N.

l = Es la distancia entre el centro de los soportes, en mm.

b = Ancho de pieza de ensayo, en mm.

h = Altura de la probeta, en mm.

$$(b) \quad E_w = \frac{P l^3}{36 b h^3 f}$$

Dónde:

E_w = Es el módulo de elasticidad, en gigapascales (GPa).

P = Carga máxima de ruptura, en N.

l = Distancia entre soportes en centímetros (cm).

b y h = Dimensiones de la sección transversal de las direcciones radial y tangencial en mm.

f = Es la desviación en el área de flexión neta igual a la diferencia entre la media aritmética del resultado obtenido en la medición de la deformación en los límites superior e inferior de la carga en mm.

5.8. Diseño experimental

5.8.1. Diseño experimental para la retención

A fin de determinar las diferencias estadísticas de la retención entre los métodos de impregnación, las sustancias preservantes y la interacción de las mismas, se aplicó un diseño experimental factorial 2 x 3, con n=15; teniendo los siguientes factores y niveles:

A = Sustancias preservantes (sales de boro y sales de cobre azul)

B = Métodos de impregnación (inmersión, baño caliente-frío y Bethell)

El modelo estadístico correspondiente a tal diseño (Gutiérrez y De la Vara, 2008) es el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk}$$

dónde:

Y_{ijk} = variable de respuesta

μ = efecto medio general

τ_i = efecto de la sustancia preservante

β_j = efecto de método de impregnación

$(\tau\beta)_{ij}$ = efecto de la interacción

ϵ_{ijk} = error aleatorio

Las hipótesis de interés a probar son:

H₀: efecto de la sustancia preservante (A) = 0

H₁: efecto de la sustancia preservante (A) ≠ 0

H₀: efecto de método de impregnación (B) = 0

H₁: efecto de método de impregnación (B) ≠ 0

H₀: efecto de interacción (AB) = 0

H₁: efecto de interacción (AB) ≠ 0

Para tal diseño, la variable de respuesta será la retención.

Para realizar la comparación de medidas de las variables en estudio se aplicó el método de la mínima diferencia significativa (LSD); el nivel de confianza con el que se analizaron los datos fueron del 95% y los resultados se obtuvieron con el paquete estadístico STATISTICA 7.0 Statsoft.

5.8.2. Diseño experimental para las propiedades mecánicas (compresión paralela a la fibra y flexión estática)

Para comprobar si existe diferencia en los resultados del ensayo de compresión paralela entre la madera impregnada y la madera sin impregnar se realizó un análisis experimental simple de la carga máxima (P_{max}), esfuerzo máximo (σ_w) y módulo de elasticidad (E_w). En cuanto a los resultados del ensayo de flexión estática se realizó un análisis experimental simple entre la madera impregnada y la madera sin impregnar de la carga máxima (P_{max}), esfuerzo de ruptura (σ_{bw}) y el módulo de elasticidad (E_w).

A fin de determinar las diferencias estadísticas de los resultados de compresión paralela y flexión estática entre la madera impregnada y no impregnada, se aplicaron diseños experimentales simples, con n=12; teniendo los siguientes factores y niveles:

A = Madera impregnada

B = Madera sin impregnar

El modelo estadístico correspondiente a tal diseño (Gutiérrez y De la Vara, 2008) es el siguiente:

$$Y_i = \mu + \tau_i + \epsilon_i$$

dónde:

Y_i = variable de respuesta

μ = efecto medio general

τ_i = efecto de la madera impregnada

ϵ_i = error aleatorio

Las hipótesis de interés a probar son:

H_0 : efecto de la impregnación (A) = 0

H_1 : efecto de la impregnación (A) \neq 0

Para los diseños, las variables de respuesta para la compresión paralela serán la carga máxima (P_{max}), el esfuerzo máximo (σ_w) y el módulo de elasticidad (E_w). Para las variables de respuesta de flexión estática serán la carga máxima (P_{max}), esfuerzo de ruptura (σ_{bw}) y el módulo de elasticidad (E_w).

Para comparar la diferencia de los resultados del ensayo a compresión paralela a la fibra entre la madera impregnada con sales de boro y sales de cobre azol, los tratamientos de impregnación y la interacción de los mismos se realizó un análisis experimental factorial 2 x 3 de la carga máxima (P_{max}), esfuerzo máximo (σ_w) y módulo de elasticidad (E_w). En cuanto a los resultados del ensayo de flexión estática (carga máxima (P_{max}), esfuerzo de ruptura (σ_{bw}) y el módulo de elasticidad (E_w)) se realizó un análisis experimental factorial 2 x 3 de los resultados obtenidos del ensayo de flexión estática entre las sustancias preservantes, los tratamientos de impregnación y la interacción de las mismas.

A fin de determinar las diferencias estadísticas de los ensayos a compresión paralela y flexión estática entre los tratamientos, la sustancias y entre la interacción de las mismas, se aplicó un diseño experimental factorial 2 x 3, con $n=4$; teniendo los siguientes factores y niveles:

A = Sustancias preservantes (sales de boro y sales de cobre azol)

B = Métodos de impregnación (inmersión, baño caliente-frío y Bethell)

El modelo estadístico correspondiente a tal diseño (Gutiérrez y De la Vara, 2008) es el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk}$$

dónde:

Y_{ijk} = variable de respuesta

μ = efecto medio general

τ_i = efecto de la sustancia preservante

β_j = efecto de método de impregnación

$(\tau\beta)_{ij}$ = efecto de la interacción

ϵ_{ijk} = error aleatorio

Las hipótesis de interés a probar son:

H_0 : efecto de la sustancia preservante (A) = 0

H_1 : efecto de la sustancia preservante (A) \neq 0

H_0 : efecto de método de impregnación (B) = 0

H_1 : efecto de método de impregnación (B) \neq 0

H_0 : efecto de interacción (AB) = 0

H_1 : efecto de interacción (AB) \neq 0

Para los diseños, las variables de respuesta para la compresión paralela serán la carga máxima (P_{max}), el esfuerzo máximo (σ_w) y el módulo de elasticidad (E_w). Para las variables de respuesta de flexión estática serán la carga máxima (P_{max}), esfuerzo de ruptura (σ_{bw}) y el módulo de elasticidad (E_w).

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados obtenidos en los ensayos de impregnación de la madera de *Q. laurina*, con los dos tipos de sustancias preservantes fueron los siguientes.

La apariencia de las probetas impregnadas con las sales de boro cambiaron con respecto a su color natural; se deslavarón y decoloraron ligeramente. Para las probetas preservadas con los cobre azoles presentaron un oscurecimiento en su color natural (figura 6.1).



Figura 6.1. Probetas impregnadas con los preservantes: boro (a) y cobre azol (b).

6.1. Resultados del control de calidad de los tratamientos

6.1.1. Determinación de los resultados de absorción, retención y penetración de las sales de boro por los métodos de inmersión, baño caliente-frío y Bethell

En la figura 6.2, se muestra el promedio de las absorciones con las sales de boro de los tres diferentes métodos. En la impregnación realizada con el método de inmersión se determinó una absorción de $233,70 \text{ kg/m}^3$, con valores mínimos de absorción de $163,08 \text{ kg/m}^3$ y máximos de $268,12 \text{ kg/m}^3$; estos valores fueron menores a los obtenidos con el método de baño caliente-frío de $399,98 \text{ kg/m}^3$, con mínimos de $367,38 \text{ kg/m}^3$ y máximos de $450,89 \text{ kg/m}^3$. Para el proceso Bethell, los resultados fueron menores al método de baño caliente-frío; el promedio fue de $360,71 \text{ kg/m}^3$, con un mínimo de $294,37 \text{ kg/m}^3$ y un máximo de $415,79 \text{ kg/m}^3$.

De acuerdo a la clasificación de la norma ITINTEC 251.033 citada por Guevara (1996) para los rangos de absorción; el método de inmersión presentó valores de absorción alta (AA) a absorción buena (AB). Los métodos de baño caliente-frío y Bethell presentaron resultados de absorción alta (AA).

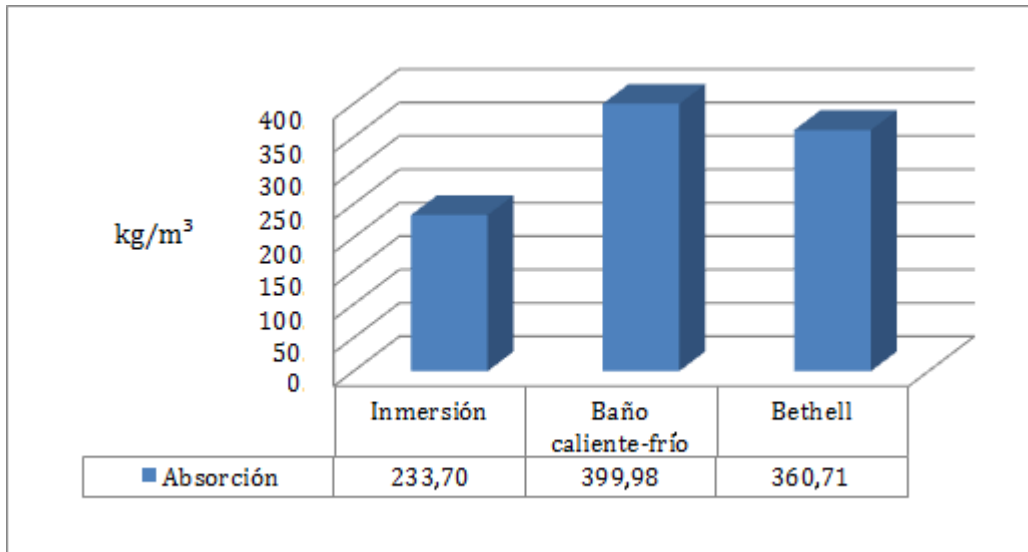


Figura 6.2. Absorción de las sales de boro de los métodos utilizados.

Las retenciones promedio se determinaron por el método de inmersión con sales de boro de 3,51 kg/m³, con valores mínimos de 2,44 kg/m³ y máximos de 4,02 kg/m³ (figura 6.3); los valores obtenidos con el método de baño caliente-frío fueron 6,00 kg/m³, con mínimo de 5,51 kg/m³ y máximos de 6,76 kg/m³, estos valores fueron mayores a los obtenidos con el proceso Bethell de 5,41 kg/m³, con valores mínimos de 4,41 kg/m³ y máximos de 6,23 kg/m³.

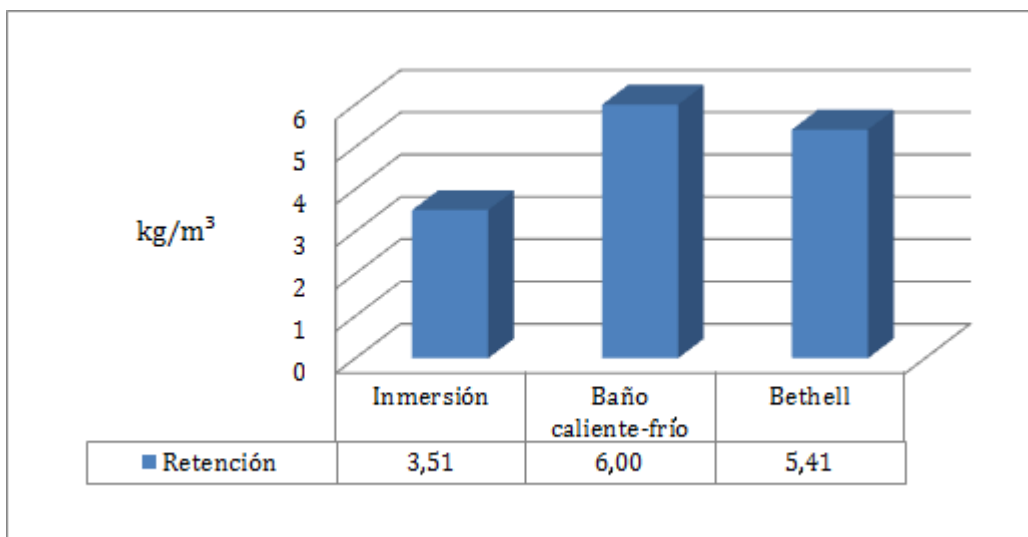


Figura 6.3. Retención de las sales de boro de los métodos utilizados.

De acuerdo a los niveles de retención establecidos por la norma NMX-C-322-ONNCCE-2003, según las condiciones donde podría estar en servicio la madera impregnada, el método de baño caliente-frío presentó un nivel de riesgo R2. Los métodos de inmersión y Bethell sólo obtuvieron niveles de riesgo R1.

En las figuras 6.4, 6.5 y 6.6 se muestra la penetración obtenida con las sales de boro por el método de inmersión, baño caliente-frío y Bethell respectivamente. En el método de inmersión se alcanzó un valor de 3,53 mm de penetración y se clasificó como parcial regular. En el método de baño caliente-frío se obtuvieron dos tipos de penetraciones: total regular y parcial regular, alcanzando valores de 6,88 mm de penetración. El tipo de penetración obtenido con el proceso Bethell fue total regular. Además se observó que la sustancia preservante tuvo una mayor penetración por la cara tangencial de la mayoría de las probetas ensayadas.



Figura 6.4. Penetración de las sales de boro con el método de inmersión.



Figura 6.5. Penetración de las sales de boro por el método de baño caliente-frío.



Figura 6.6. Penetración de las sales de boro por el proceso Bethell.

6.1.2. Determinación de los resultados de absorción, retención y penetración de las sales de cobre azol por los métodos de inmersión, baño caliente-frío y Bethell

Se determinaron absorciones promedio por el método de inmersión con sales de cobre azol de 196,48 kg/m³, con valores mínimos 102,90 kg/m³ y máximos de 229,43 kg/m³. Estos valores fueron menores a los obtenidos con el método de baño caliente-frío de 422,03 kg/m³, con mínimos de 386,07 kg/m³ y máximos de 477,10 kg/m³ (figura 6.7). Los resultados del proceso Bethell fueron menores al anterior, el promedio fue de 307,84 kg/m³, con un mínimo de 251,11 kg/m³ y un máximo de 387,58 kg/m³.

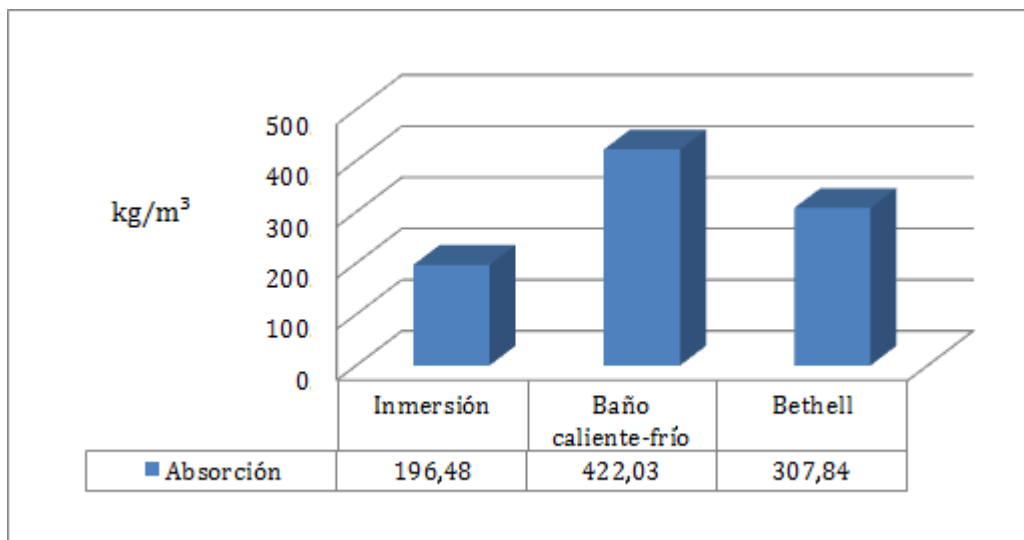


Figura 6.7. Absorción de las sales de cobre azol de los métodos utilizados.

El rango de absorción según la norma ITINTEC 251.033 citada por Guevara (1996) para las sales de CA-B con el método de inmersión se considera como absorción buena (AB). Los métodos de baño caliente-frío y Bethell presentaron resultados de absorción alta (AA).

Como se muestra en la figura 6.8 la retención promedio para el método de inmersión con sales de CA-B fue de 2,95 kg/m³, con valores mínimos de 1,54 kg/m³ y máximos de 3,44 kg/m³; los valores obtenidos con el método de baño caliente-frío fueron de 6,33 kg/m³, con mínimo de 5,79 kg/m³ y máximos de 7,15 kg/m³, estos valores fueron mayores a los obtenidos con el método Bethell de 4,62 kg/m³, con valores mínimos de 3,76 kg/m³ y máximos de 5,81 kg/m³.

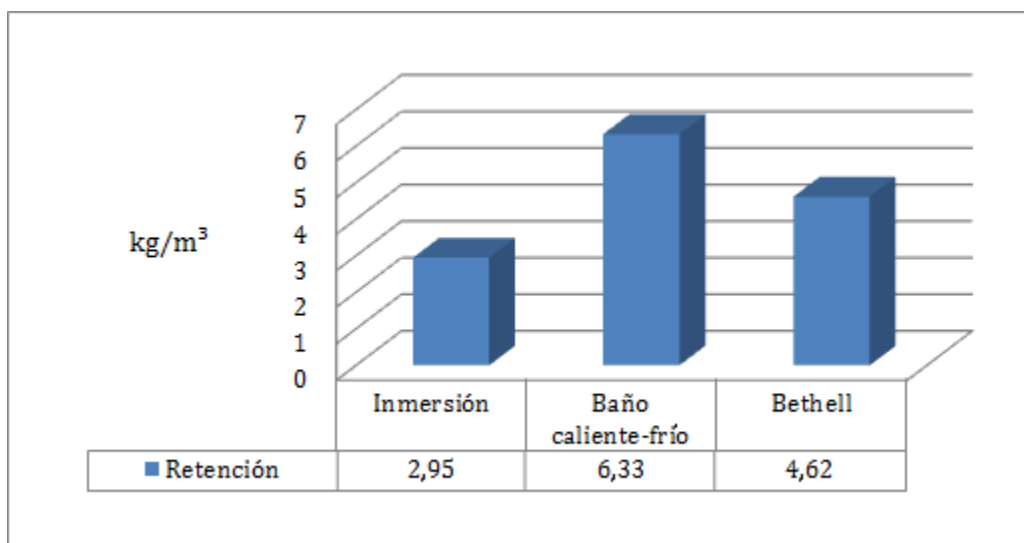


Figura 6.8. Retenciones de las sales de cobre azol de los métodos utilizados.

Con base en la norma U1-13 del Sistema de categorías de uso (UCS) de la AWWA, los valores de retención obtenidos por el método de inmersión se clasifican como clase de riesgo UC3. Para el método de baño caliente-frío se clasifican como clase de riesgo UC4C y el proceso Bethell como clase de riesgo UC4A.

En las figuras 6.9, 6.10 y 6.11 se muestra la penetración obtenida de las probetas impregnadas con la sales de cobre azol de los tres método utilizados. La penetración obtenida con el método de inmersión fue superficial en la mayoría de las probetas. Para el método de baño caliente-frío las probetas presentaron un valor mínimo de penetración de 0,68 mm y un máximo de 2,27 mm; que se clasifica cómo parcial regular y el proceso Bethell presentó una penetración parcial irregular. También se observó que la sustancia preservante tuvo una mayor penetración por las caras tangenciales de las probetas.

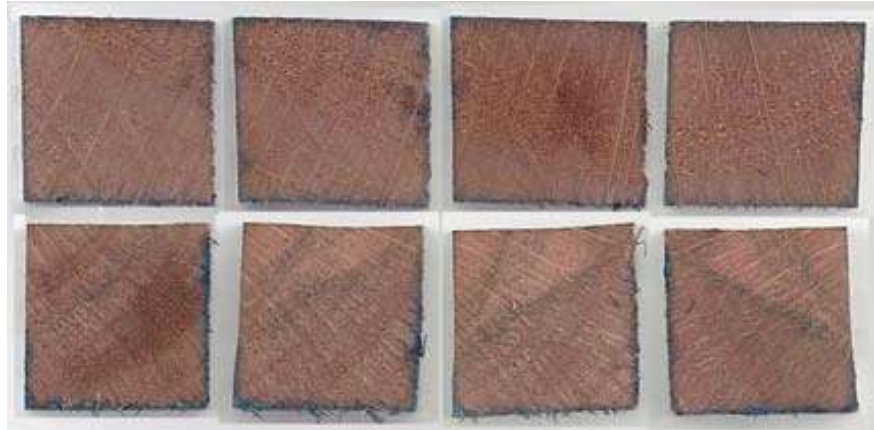


Figura 6.9. Penetración de las sales de cobre azol por el método de inmersión.

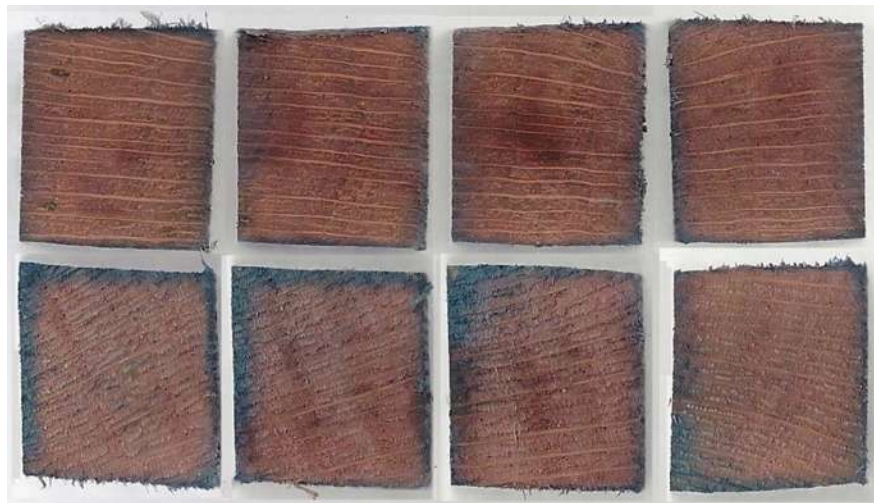


Figura 6.10. Penetración de las sales de cobre azol con el método de baño caliente-frío.

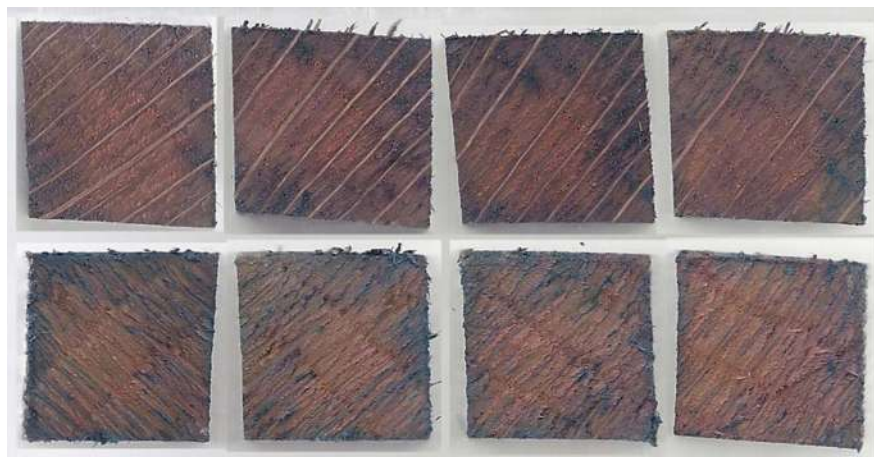


Figura 6.11. Penetración de las sales de cobre azol con el método Bethell.

6.1.3. Determinación del rango de tratabilidad de los tratamientos

En base a los resultados de absorción y penetración de los tratamientos antes mencionados, se obtuvieron los rangos de tratabilidad de acuerdo a JUNAC (1988). Para el método de inmersión con sales de boro la madera de encino se clasifica como moderadamente tratable (MT) a fácil de tratar (FT). Con el método de baño caliente-frío pasa lo mismo, pero la mayoría de las determinaciones lo clasifican como fácil de tratar (FT) y finalmente el método Bethell se clasifica como fácil de tratar (FT).

En cuanto al comportamiento con las sales de CA-B por el método de inmersión, la madera de encino ha sido deficiente e imposible de tratar (IT). Para los métodos de baño caliente-frío y Bethell la madera en estudio se clasifica como moderadamente tratable (MT) a fácil de tratar (FT).

6.2. Resultados de las pruebas mecánicas

A partir de los ensayos de compresión paralela a la fibra sobre las probetas de madera de *Q. laurina*, se determinó la carga máxima (P_{max}), el esfuerzo máximo (σ_w) y el módulo de elasticidad (MOE). En cuanto a los ensayos de flexión estática, se determinó la carga máxima (P_{max}), el esfuerzo de ruptura (σ_{bw}) y el módulo de elasticidad (E_w).

Los resultados promedios de las propiedades mecánicas en lo que respecta a las probetas sin impregnar e impregnadas con sales de boro se muestran en el cuadro 6.1 En el cuadro 6.2 se presentan los promedios de los resultados de la madera impregnada con sales de cobre azol y sin impregnar.

Cuadro.6.1. Promedios de los resultados en compresión paralela (P_{max} , σ_w y MOE) y flexión estática (P_{max} , σ_{bw} y E_w) de la madera de *Q. laurina* sin impregnar e impregnadas con sales de boro.

| Propiedades mecánicas | | Madera sin impregnar | Madera impregnada | | |
|-----------------------|---------------------|----------------------|-------------------|--------------------|----------|
| | | | Inmersión | Baño caliente-frío | Bethell |
| Compresión paralela | P_{max} (N) | 29251,46 | 28218,63 | 29738,66 | 29591,56 |
| | σ_w (MPa) | 73,07 | 64,42 | 63,30 | 65,26 |
| | MOE (MPa) | 16378,21 | 5539,65 | 3035,20 | 3471,92 |
| Flexión estática | P_{max} (N) | 4148,45 | 4265,89 | 4572,35 | 4297,76 |
| | σ_{bw} (MPa) | 175,84 | 171,76 | 173,82 | 170,34 |
| | E_w (GPa) | 1,54 | 1,44 | 1,64 | 1,58 |

Cuadro.6.2. Promedios de los resultados en compresión paralela (P_{max} , σ_w y MOE) y flexión estática (P_{max} , σ_{bw} y E_w) de la madera de *Q. laurina* sin impregnar e impregnadas con sales de CA-B.

| Propiedades mecánicas | | Madera sin impregnar | Madera impregnada | | |
|-----------------------|---------------------|----------------------|-------------------|--------------------|----------|
| | | | Inmersión | Baño caliente-frío | Bethell |
| Compresión paralela | P_{max} (N) | 29251,46 | 26523,78 | 21140,55 | 25726,72 |
| | σ_w (MPa) | 73,07 | 58,82 | 45,28 | 55,19 |
| | MOE(MPa) | 16378,21 | 2944,74 | 2822,87 | 2799,38 |
| Flexión estática | P_{max} (N) | 4148,45 | 3920,20 | 4280,60 | 4052,59 |
| | σ_{bw} (MPa) | 175,84 | 157,20 | 164,23 | 158,68 |
| | E_w (GPa) | 1,54 | 1,43 | 1,48 | 1,30 |

6. 3. Análisis de varianza

6.3.1. Análisis de varianza para la retención

En el cuadro 6.3 se presenta el ANOVA para la retención. De acuerdo al diseño experimental aplicado, el tipo de sustancias preservantes, los métodos de impregnación y la interacción de las sustancias con los métodos tienen influencia estadísticamente significativa en la retención.

Cuadro 6.3. ANOVA para la retención.

| Factor de variación | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Cuadros medios | F | P |
|---------------------|-------------------|--------------------|----------------|---------|----------|
| Sales | 2,605 | 1 | 2,605 | 10,622 | 0,001615 |
| Tratamientos | 131,566 | 2 | 65,783 | 268,247 | 0,000000 |
| Sales*Tratamientos | 5271 | 2 | 2,635 | 10,746 | 0,000070 |
| Error | 20,600 | 84 | 0,245 | | |

En las figuras 6.12, 6.13 y 6.14 se presentan las gráficas de medias para las sustancias preservantes, métodos de impregnación y el efecto de la interacción de las sustancias preservantes y los métodos de impregnación respectivamente, donde se puede observar gráficamente los resultados del análisis de varianza.

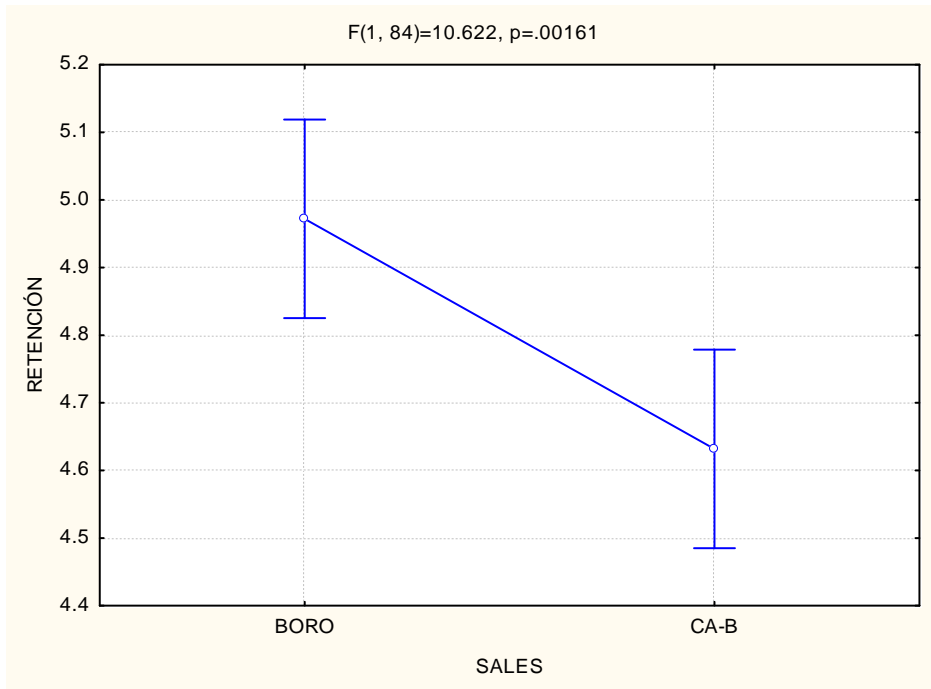


Figura 6.12. Gráfica de medias de la retención de las sales preservantes.

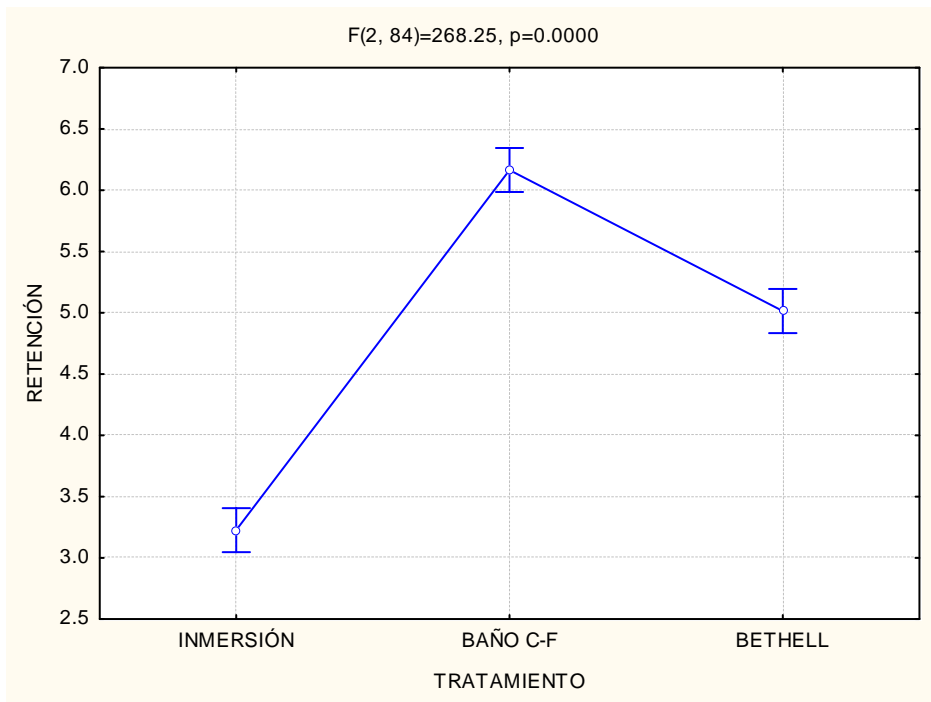


Figura 6.13. Gráfica de medias de la retención de los tratamientos de impregnación.

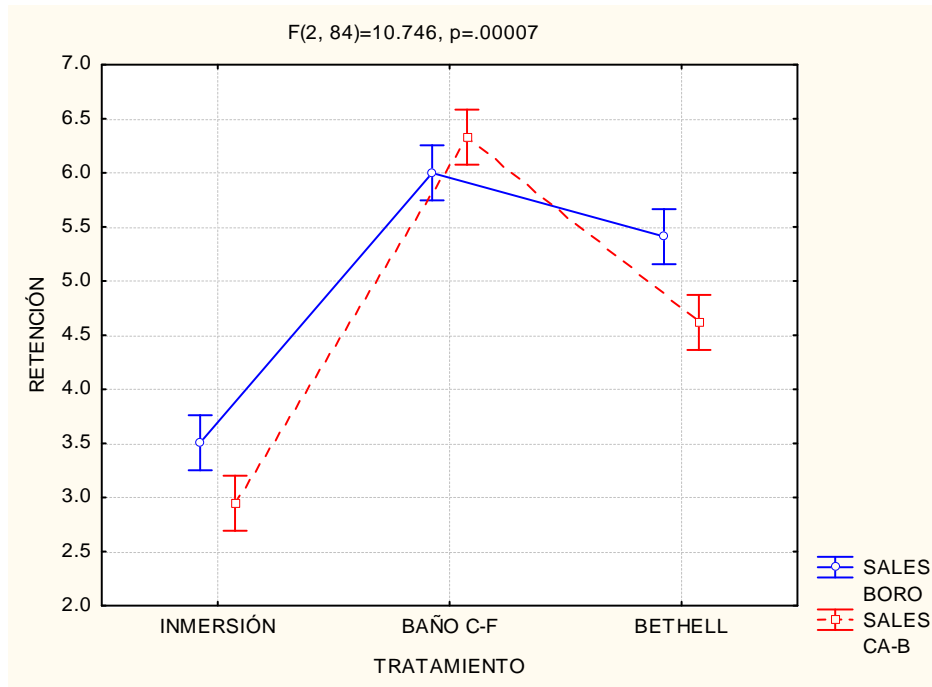


Figura 6.14. Gráfica de medias de la interacción de las sales preservantes y los tratamientos de impregnación.

Para el análisis estadístico de la retención se observó que existe influencia estadísticamente significativa entre el tipo de sustancias preservantes, los métodos de impregnación y la interacción de las sustancias con los métodos. Para el factor sustancia, las sales de boro presentaron la mayor retención en la madera impregnada; en el factor método, el tratamiento de baño caliente-frío obtuvo los mayores valores de retención y; con respecto al efecto combinado de la sustancia preservante y el método de impregnación, se corrobora que existe diferencia significativa obtenido por el ANOVA.

6.3.2. Análisis de varianza para las propiedades mecánicas

6.3.2.1. Análisis de varianza para los resultados de compresión paralela a la fibra (P_{max} , σ_w y MOE) entre la madera impregnada y sin impregnar

Como se muestra en el cuadro 6.4 y la figura 6.15, se encontró diferencia significativa en el comportamiento de la carga máxima (P_{max}) en compresión paralela entre la madera impregnada y no impregnada.

Cuadro 6.4. ANOVA para la carga máxima (P_{max}).

| Factor de variación | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Cuadros medios | F | P |
|---------------------|---------------------------|--------------------|---------------------------|-------|----------|
| Factor | 7,214903x10 ⁰⁷ | 1 | 7,219403x10 ⁰⁷ | 6,240 | 0,016045 |
| Error | 5,437541x10 ⁰⁸ | 47 | 1,156924x10 ⁰⁷ | | |

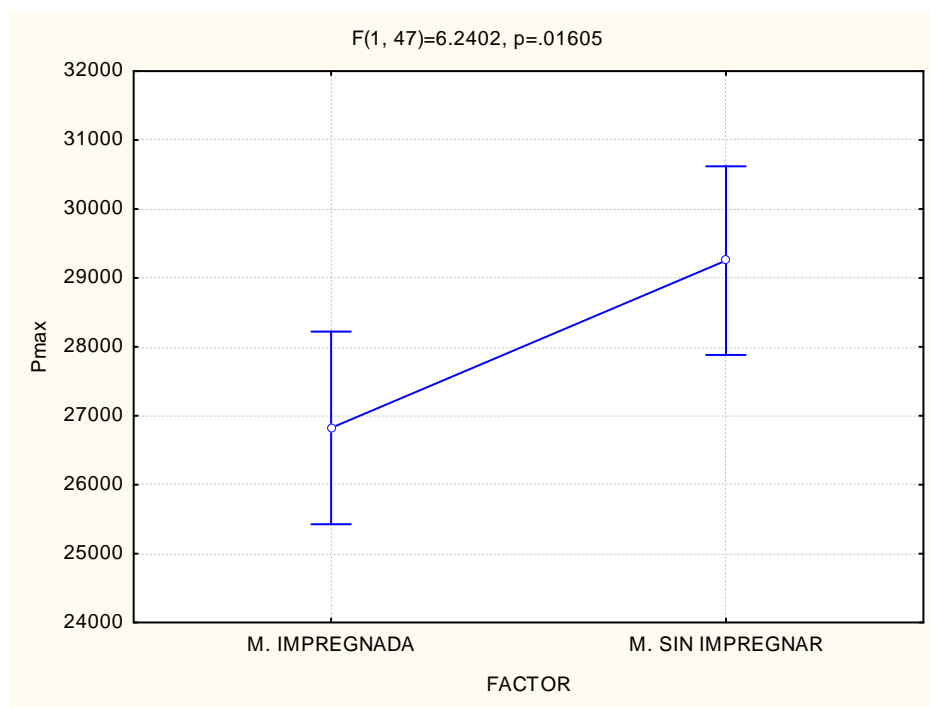


Figura 6.15. Gráfica de medias de la carga máxima en compresión paralela.

En cuanto al esfuerzo máximo en compresión paralela (σ_w) se encontró diferencia significativa entre la madera impregnada y la madera sin impregnar (cuadro 6.5, figura 6.16).

Cuadro 6.5. ANOVA del esfuerzo máximo (σ_w).

| Factor de variación | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Cuadros medios | F | P |
|---------------------|-------------------|--------------------|----------------|--------|----------|
| Factor | 2522,1 | 1 | 2522,1 | 40,409 | 0,000000 |
| Error | 2929,9 | 47 | 62,3 | | |

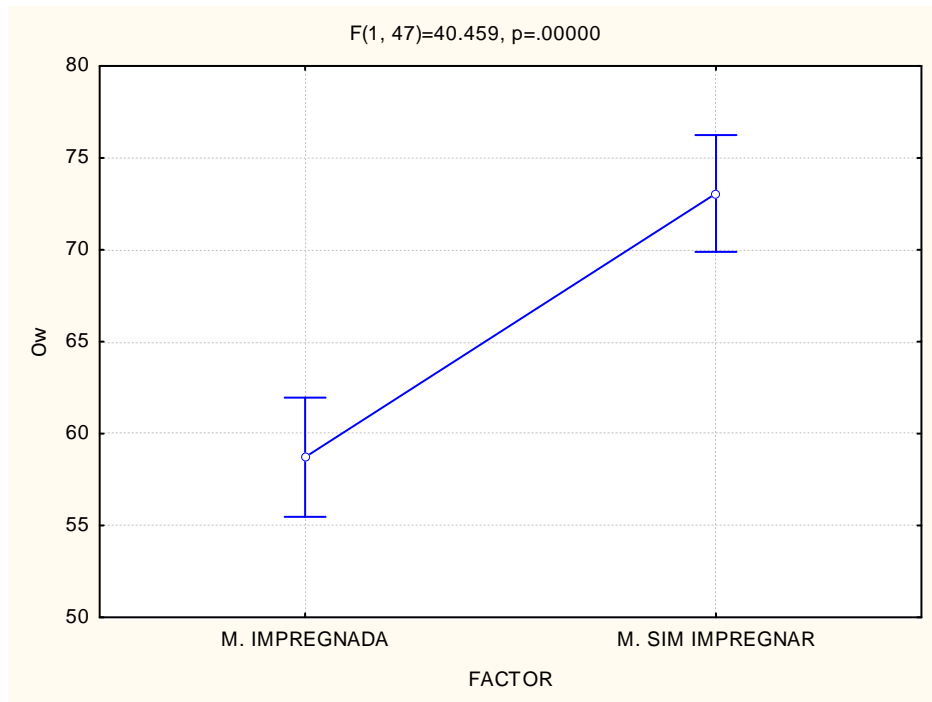


Figura 6.16. Gráfica de medias del esfuerzo máximo en compresión paralela.

El módulo de elasticidad en compresión paralela (MOE) presentó diferencia significativa entre la madera impregnada y madera sin impregnar, como se puede ver en el cuadro 6.6 y figura 6.17.

Cuadro 6.6. ANOVA del módulo de elasticidad (MOE).

| Factor de variación | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Cuadros medios | F | P |
|---------------------|---------------------------|--------------------|---------------------------|---------|----------|
| Factor | 2,051149x10 ⁰⁹ | 1 | 2,051149x10 ⁰⁹ | 93,3022 | 0,000000 |
| Error | 1,033245x10 ⁰⁹ | 47 | 2,198394x10 ⁰⁷ | | |

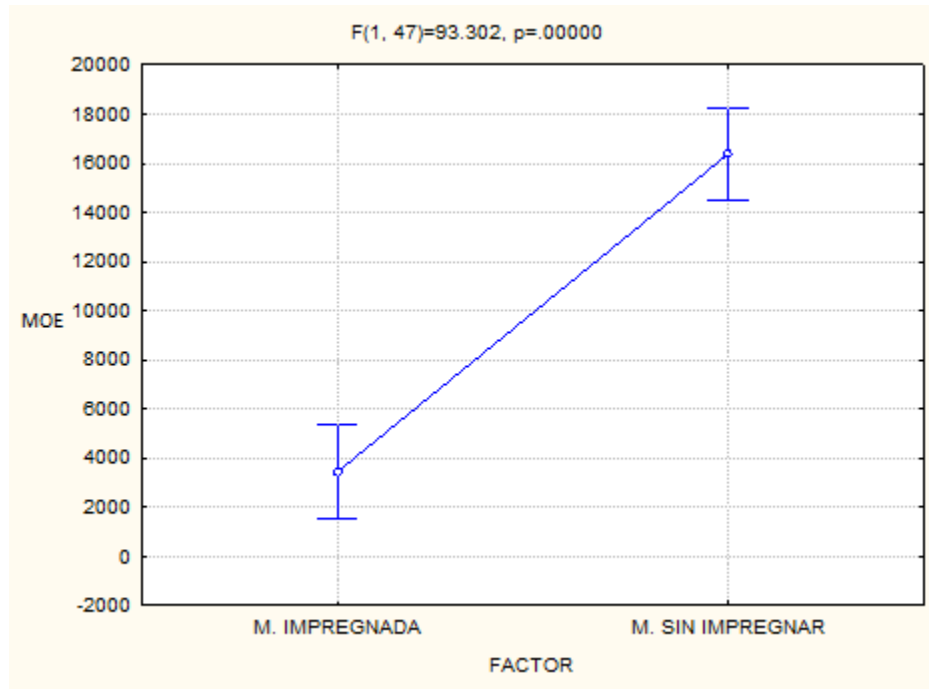


Figura 6.17. Gráfica de medias del módulo de elasticidad en compresión paralela.

6.3.2.2. Análisis de varianza para los resultados de flexión estática (P_{max} , σ_{bw} y E_w) entre la madera impregnada y sin impregnar

Para la carga máxima en flexión estática (P_{max}) no se encontró diferencia significativa entre la madera impregnada y la madera sin impregnar como se muestra en el cuadro 6.7 y figura 6.18.

Cuadro 6.7. ANOVA para la carga máxima (P_{max}).

| Factor de variación | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Cuadros medios | F | P |
|---------------------|-------------------|--------------------|----------------|-------|----------|
| Factor | 84592 | 1 | 84592 | 0,241 | 0,625492 |
| Error | 16470821 | 47 | 350443 | | |

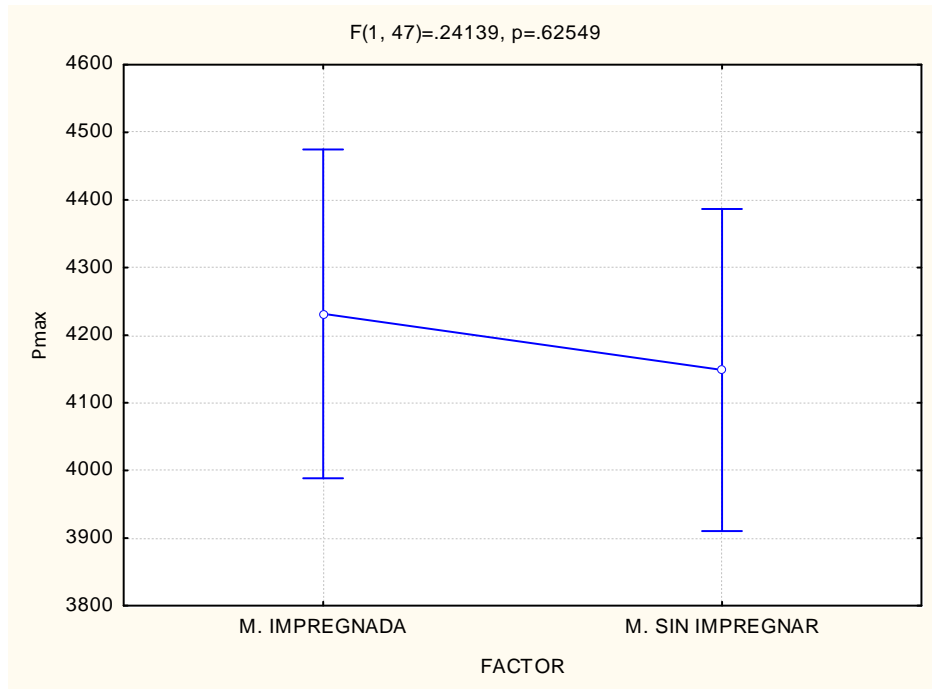


Figura 6. 18. Gráfica de medias de la carga máxima en flexión estática.

En cuanto al esfuerzo de ruptura en flexión estática (σ_{bw}) no se encontró diferencia significativa entre la madera impregnada y no impregnada (cuadro 6.8, figura 6.19).

Cuadro 6.8. ANOVA para el esfuerzo de ruptura (σ_{bw}).

| Factor de variación | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Cuadros medios | F | P |
|---------------------|-------------------|--------------------|----------------|-------|----------|
| Factor | 1182 | 1 | 1182 | 1,992 | 0,164702 |
| Error | 27895 | 47 | 594 | | |

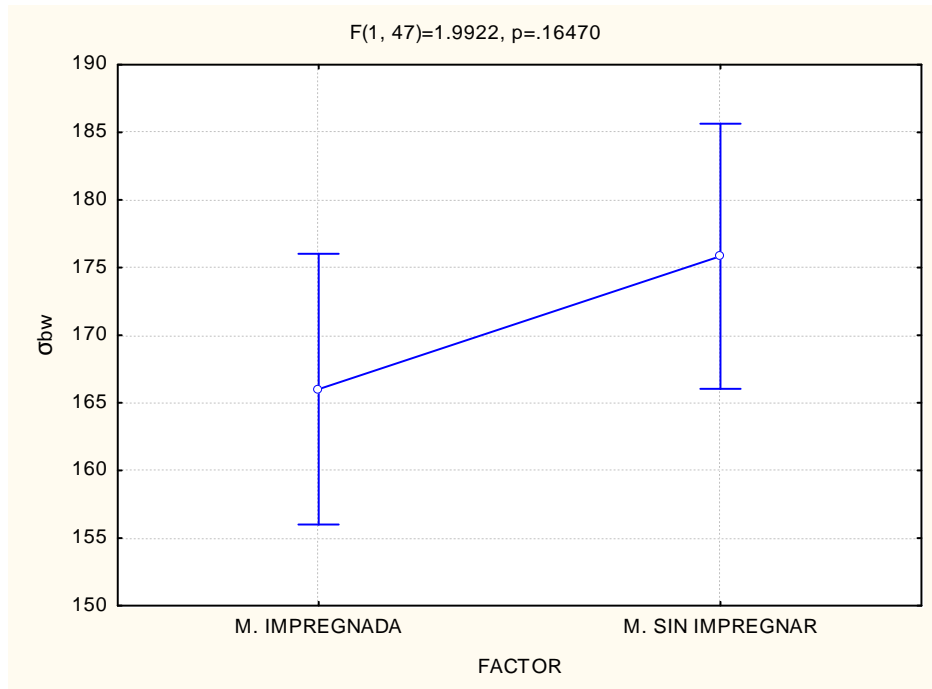


Figura 6.19. Gráfica de medias del esfuerzo de ruptura en flexión estática.

Como se muestra en el cuadro 6.9 y la figura 6.20 no se encontró diferencia significativa en el comportamiento del módulo de elasticidad (E_w) entre madera impregnada y madera sin impregnar.

Cuadro 6.9. ANOVA para el módulo de elasticidad (E_w).

| Factor de variación | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Cuadros medios | F | P |
|---------------------|-------------------|--------------------|----------------|-------|----------|
| Factor | 0,0436 | 1 | 0,0436 | 0,775 | 0,383250 |
| Error | 2,6441 | 47 | 0,0563 | | |

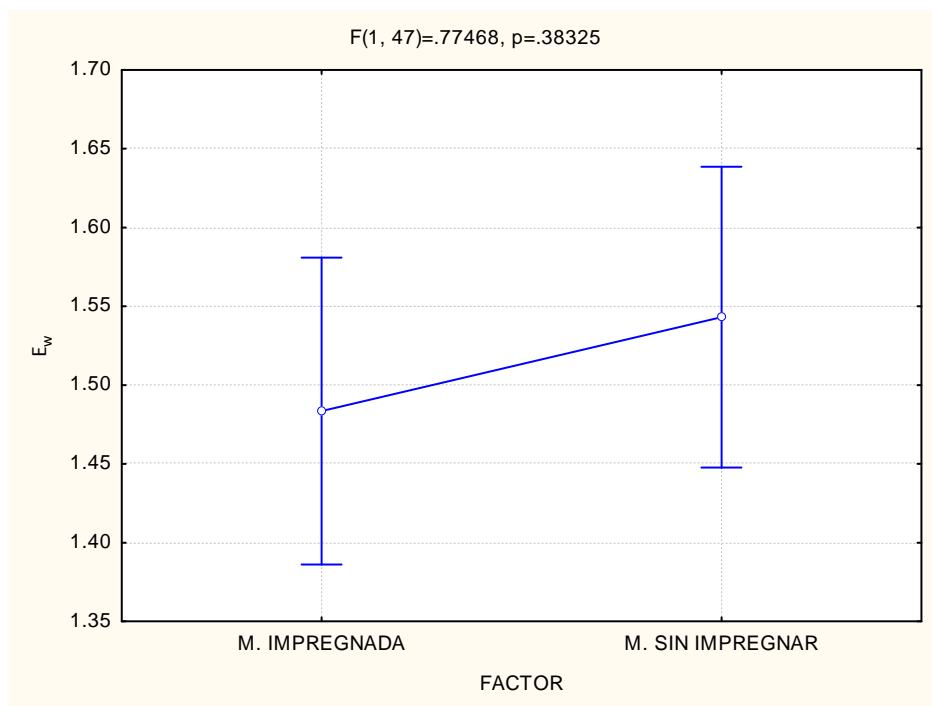


Figura 6.20. Gráfica de medias del módulo de elasticidad en flexión estática.

6.3.2.3. Análisis de varianza para los resultados de compresión paralela a la fibra (P_{max} , σ_w y MOE)

En el cuadro 6.10 se presenta el ANOVA para la carga máxima (P_{max}). De acuerdo al diseño experimental aplicado, el tipo de sustancias preservantes, los métodos de impregnación y la interacción de las sustancias con los métodos no tienen influencia estadísticamente significativa con la carga máxima (P_{max}).

Cuadro 6.10. ANOVA para la carga máxima (P_{max}).

| Factor de variación | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Cuadros medios | F | P |
|---------------------|-------------------|--------------------|----------------|-------|----------|
| Tratamientos | 482847 | 2 | 241424 | 1,323 | 0,291076 |
| Sales | 519320 | 1 | 519320 | 2,845 | 0,108887 |
| Sales*Tratamientos | 10122 | 2 | 5061 | 0,028 | 0,972693 |
| Error | 3285180 | 18 | 182510 | | |

En las figuras 6.21, 6.22 y 6.23 se presentan las gráficas de medias para las sustancias preservantes, métodos de impregnación y el efecto de la interacción de las sustancias preservantes y los métodos de impregnación respectivamente, donde se puede observar gráficamente los resultados del análisis de varianza.

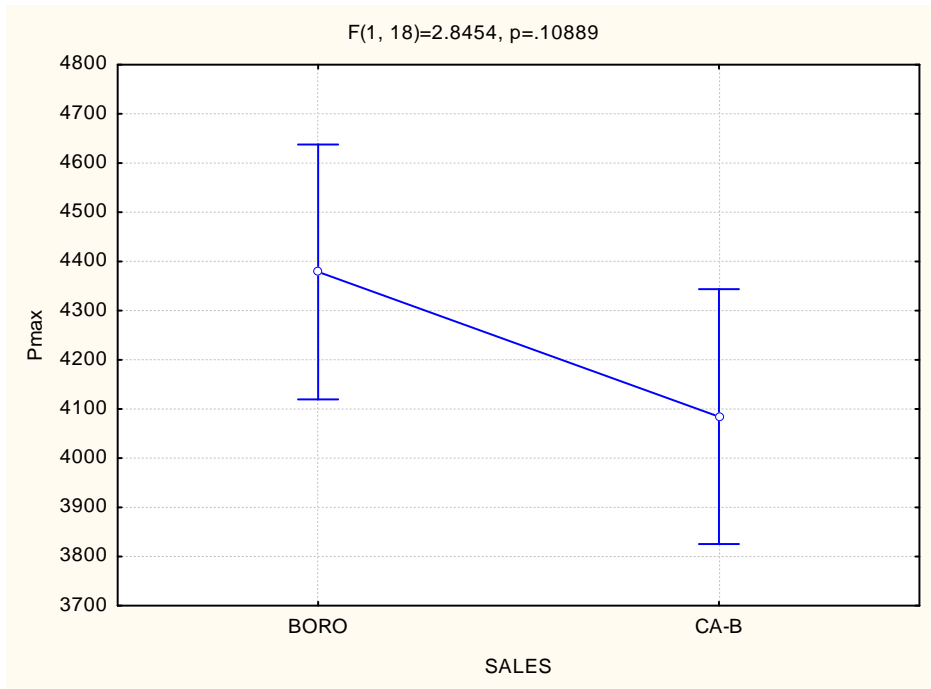


Figura 6.21. Gráfica de medias de P_{max} para las sales preservantes.

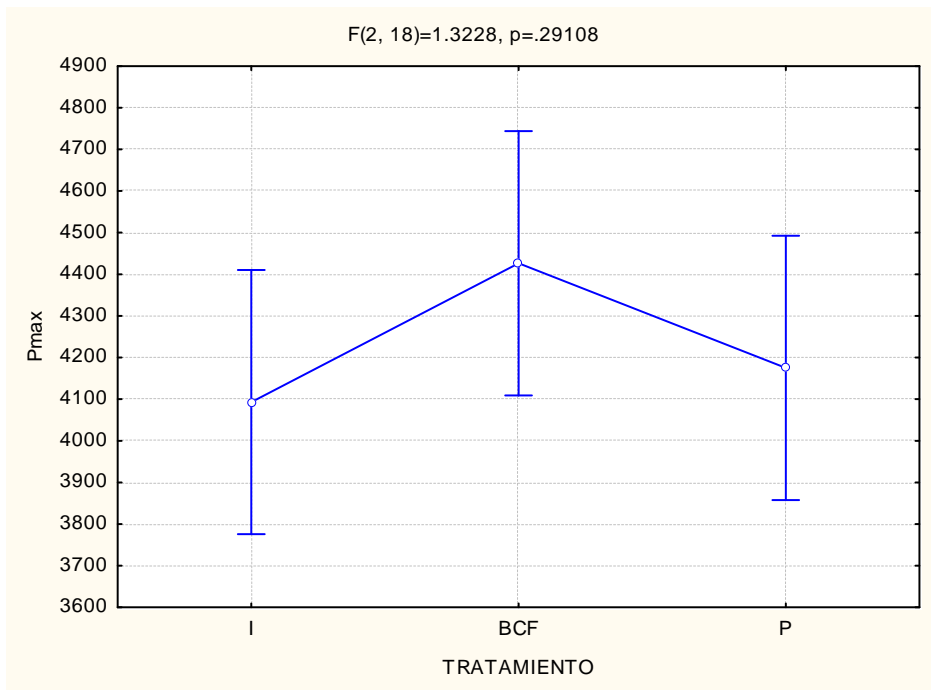


Figura 6.22. Gráfica de medias de P_{max} para los tratamientos de impregnación.

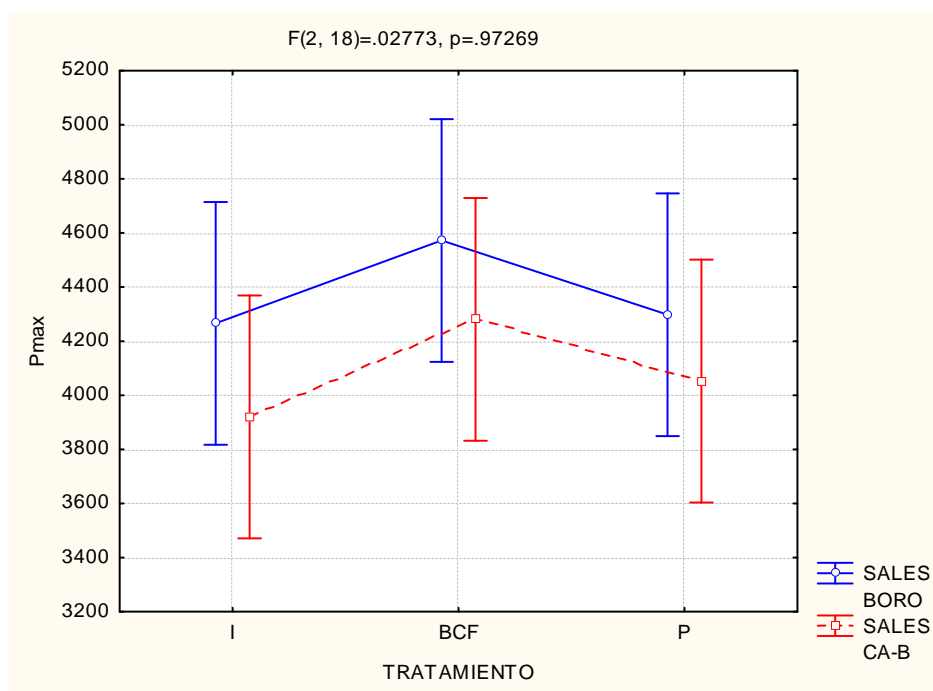


Figura 6.23. Gráfica de medias de la interacción de las sales preservantes y los tratamientos de impregnación

Como se muestra en el cuadro 6.11, el tipo de sustancia preservante tiene influencia estadísticamente significativa con el esfuerzo máximo (σ_w) (figura 6.24), los métodos de impregnación y la interacción de las sustancias con los métodos no presentan influencia estadísticamente significativa con el esfuerzo máximo (σ_w) (figura 6.25 y 6.26).

Cuadro 6.11. ANOVA para el esfuerzo máximo (σ_w).

| Factor de variación | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Cuadros medios | F | P |
|---------------------|-------------------|--------------------|----------------|--------|----------|
| Tratamientos | 242,56 | 2 | 121,28 | 2,059 | 0,156537 |
| Sales | 756,29 | 1 | 756,29 | 12,842 | 0,002124 |
| Sales*Tratamientos | 158,17 | 2 | 79,08 | 1,343 | 0,286039 |
| Error | 1060,08 | 18 | 58,89 | | |

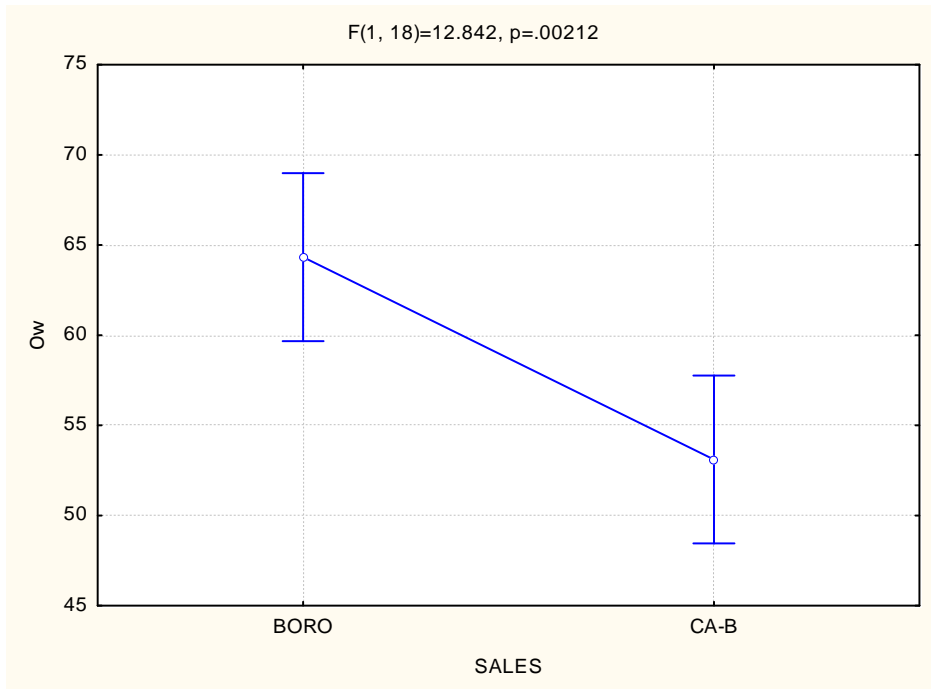


Figura 6.24. Gráfica de medias de σ_w para las sales preservantes.

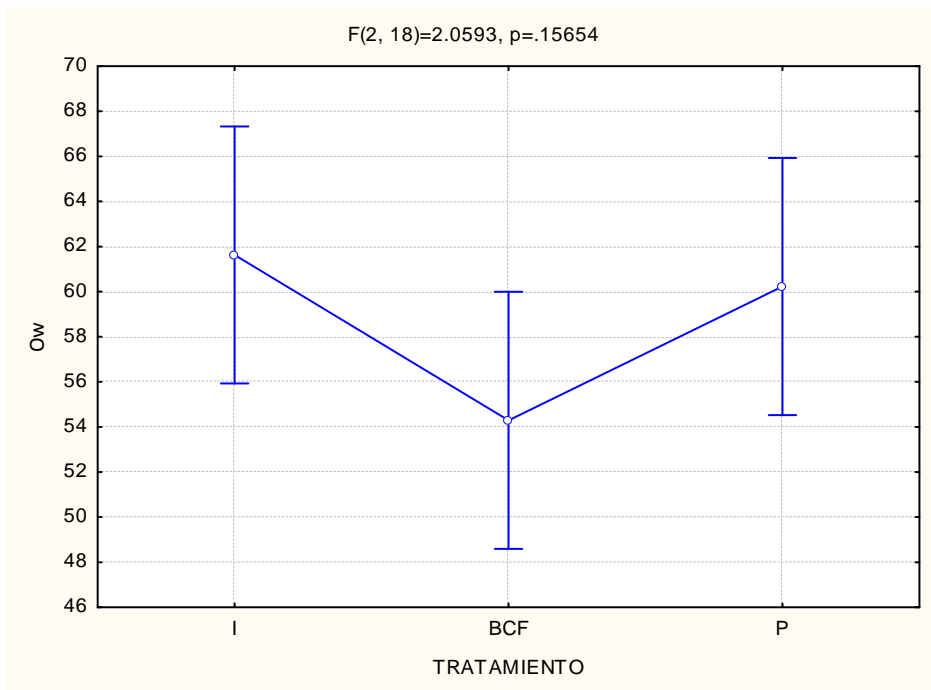


Figura 6.25. Gráfica de medias de σ_w para los tratamientos de impregnación.

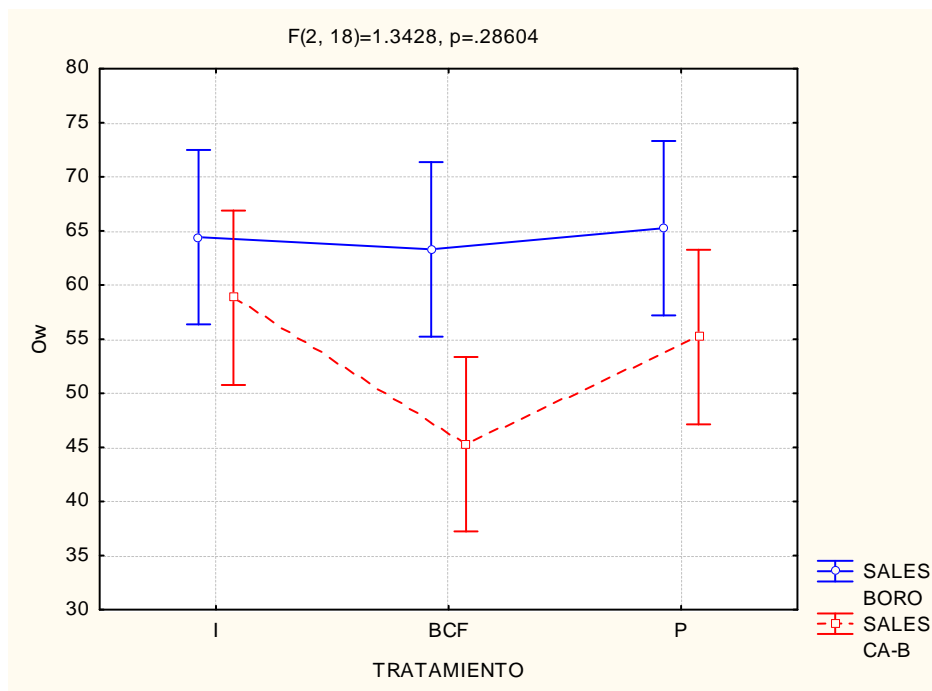


Figura 6.26. Gráfica de medias de interacción de las sales preservantes y los tratamientos de impregnación.

En cuanto al módulo de elasticidad (MOE) de acuerdo al diseño experimental aplicado (Cuadro 6.12), el tipo de sustancias preservantes, los métodos de impregnación y la interacción de las sustancias con los métodos tienen influencia estadísticamente significativa.

Cuadro 6.12. ANOVA para el módulo de elasticidad (MOE)

| Factor de variación | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Cuadros medios | F | P |
|---------------------|-------------------|--------------------|----------------|--------|----------|
| Tratamientos | 7977400 | 2 | 3988700 | 4,8097 | 0,021209 |
| Sales | 8072573 | 1 | 8072573 | 9,7342 | 0,005915 |
| Sales*Tratamientos | 6389284 | 2 | 3194642 | 3,8522 | 0,040494 |
| Error | 14927460 | 18 | 829303 | | |

En las figuras 6.27, 6.28 y 6.29 se presentan las gráficas de medias para las sustancias preservantes, métodos de impregnación y el efecto de la interacción de las sustancias preservantes y los métodos de impregnación respectivamente, donde se puede observar gráficamente los resultados del análisis de varianza.

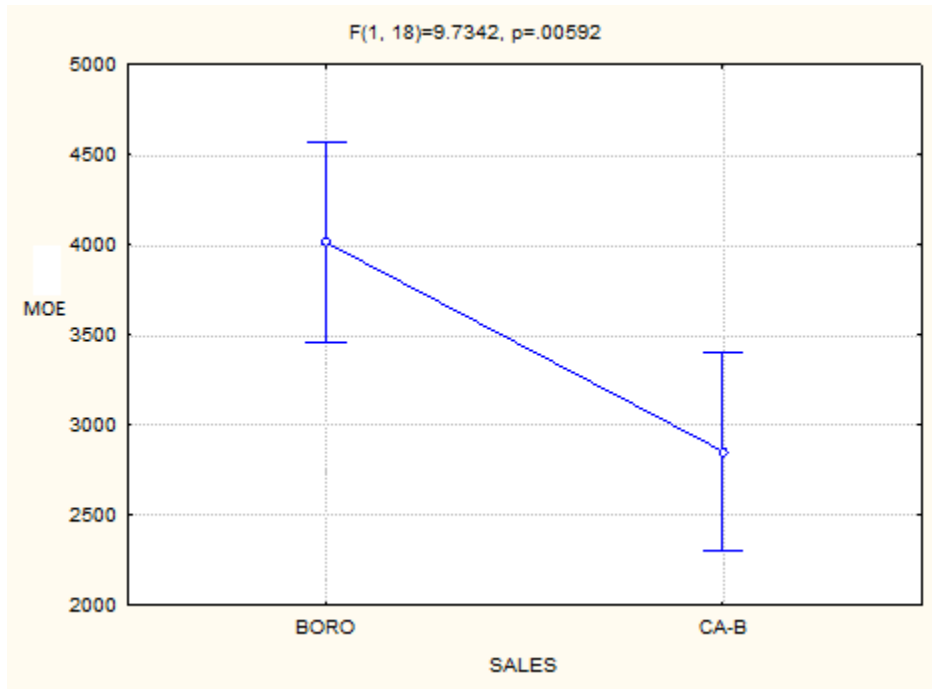


Figura 6.27. Gráfica de medias de MOE para las sales preservantes.

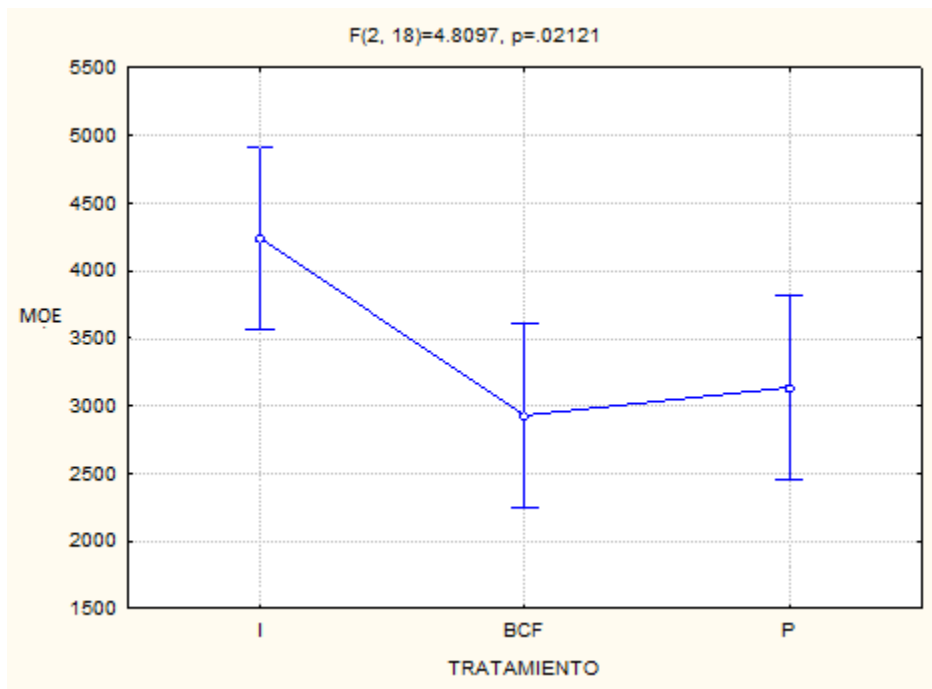


Figura 6.28. Gráfica de medias de MOE para los tratamientos de impregnación.

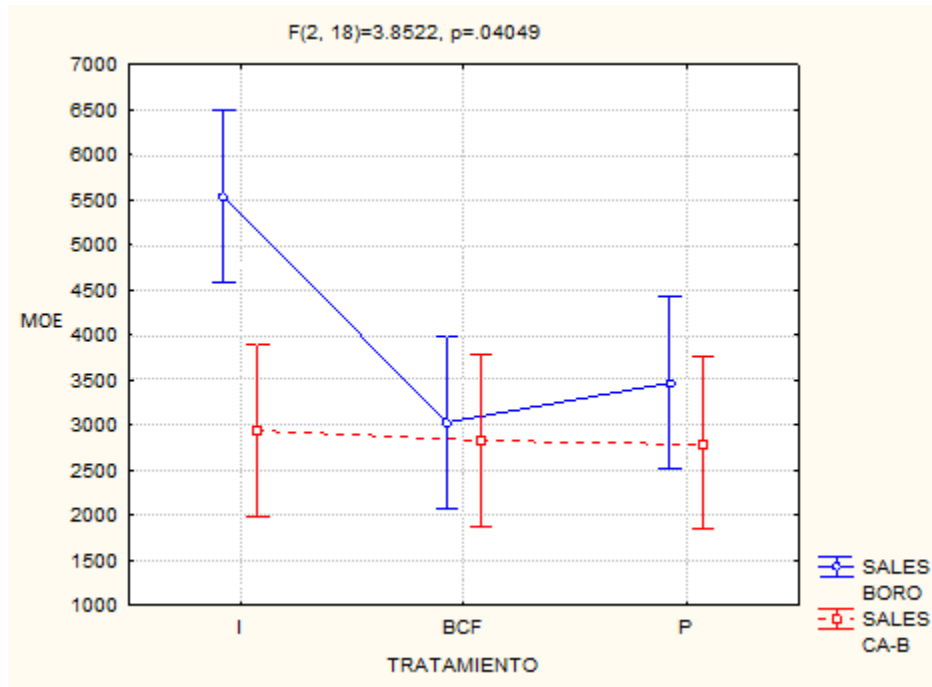


Figura 6.29. Gráfica de medias de interacción de las sales preservantes y los tratamientos de impregnación.

6.3.2.4. Análisis de varianza para los resultados de flexión estática (P_{max} , O_{bw} y E_w)

En el cuadro 6.13 se presenta el ANOVA para la carga máxima (P_{max}). De acuerdo al diseño experimental aplicado, el tipo de sustancias preservantes tiene influencia significativa para la carga máxima, los métodos de impregnación y la interacción de las sustancias con los métodos no presentan influencia estadísticamente significativa con la carga máxima.

Cuadro 6.13. ANOVA para la carga máxima (P_{max}).

| Factor de variación | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Cuadros medios | F | P |
|---------------------|------------------------|--------------------|------------------------|--------|----------|
| Tratamientos | $2,330759 \times 10^7$ | 2 | $1,165379 \times 10^7$ | 0,931 | 0,42442 |
| Sales | $1,336290 \times 10^8$ | 1 | $1,336290 \times 10^8$ | 10,672 | 0,004284 |
| Sales*Tratamientos | $4,984525 \times 10^7$ | 2 | $2,492262 \times 10^7$ | 1,990 | 0,165602 |
| Error | $2,253871 \times 10^8$ | 18 | $1,252150 \times 10^7$ | | |

En las figuras 6.30, 6.31 y 6.32 se presentan las gráficas de medias para las sustancias preservantes, métodos de impregnación y el efecto de la interacción de las sustancias preservantes y los métodos de impregnación respectivamente, donde se puede observar gráficamente los resultados del análisis de varianza.

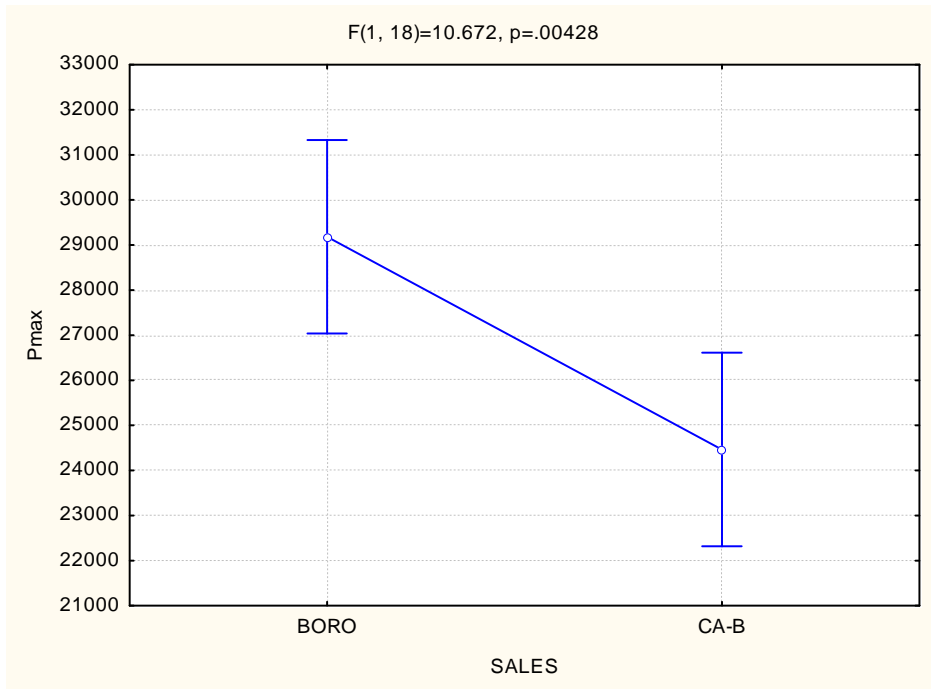


Figura 6.30. Gráfica de medias de P_{max} para las sales preservantes.

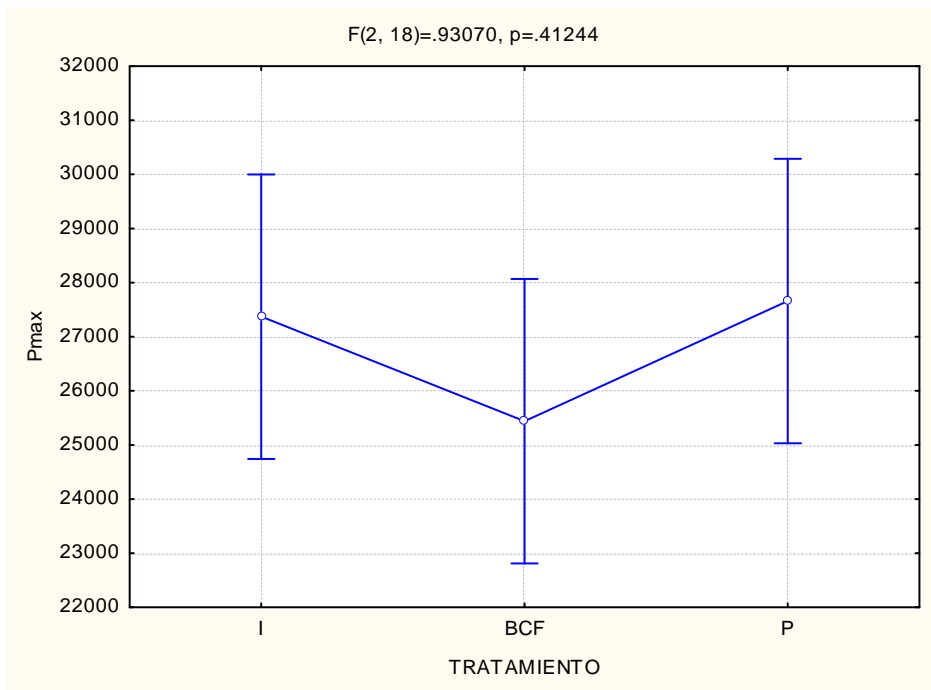


Figura 6.31. Gráfica de medias de P_{max} para los tratamientos de impregnación.

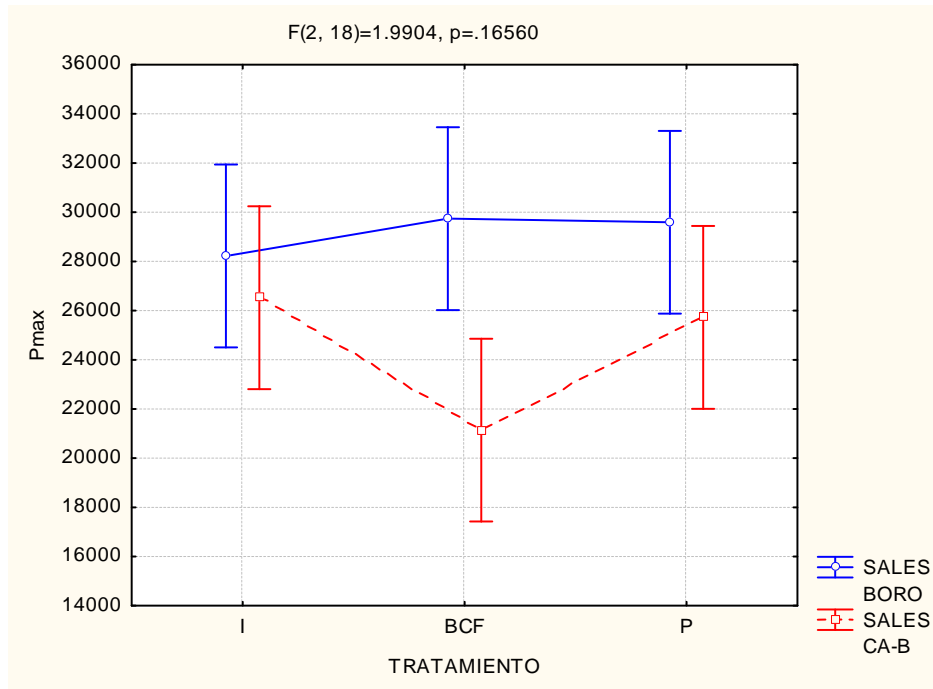


Figura 6.32. Gráfica de medias de interacción de las sales preservantes y los tratamientos de impregnación.

Como se muestra en el cuadro 6.14 y en las figuras 6.33, 6.34 y 6.35, el tipo de sustancia preservante, los métodos de impregnación y la interacción de las sustancias con los métodos no presentan influencia estadísticamente significativa con el esfuerzo máximo (σ_{bw}).

Cuadro 6.14. ANOVA para el esfuerzo máximo (σ_{bw}).

| Factor de variación | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Cuadros medios | F | P |
|---------------------|-------------------|--------------------|----------------|-------|----------|
| Tratamientos | 190,6 | 2 | 54,8 | 0,159 | 0,853852 |
| Sales | 854,3 | 1 | 854,3 | 2,485 | 0,132338 |
| Sales*Tratamientos | 25,0 | 2 | 12,5 | 0,036 | 0,964386 |
| Error | 6187,8 | 18 | 343,8 | | |

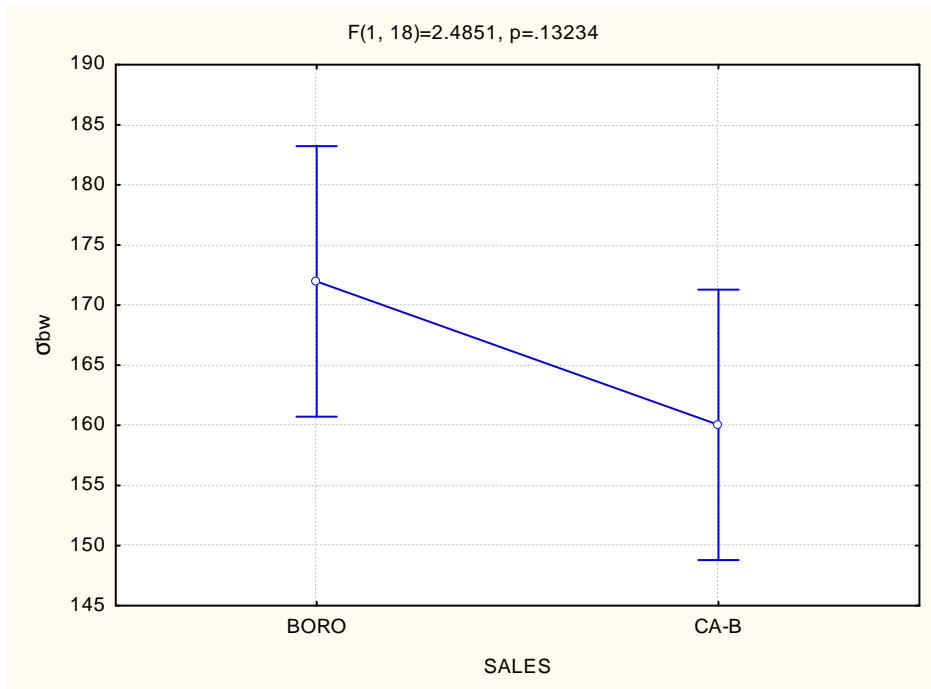


Figura 6.33. Gráfica de medias de σ_{bw} para las sales preservantes.

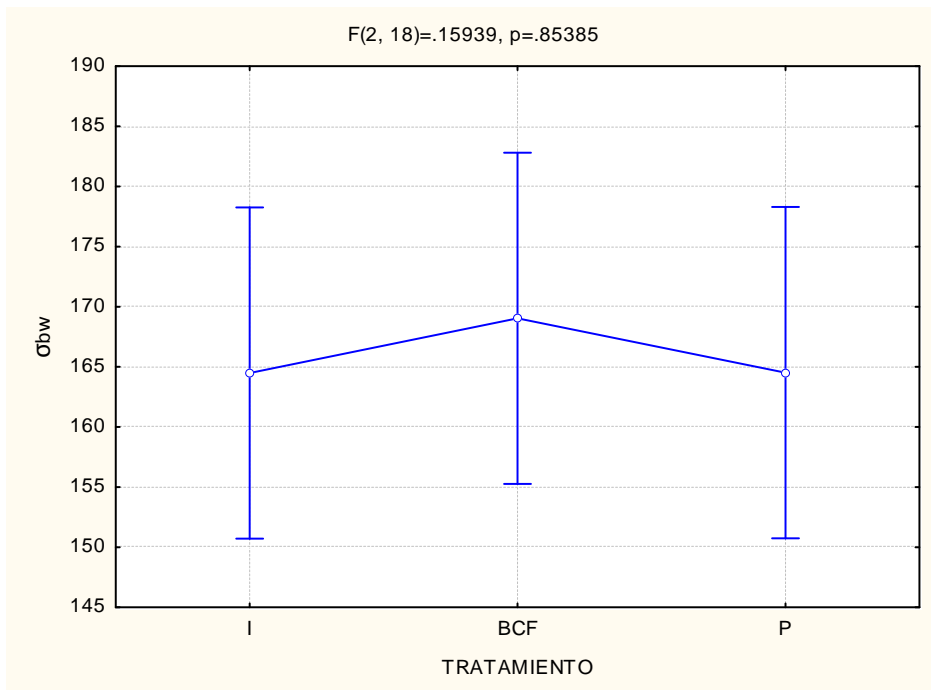


Figura 6.34. Gráfica de medias de σ_{bw} para los tratamientos de impregnación.

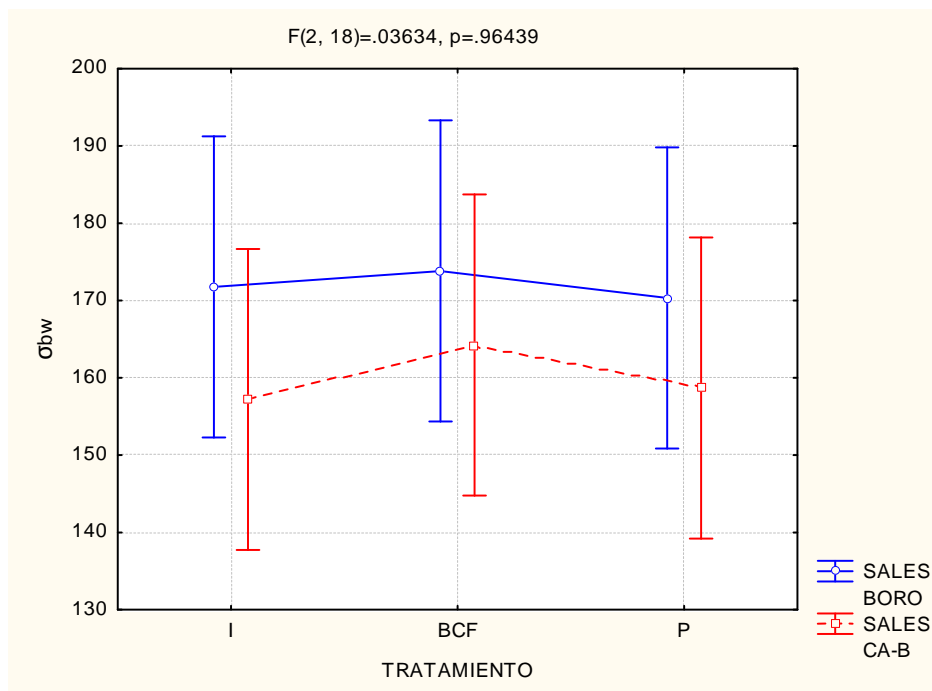


Figura 6.35. Gráfica de medias de interacción de las sales preservantes y los tratamientos de impregnación.

En cuanto al módulo de elasticidad (E_w) de acuerdo al diseño experimental aplicado (Cuadro 6.15), el tipo de sustancias preservantes, los métodos de impregnación y la interacción de las sustancias con los métodos no tienen influencia estadísticamente significativa.

Cuadro 6.15. ANOVA para el módulo de elasticidad (E_w).

| Factor de variación | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Cuadros medios | F | P |
|---------------------------|-------------------|--------------------|----------------|-------|----------|
| Tratamientos | 0,07834 | 2 | 0,03917 | 0,910 | 0,420416 |
| Sales | 0.013113 | 1 | 0,13113 | 3,045 | 0,098038 |
| Sales*Tratamientos | 0,07411 | 2 | 0,03705 | 0,860 | 0,439661 |
| Error | 0,77517 | 18 | 0,04307 | | |

En las figuras 6.36, 6.37 y 6.38 se presentan las gráficas de medias para las sustancias preservantes, métodos de impregnación y el efecto de la interacción de las sustancias preservantes y los métodos de impregnación respectivamente, donde se puede observar gráficamente los resultados del análisis de varianza.

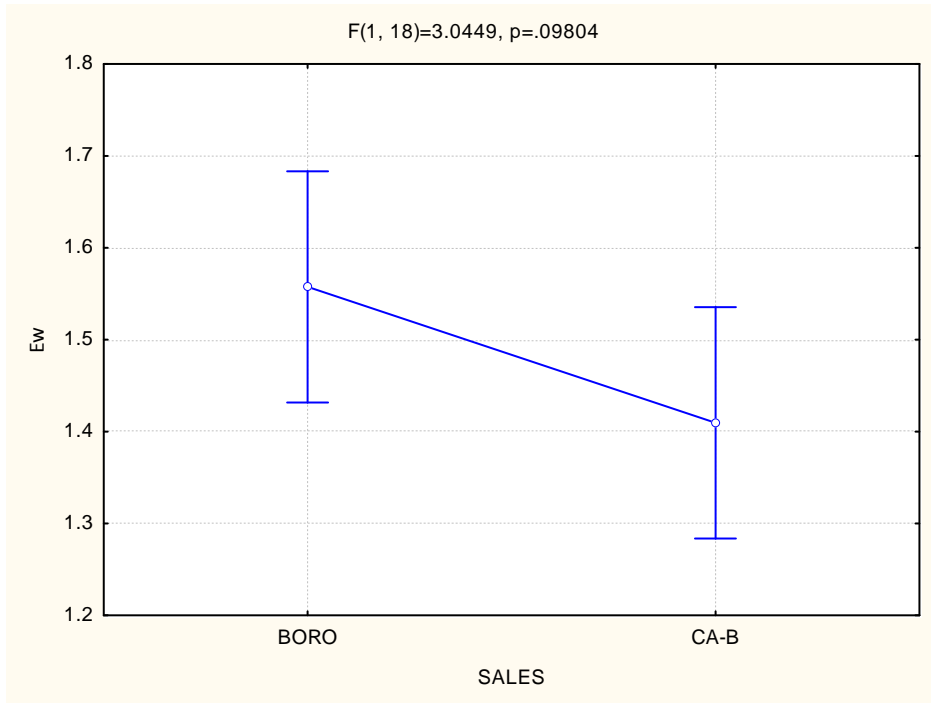


Figura 6.36. Gráfica de medias de E_w para las sales preservantes.

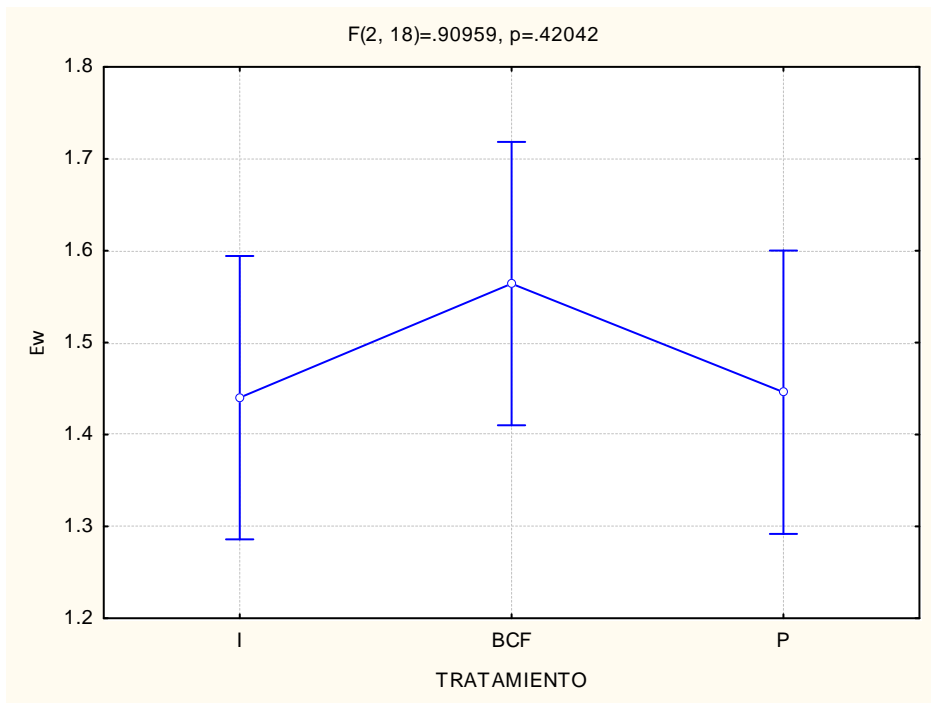


Figura 6.37. Gráfica de medias de E_w para los tratamientos de impregnación.

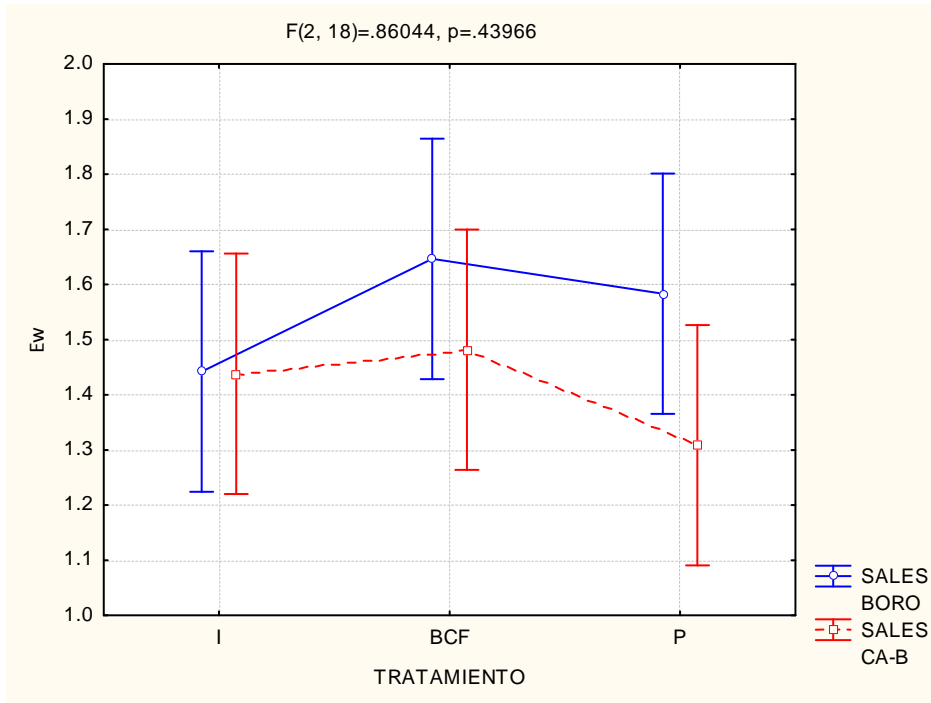


Figura 6.38. Gráfica de medias de interacción de las sales preservantes y los tratamientos de impregnación.

7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La apariencia de las probetas de *Q. laurina* impregnadas con sales de boro cambiaron con respecto a su color natural, se deslavarón y decoloraron ligeramente coincidiendo con lo descrito por Aburto (2006), Casimiro (2012) y Díaz (2014).

En lo referente a la impregnación con sales de boro, Aburto (2006) impregnó madera de *Mangifera indica* L. (mango) con la que obtuvo, en 72 h por el método de inmersión, una absorción (197,09 kg/m³) menor a lo obtenido con madera de *Q. laurina* (encino) ensayada en este trabajo durante 48 h (233,70 kg/m³). En cuanto a la retención con madera de encino fue más baja en comparación con madera de mango (3,94 kg/m³) en los mismos tiempos mencionados, lo anterior se puede deber a las diferencia de concentración utilizada en la preparación de las sales de boro. Aun así, la madera de *Q. laurina* se recomienda para un nivel de riesgo R1 que se especifica como madera para interiores, ambientes secos y ventilados (ONNCCE, 2013).

Casimiro (2012) preservó madera de *Pinus pseudostrobus* Lindl (pino) con sales de boro por el método de inmersión, impregnando en igual periodo de tiempo que el presente estudio; obtuvo valores de absorción (284,80 kg/m³) y retención (2,89 kg/m³) menores que los obtenidos con madera de *Q. laurina*; en cambio la penetración se clasificó para ambas especies (pino y encino) como parcial regular.

Comparando con Díaz (2014) que impregnó por el método de inmersión con madera del mismo género, *Quercus rugosa* Née (encino blanco) obtuvo retenciones (3,01 kg/m³) y absorciones (200,77 kg/m³) menores a las obtenidas en la madera de *Q. laurina* (encino rojo) esto se puede deber a la diferencia de permeabilidad que existe entre encinos blancos y rojos, por la presencia de tilosis y a otras obstrucciones (Guridi, 2004).

Raya (1999) reportó que la madera de *Quercus scytophylla* Liemb. (encino) impregnada con sales de boro a una concentración de 20% (de ácido bórico equivalente) con el método de baño caliente a baja presión (0,20 kg/m³), presentó valores de retención de 9,31 kg/m³ y penetración de 7,78 mm, más altos que los obtenidos con la madera de *Q. laurina* por el método de baño caliente-frío (retención de 6,00 kg/m³ y penetración de 6,88 mm). Sin embargo los valores de retención de la madera de *Q. laurina* se recomiendan para un nivel de riesgo R2 que puede ser utilizada como madera para interiores, con mala ventilación, sujeta a posibles fuentes de humedad o en exteriores pero bajo cubierta (ONNCCE, 2013).

Los valores de absorción, retención y penetración de las probetas de *Q. laurina* impregnadas por el método de baño caliente-frío con sales de boro ensayadas en este trabajo fueron mayores a los obtenidos por Díaz (2014) con madera de *Q. rugosa* y Casimiro (2012) con madera de *P. pseudostrobus*.

En las probetas de madera de *Q. laurina* impregnadas por el proceso Bethell con las sales de boro se obtuvieron valores de retención (5,41 kg/m³) más bajos a lo reportado por Aburto (2006) con madera de mango (7,50 kg/m³) y Simsek *et al.* (2010) con madera de pino (8,42 kg/cm²). Díaz (2014) reportó valores de retención más bajos (4,10 kg/m³) en madera de *Q. rugosa*, a lo obtenido en este trabajo. Los resultados de retención por el proceso Bethell con madera de *Q. laurina* se clasifican en un nivel de riesgo R1 donde la madera en servicio debe ser continuamente protegida del intemperismo o de cualquier fuente de humedad (ONNCCE, 2013).

En cuanto a la apariencia de las probetas de *Q. laurina* impregnadas con sales de cobre azol tipo B, los tres tratamientos utilizados en este trabajo presentaron un oscurecimiento en su color natural concordando con Díaz (2012) quien realiza la misma observación.

Los valores de absorción (196,48 kg/m³) y retención (2,95 kg/m³) de las sales de CA-B con madera de *Q. laurina* por el método de inmersión fueron ligeramente más altos a los obtenidos por Díaz (2014) en madera de *Q. rugosa* (absorción de 191,68 kg/m³ y retención de 2,88 kg/m³). En cambio, comparando los resultados con Casimiro (2012) con madera de *P. pseudostrobus* los valores de absorción (301,46 kg/m³) y retención (3,01 kg/m³) fueron mayores. En relación a la penetración con sales de cobre azol los resultados reportados por Casimiro (2012) fueron valorados como total regular, por Díaz (2014) como parcial irregular y para los reportados en este trabajo la penetración fue superficial en las caras de las probetas impregnadas.

Mientras en el presente trabajo se impregnó por el método de inmersión simple, Ando *et al.* (2011), Islam *et al.* (2013) y Islam *et al.* (2014) impregnaron madera (*Heritiera fames*, *Cryptomeria japónica* y *Pseudotsuga menziesii*) por el método de impregnación pasiva, proceso que consiste en inmersión con incisiones de láser de CO₂ en la madera; los valores de retención (1,33 kg/m³) de Ando *et al.* (2011) con madera de *H. fames* (sundri) fueron menores a los obtenidos con madera de encino presentados en este estudio. Para el resultados de retención de Islam *et al.* (2013) presentó valores en madera verde (4,97 kg/m³) y seca (4,88 kg/m³) de *C. japónica* los cuales son más altos que los presentados con *Q. laurina*. En cuanto a los valores de retención obtenidos por Islam *et al.* (2014), con madera de Douglas fir (*P. menziesii*) y Cedro japonés (*C. japónica*) en condición verde y seca fueron mayores los resultados que los reportados con madera de encino. Esto se puede deber a las incisiones con láser de CO₂ en las maderas empleadas y a la diferencia de densidad básica que existe entre las maderas de densidad baja (Douglas fir y Cedro japonés) y maderas de densidad media a alta o muy alta (encino y sundri).

Con respecto a la madera de *Q. laurina* preservada en este estudio con sales de CA-B por el método de baño caliente-frío los resultados de absorción (422,03 kg/m³) y retención (6,33 kg/m³) fueron mayores a los presentados por Casimiro (2012) y Díaz (2014) que preservaron madera de *P. pseudostrobus* (381,86 kg/m³ y 3,81 kg/m³) y *Q. rugosa* (139,50

kg/m³ y 2,09 kg/m³) respectivamente. Las penetraciones reportadas fueron: total irregular (Casimiro, 2012) y parcial irregular (Díaz, 2014). En cambio, la reportada en este estudio fue parcial regular.

Comparando los resultados de retención de sales de CA-B con los obtenidos por Ando *et al.* (2011) que impregnó madera de sundri (1,43 kg/m³) por el proceso Bethell, los resultados fueron menores a los obtenidos con madera de encino de este estudio (4,62 kg/m³). Díaz (2014) reporta para este mismo método en madera de *Q. rugosa* con los que obtuvo absorciones (233,53 kg/m³) y retenciones (3,50 kg/m³) menores a los obtenidos con madera de *Q. laurina*. En cuanto a la penetración (parcial irregular) y la absorción obtenida en la madera de *Q. laurina* por el proceso Bethell, los resultados la clasifican como una madera moderadamente tratable a fácil de tratar (JUNAC, 1988).

Con base en la norma U1-13 de la AWWA (2013) que especifica las categorías de exposición de los productos básicos en servicio; la madera de *Q. laurina* impregnada con sales de CA-B por el método de inmersión se clasifica como categoría de uso UC3 para madera en aplicaciones por encima del suelo (protegida y expuesta) y en construcción en interiores y exteriores, sin recubrimiento o escurrimiento del agua, expuesta a todos los ciclos climáticos, incluyendo mojado prolongado; sus aplicaciones típicas de la madera pueden ser en forros exteriores y tablillas, terrazas, viguetas de terrazas, barandales, cercas y molduras sin acabados o con acabados.

En lo que respecta a la clasificación del Sistema de categorías de uso (norma U1-13 de la AWWA, 2013) el método de baño caliente-frío con sales CA-B, la madera de *Q. laurina* se cataloga como clase de riesgo UC4C para aplicaciones en contacto con el suelo o agua dulce y componentes críticos o de difícil reemplazo, expuesto a todos los ciclos climáticos, ambientes severos y de alto potencial de pudrición. Sus aplicaciones típicas para la madera con este tipo de categoría pueden ser utilizadas para pilotes en contacto con el suelo (enterrados) y agua dulce, pilotes para cimientos, durmientes y postes de transmisión en áreas de nivel de pudrición severa.

La madera impregnada por el proceso Bethell con base en los valores de retenciones con sales de cobre azol tipo B, se clasifica como categoría de uso UC4A (norma U1-13 de la AWWA, 2013) para aplicaciones de componentes no críticos en contacto con el suelo (madera enterrada) y en contacto con el agua dulce. La madera que recibe esta clasificación puede ser aplicada para postes de cerca, terrazas, postes de transmisión y durmientes en áreas de nivel bajo de pudrición.

De acuerdo con los resultados logrados con la madera de encino por el método de baño caliente-frío con las dos sustancias preservantes, en comparación con los tratamientos de inmersión y Bethell es relevante el efecto que produce en la madera el periodo de calentamiento, que dilata los poros y permite la eliminación del aire contenido en las

cavidades celulares, para posteriormente en baño frío suceda la absorción de la solución de tratamiento forzada por el vacío parcial hacia el interior de la probeta (Guevara, 1996).

En cuanto a las propiedades mecánicas de la madera sin preservar y preservadas con sales de boro, los resultados obtenidos en la prueba de compresión paralela a la fibra para la carga máxima (P_{max}), muestran una leve disminución en el promedio de la madera impregnada por el método de inmersión en relación a la madera sin impregnar. En lo que respecta al método de baño caliente-frío y el proceso Bethell, la carga máxima se ve ligeramente aumentada en relación a la madera sin impregnar. El esfuerzo máximo (σ_w) y el módulo de elasticidad (MOE) presentaron valores menores estadísticamente significativos de la madera impregnada respecto a la madera sin impregnar. Los resultados anteriores pueden deberse a las reacciones químicas que existen entre el preservador y los compuestos de la madera al momento del tratamiento (Hunt y Garrant, 1967; Boding y Jayne, 1982 citado por Flores, 1999). Como consecuencia de las reacciones que se originan, las sales son capaces de degradar la madera mediante una hidrólisis parcial de la célula, variando esto según el nivel de retención, la distribución y la composición de la sal (Winandy *et al.*, 1983 citado por Flores, 1999). Simsek *et al.* (2010) quienes impregnaron con tres tipos de boratos ecológicos a diferentes concentraciones (0,25%, 0,50%, 1,50% y 3,00%) en madera de *Fagus orientalis* L. (haya oriental) y *Pinus sylvestris* L. (pino silvestre) reportan que todas las probetas de madera impregnada presentan valores menores en el esfuerzo máximo (σ_w) con relación a la madera sin impregnar. Además, se coincide con Kollmann y Cote (1968), quienes mencionan que la madera tratada con boratos aumenta la tasa de hidrólisis en la madera, provocando pérdidas en la resistencia mecánica.

De acuerdo a los resultados de flexión estática, las probetas impregnadas con sales de boro presentan un ligero aumento en la carga máxima (P_{max}) con respecto a las probetas sin impregnar y una disminución en el esfuerzo de ruptura (σ_{bw}) y del módulo de elasticidad (E_w) de las probetas impregnadas en comparación con las probetas sin impregnar; sin embargo estas diferencias no son estadísticamente significativas. Los resultados obtenidos en el esfuerzo de ruptura (σ_{bw}) en flexión estática coinciden con Simsek *et al.* (2010) quienes mencionan que los tratamientos con boratos disminuyen el valor del esfuerzo de ruptura de la madera impregnada comparada con la madera sin impregnar.

Al comparar la madera preservada con sales de CA-B y la madera sin preservar en la prueba de compresión paralela a la fibra, los resultados obtenidos en la carga máxima (P_{max}), en el esfuerzo máximo (σ_w) y en el módulo de elasticidad (MOE) muestran una disminución estadísticamente significativa, esta diferencia es más notoria en la madera impregnada por el método de baño caliente-frío. Esta pérdida podría estar relacionada con el aumento de retención de las sales (Pizzi, 1986; LEPAGE, 1996 citado por Suirezs, 2000).

Los resultados de la prueba de flexión estática para la madera preservada con sales de CA-B con relación a la madera sin preservar no presentan una marcada diferencia respecto a los

valores de la carga máxima (P_{max}). En relación al esfuerzo de ruptura (σ_{bw}) y el módulo de elasticidad (E_w) los resultados en la madera preservada muestran una disminución con relación a la madera sin preservar, aún cuando ésta no es estadísticamente significativa.

En los estudios realizados por Forest Products Laboratory (2010), Winandy (1995), Yildiz *et al.*, (2004) y Simsek *et al.*, (2010) citados por Villasante *et al.* (2013) reportaron disminuciones de la resistencia mecánica en flexión estática de la madera tratada con preservantes hidrosolubles, atribuyendo a las reacciones químicas entre la madera y los productos preservantes. En cambio, Villasante *et al.* (2013) impregnaron con un preservante oleosoluble (Vacsol Azure WR 2601) y sales de cobre azol (Tanalith E 3492)) en madera de *P. sylvestris* obteniendo un aumento estadísticamente significativo (con ambas sustancias) en la resistencia mecánica de las pruebas de flexión estática, módulo de elasticidad y compresión paralela a la fibra.

8. CONCLUSIONES

El tratamiento de baño caliente-frío presentó los mejores resultados en cuanto a la absorción y retención en la madera impregnada de *Q. laurina* con las sales de boro y sales de cobre azol, no obstante el proceso Bethell mostró una mayor penetración utilizando las sales de boro.

Las absorciones y penetraciones obtenidas con sales de boro permiten clasificar a la madera de *Q. laurina*, en función de su permeabilidad, como fácil de tratar (FT).

En función de su tratabilidad, la madera de encino impregnada con sales de CA-B utilizando los métodos de baño caliente-frío y Bethell se considera de moderadamente tratable (MT) a fácil de tratar (FT) y para el método de inmersión como imposible de tratar (IT).

Resulta adecuado emplear concentraciones de sales de boro similares a las utilizadas en este estudio y utilizando el método de baño caliente-frío ya que se alcanzó la retención mínima exigida para el Riesgo 2 de la Norma Mexicana NMX-C-322-ONNCCE-2003.

De acuerdo al análisis estadístico se encontró que el tipo de sustancias preservantes, los métodos de impregnación y la interacción de las sustancias con los métodos tienen influencia estadísticamente significativa en la retención.

En cuanto a las pruebas mecánicas, los resultados obtenidos muestran que las sales de boro y las sales de CA-B utilizadas en la impregnación de la madera de encino afectan significativamente en los esfuerzos de compresión paralela a la fibra en relación con la madera sin impregnar.

La impregnación de madera de *Q. laurina* con sales de boro y sales CA-B no afecta estadísticamente los esfuerzos de flexión estática con respecto a la madera sin impregnar.

La carga máxima (P_{max}) en compresión paralela no muestra diferencia significativa por el efecto de la sustancia preservante, los métodos de impregnación y la interacción de las sustancias con los métodos. Con respecto al esfuerzo máximo (σ_w) sólo las sustancias preservantes presentan una influencia estadísticamente significativa y en el módulo de elasticidad (MOE), tanto la sustancia preservante, los métodos de impregnación y la interacción de las sustancias con los métodos presentan diferencias estadísticamente significativas.

Las sustancias preservantes presentaron una influencia estadísticamente significativa en la carga máxima (P_{max}) en flexión estática. Por otro lado, el esfuerzo máximo (σ_{bw}) y el módulo de elasticidad (E_w) no se vieron afectados estadísticamente por las sustancias preservantes, los métodos de impregnación, ni la interacción de las sustancias con los métodos.

9. RECOMENDACIONES

Aunque la madera impregnada por el método de inmersión, lograra las menores retenciones con las sales de boro, se clasifica para un nivel de riesgo R1, en el cual la madera puede ser utilizada en muebles, puertas, escaleras y pasamanos interiores; y una clase de riesgo UC3 para el tratamiento con sales de CA-B, en el que la madera puede ser empleada para terrazas, viguetas de terrazas, barandales, cercas y molduras sin acabados.

La madera impregnada por el método de baño caliente-frío con las sales de boro presentó un nivel de riesgo R2, en donde la madera puede ser empleada para pisos, lambrín, pies derechos, muebles de cocina y marcos de puertas y ventanas de interiores; y para el tratamiento con sales de CA-B presentó una clase de riesgo UC4C en el que la madera puede ser utilizada en pilotes en tierra y agua dulce, en pilotes para cimientos, durmientes y postes de transmisión en áreas de nivel de pudrición severa.

La madera impregnada con sales de boro por el proceso Bethell presentó un nivel de riesgo R1 clasificándose de igual forma que el método de inmersión. En el caso de las sales CA-B, la madera es clasificada para una clase de riesgo UC4A, en el que la madera puede estar expuesta en áreas de nivel bajo de pudrición como postes de cerca, postes de terrazas, de transmisión y durmientes.

Se recomienda efectuar ensayos de laboratorio y de campo que permitan determinar si los preservantes y los métodos de impregnación utilizados en este estudio proveen protección adecuada según los niveles de riesgo.

10. REFERENCIAS

- Aburto Guzmán G. 2006. Impregnación de la madera de mango (*Mangifera indica* L.) con sales CCA y sales de boro por los métodos de inmersión y célula llena. Tesis profesional. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Mich., México.
- Ando, K.; Islam, M. N.; Yamauchi, H.; Hattori, N. 2011. Preservative leaching from copper azole-treated lumber: A comparison between the full-cell method and the passive-impregnation method. *Forest Products Journal*. [Internet]. 61(3):270–272. Disponible en: <<http://forestprodjournals.org/doi/abs/10.13073/0015-7473-61.3.270>>. [consulta: mayo 9, 2014].
- AWPA (American Wood Protection Association). 2013a. Standard For Copper Azole Type B (CA-B). P32-10. AWPA Book of Standards. p. 139.
- _____. 2013b. Standard For Waterborne Preservatives. P5-10. AWPA Book of Standards. pp. 114-119.
- _____. 2013c. Standard Methods For Determining Penetration Of Preservatives And Fire Retardants. A3-08. AWPA Book of Standards. p. 194.
- _____. 2013d. Use Category System: User Specification For Treated Wood. U1-13. AWPA Book of Standards. pp. 5-71.
- Arizaga, S.; Martínez-Cruz, J.; Salcedo-Cabrales., M; Bello-González, M. Á. 2009. Manual de la biodiversidad de encinos michoacanos. Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT). México, D.F. p. 16.
- Ávila Calderón, L. E. A.; Herrera Ferreyra, M. A.; Raya González, D. 2012. Preservación de la madera en México. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México. p. 152.
- Ávila Calderón, L. E. A.; Herrera Ferreyra, M. A. 2010. Manual de prácticas de Preservación de la Madera. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. pp. 18-34.
- Bello González, M. A.; Labat, J. N. 1987. Los encinos (*Quercus*) del estado de Michoacán, México. Cuadernos de estudios Michoacanos 1. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos- Centro D'études Mexicaines et Centraméricaines. México, D. F. pp. 58-60.
- Berrocal Jiménez, A. y Rojas Acuña, L. V., 2007. Resistencia de la madera de teca (*Tectona grandis* L.f.) proveniente de plantaciones forestales ante el ataque de termitas de madera seca *Cryptotermes brevis* (Walker). *Kurú: Resist Forestal* 4(10):1-15. [Internet].

Disponible en: <http://www.tec.ac.cr/sitios/Docencia/forestal/Revista_Kuru/anteriores/anterior10/Articulo%201.htm>. [consulta: agosto 7, 2013].

Boone, R. S.; Kozlik, C. J.; Bois, P. J.; Wengert, E. M. 1988. Dry kiln schedules for commercial woods-temperate and tropical. Forest Products Laboratory. USDA Forest Service. Madison, Wisconsin.

Casimiro Cenobio, J. C. 2012. Impregnación de madera de *Pinus pseudostrabus* lindl. con sales de boro y sales de cobre azol por métodos de inmersión simple y baño caliente-frío. Tesis profesional. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Mich., México.

COFAN (Comisión Forestal de América del Norte). 1999. Manual de construcción de estructuras ligeras de madera. 2da ed. Consejo Nacional de Madera en la Construcción – Universidad Autónoma Chapingo – Natural Resources Canada – United States Department of Agriculture. México.

De la Paz Pérez Olvera, C.; Dávalos Sotelo, R. 2008. Algunas características anatómicas y tecnológicas de la madera de 24 especies de *Quercus* (encino) de México. Madera y Bosques. 14(3), 2008:43-80.

_____ ; Dávalos Sotelo, R; Guerrero Cuacuil, E. 2000. Aprovechamiento de la madera de encino de México. Madera y Bosques. 6(1): 3 – 13.

_____ ; Vélez Jiménez, S.; Ceja Ramero, J. 2006. Anatomía de la madera de ocho especies de *Quercus* (Fagaceae) de Oaxaca, México (Parte A). Madera y Bosques. 12 (001):63-94.

Díaz López, J. A. 2014. Evaluación de los métodos de impregnación por inmersión, baño caliente-frío y presión, utilizando sales de boro y azoles de cobre en la madera de *Quercus rugoso* Née. Tesis profesional. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Mich., México.

DIN (Deutsches Institut für Normung), 1976. Testing Of Wood; Compression Test Parallel To Grain. DIN 52185-09.

Domratcheva Lvova, L. 2005. Análisis de la toxicidad y estabilidad de compuestos organometálicos para su uso como preservantes de la madera. 1º Foro Académico de la DES de Ingenierías y Arquitectura de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 1(1): 71-75.

E-CENTRO, 2012. Preservación de la madera, historia, peligros, Asociación Americana de Protección de la Madera, comercialización de los protectores de la madera y los

conservantes químicos. Centro de Ortigos. [Internet]. Disponible en: < http://centrodeartigo.com/articulos-utiles/article_105525.html>. [consulta: agosto 8, 2013].

Freeman, M. H.; McIntyre, C. R.; Jackson, D. 2009. A critical and comprehensive review of boron in wood preservation. Proceedings, annual meeting of the American Wood Protection Association. [Internet]. 5(105):. Disponible en: < <http://openagricola.nal.usda.gov/Record/IND44357977>>. [consulta: octubre 11, 2013].

Flores Sánchez, I. Cl. 1999. Efecto de las sales CCA-C en las propiedades mecánicas de la madera de *Pinus montezumae* Lamb. Tesis profesional. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Texcoco, Edo. de México. México.

Groenier S. J.; Lebow, Stan T. 2006. Preservative-treated wood and alternative products in the forest service. Forest Products Laboratory. USDA Forest Service. Missoula, Mont.

Guevara Salnicov, L., 1996. Características de preservación de 30 maderas. Folia Amazonica. [Internet]. 8(1): 65-78. Disponible en: < <http://www.iiap.org.pe/fovia8.aspx>>. [consulta: diciembre 17, 2013]

Guridi Gómez, L. I. 2004. Curso de anatomía de la madera II. Fichas descriptivas y claves de identificación de 20 maderas mexicanas (coníferas y latifoliadas) de importancia comercial. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. p. 15.

Gutiérrez Pulido, H.; De la Vara Salazar, R. 2008. Análisis y diseño de experimentos. Ed. Mc Graw Hill. México, D. F., México. pp. 135-143.

Herrera Ferreyra, M. A. 1992. Características físico-mecánicas de la madera de 15 especies del municipio de Morelia. Tesis profesional. Escuela de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Mich., México.

Islam, Md. N.; Ando, K.; Yamauchi, H.; Kamikawa, D.; Harada, T.; Khalil, A.; Hattori, N. 2013. Impregnation of preservative and fire retardants into Japanese cedar lumber by passive impregnation. Bio Resources. [Internet]. 8(1): 395-404. Disponible en: < http://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_08_1_395_Islam_Impregnation_Preservative_Fire_Retardant>. [consulta: mayo 9, 2014]

_____. 2014. Impregnation of laser incised wood of Douglas fir and Japanese cedar by dipping (passive impregnation) in solutions of copper azole (CuAz-B) and a fire retardant (PPC). De Gruyter. [Internet]. 68(3): 353–360. Disponible en: < <http://www.degruyter.com/view/j/hfsg.2014.68.issue-3/hf-2013-0140/hf-2013-0140.xml>>. [consulta: mayo 9, 2014].

ISO (International Organization for Standardization). 1975a. Wood-determination of content for physical and mechanical tests. ISO 3130. UDC 674.03:543.812. Switzerland.

_____. 1975b. Wood-determination of ultimate strength in static bending. ISO 3133. UDC 674.03: 539.384. Switzerland.

_____. 1975c. Wood-determination of modulus of elasticity in static bending. ISO 3349. UDC 674.03: 539.32: 531.224. Switzerland.

_____. 1976. Wood-test methods-determination of ultimate stress in compression parallel to grain. ISO 3787. UDC 674.03: 620.172.242. Switzerland.

JUNAC (Junta del Acuerdo de Cartagena). 1988. Manual de Grupo Andino para la Preservación de Maderas. Comunidad Económica Europea. Carvajal. Lima, Perú.

Kear, G.; Wú, H.; Jones M. S. 2008. Corrosion of ferrous-and zinc-based materials in CCA, ACQ and CuAz timber preservative aqueous solutions. *Materials and Structures*. 41:1405-1417.

Kollmann, F. F. P.; Cote, W. A. 1968. Principles of wood science and technology I. Solid wood. Berlin and Heidelberg, Germany: Springer-Verlag. p. 592.

Lebow, Stan T. 2004. Alternatives to chromated copper arsenate (CCA) for residential construction. U. S. Environmental Protection Agency. [Internet]. Madison, Wisconsin. Disponible en: < <http://www.epa.gov/oppad001/reregistration/cca/alternativestocca.htm>>. [consulta: marzo 23, 2013].

_____; Halverson Steven A.; Hatfield Cherilyn A. 2005. Treatability of underutilized northeastern species with CCA and alternative wood preservatives. US Forest Service - Research & Development. [Internet]. Madison, Wisconsin. Disponible en: <<http://www.treearch.fs.fed.us/pubs/21480>>. [consulta: noviembre 6, 2013].

Martínez Martínez, M. 1981. Los encinos de México. Anales del Instituto de Biología UNAM. Comisión Forestal del Estado de Michoacán. Serie Técnica Manejo No. 8. 2a Ed. Michoacán, México. p. 358.

Munsell Color. 1990. Munsell soil color charts. Baltimore, Maryland. p. 17.

Nixon, K. C. 1993. The genus *Quercus* in Mexico. In: Ramamoorthy, T.P. R. Bye, A. Lot y J. Fa (Eds.). Biological diversity of Mexico: origins and distribution. Oxford University Press New York. pp. 447-458.

ONNCCE (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación). 1999. Industria de la Construcción – Vivienda de Madera – Retención y

Penetración de Sustancias Preservadoras en Madera – Métodos de Prueba. NMX-C-410-ONNCCE-1999. México.

_____. 2002. Industria de la Construcción – Preservación de Maderas – Terminología. NMX-C-419-ONNCCE-2001. México.

_____. 2006a. Industria de la Construcción – Madera Preservada a Presión – Clasificación y requisitos. NMX-C-322-ONNCCE-2003. México.

_____. 2006b. Industria de la Construcción – Preservadores para Madera – Clasificación y Requisitos. NMX-C-178-ONNCCE-2001. México.

Raya González, D. 1999. Eficacia de los extractos de *Eucalyptus cinerea* F. V. Muell., *Eucalyptus tereticornis* Sm. y *Nerium oleander* L. en la protección de la madera de *Quercus scytophylla* Liemb. contra *Lictus sp.* Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Mich., México.

Rzedowski, J. 1978. Vegetación de México. Ed. Limusa. México, D. F., México. pp. 20-23.

Reyes Jiménez, L. 2006. Eficacia de dos productos retardantes al fuego en madera de *Pinus pseudostrobus* Lindl. utilizando tres métodos de impregnación. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Mich., México.

Salas Langer, V. N. 2005. Impregnación de la madera de *Eucalyptus nitens*. Tesis profesional. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Australia de Chile. Valdivia, Chile.

Sánchez Vargas, T.; Bocanegra Ojeda, S. 2006. Manual de prácticas de laboratorio de física y mecánica de la madera. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. p. 25.

Santillán García, R. 2013. Determinación del módulo de elasticidad por vibraciones. Influencia de la relación longitud/altura. Tesis de maestría. Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias. Universidad de Valladolid (campus de Palencia). Palencia, España.

SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2013. Anuario estadístico de la producción forestal 2012. SEMARNAT. México, D. F.. p. 13.

Simsek, H.; Baysal, E.; Peker H. 2010. Some mechanical properties and decay resistance of wood impregnated with environmentally-friendly borates. *Construction and Building Materials*. [Internet]. 24: 2279-2284. Disponible en: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061810001480#>>. [consulta: mayo 30, 2014].

Suirezs, T. M. 2000. Efecto de la impregnación con CCA (cromo-cobre-arsénico) sobre las propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Pinus taeda* L. implantado en la provincia de Misiones. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Nacional de Misiones. Misiones, Argentina.

USEPA (United States Environmental Protection Agency). 2003. Response to request to cancel certain chromated copper arsenate (CCA) wood preservative products and amendments to terminate certain uses of other CCA products. [Internet]. Federal Register, Washington, DC. Disponible en: < <https://www.federalregister.gov/articles/2003/04/09/03-8372/response-to-requests-to-cancel-certain-chromated-copper-arsenate-cca-wood-preservative-products-and>>. [consulta: enero 20, 2014].

Vaca de Fuentes, R. B. 1998. Técnicas para la preservación de las madera. Documento técnico 65/1998. Universidad Autónoma Juan Misael Saracho. Bolivia.

Villasante, A. M.; Laina, R.; Rojas, J. M.; Rojas, I. M.; Vignote, S. 2013. Mechanical properties of wood from *Pinus sylvestris* L. treated with Light organic solvent preservative and with waterborne copper azole. Forest Systems. [Internet]. 22(3): 416-422. Disponible en: <<http://dx.doi.org/10.5424/fs/2013223-03857>>. [consulta: mayo 30, 2014].

11. ANEXOS

Anexo 1. Programa de secado empleada para el tratamiento de la madera de *Q. laurina* (Boone *et al.*, 1988).

Nombre Científico: Quercus spp. Nombre Conún: Encino Programa: T3-C1
 Espesor: 1 1/4", 2 1/4" Humedad inicial: 45-50 Humedad final: 10%
 Observaciones: Q. rugosa, Q. candicans y Q. laurina, piezas de diferentes anchos y espesores, algunas con corteza.

| Etapa de Secado | Etapa de Temperatura Número | Etapa de Depresión Número | Clase de: | | Programa de Temperatura | | Programa de Depresión | | Bulbo Húmedo | | Humedad Relativa % | Contenido de Humedad en Equilibrio % | Declive de Secado |
|-------------------|--------------------------------|------------------------------|----------------------|------|-------------------------|-------|-----------------------|-------|--------------|-------|-----------------------|---|-------------------|
| | | | Contenido de Humedad | | Bulbo seco | | | | | | | | |
| | | | De: | A: | °F | °C | °F | °C | °F | °C | | | |
| 1 | 1 | 1 | > | 40 | 110 | 43.33 | 3 | 1.66 | 107 | 41.67 | 90 | 19 | 2.1 |
| 2 | 1 | 2 | 40 | 35 | 110 | 43.33 | 4 | 2.22 | 106 | 41.11 | 87 | 17.5 | 2 |
| 3 | 1 | 3 | 35 | 30 | 110 | 43.33 | 6 | 3.33 | 104 | 40 | 80 | 15.1 | 2 |
| 4 | 2 | 4 | 30 | 25 | 120 | 48.89 | 10 | 5.56 | 110 | 43.33 | 72 | 12.1 | 2 |
| 5 | 3 | 5 | 25 | 20 | 130 | 54.44 | 25 | 13.88 | 105 | 40.56 | 43 | 6.8 | 2.3 |
| 6 | 4 | 6 | 20 | 15 | 140 | 60 | 45 | 25 | 95 | 35 | 19 | 3.4 | 4.4 |
| 7 | 5 | 7 | 15 | S=8 | 160 | 71.11 | 45 | 25 | 115 | 46.11 | 25 | 3.7 | 4.3 |
| IGUALAMIENTO | | | s=8 | m=10 | 160 | 71.11 | 29 | 16.11 | 131 | 55 | 44 | 6 | 1.66 |
| ACONDICIONAMIENTO | | | m=10 | x=10 | 160 | 71.11 | 8 | 4.44 | 152 | 66.67 | 81 | 12.7 | 0.78 |

s = Contenido de humedad de la muestra más seca
 m = Contenido de Humedad de la muestra más húmeda
 x = Contenido de humedad de la media

Anexo 2. Norma NMX-C-322-ONNCCE-2003 de clasificación, condición de uso y ejemplos del uso de madera de acurdo al grado de riesgo en servicio de la madera.

| Niveles de riesgo | Clasificación | Condición de uso | Ejemplos |
|-------------------|--|--|---|
| R1 | Madera en interiores, ambiente seco y ventilado | Continuamente protegida del intemperismo o de cualquier fuente de humedad | Muebles de interiores, puertas de interiores, escaleras, pasamanos |
| R2 | Madera en interiores, mal ventilada, sujeta a posibles fuentes de humedad, o en exteriores pero bajo cubierta. | Expuesta a variaciones de humedad, pero no expuesta a la lluvia. De uso no estructural | Pisos, pies derechos, muebles de cocina, sótanos, marcos de puertas y ventanas, lambrín |
| R3 | Madera en exteriores, de uso estructural, expuesta a la humedad | Expuesta a variaciones climáticas y a la lluvia de manera cíclica | Postes, postes de transmisión, crucetas, armaduras, pisos de terrazas, madera estructural, vigas, columnas de portales, tarimas, plataformas de vehículos, techos |
| R4 | Madera en exteriores, en contacto con la tierra o con agua dulce | Madera expuesta a variaciones climáticas y al agua continuamente | Cimientos, pilotes para minas, torres de enfriamiento, techos |
| R5 | Madera en contacto con el agua salada o salobre | Madera expuesta al agua salada | Muelles marítimos, pilotes marinos, represas, plataformas marinas, embarcaciones |

Anexo 3. Retención mínima recomendada del preservante boro de acuerdo a la norma mexicana NMX-C-322-ONNCCE-2003.

| Requisitos mínimos de retención de acuerdo al grado de riesgo en servicio de la madera | Tipo Nivel | BORO Kg/m³ (lb/pie³) |
|---|-------------------|---|
| | R1 | 2,70 (0,17) |
| | R2 | 6,40 (0,40) |
| | R3 | NR |
| | R4 | NR |
| | R5 | NR |

Anexo 4. Especificación de los valores de retención del preservante cobre azol tipo B (CA-B) de acuerdo a su designación de categoría de uso conforme a la norma U1-13 de la AWWA, 2013.

| Aplicación | Clase de riesgo | CA-B Kg/m³ (lb/pie³) |
|--|------------------------|---|
| Interior (seco y húmedo) | UC1, UC2 | 1,7 (0,10) |
| Sobre el nivel del suelo (protegido y expuesto) | UC3A, UC3B | |
| Madera enterrada en el suelo (uso general) | UC4A | 3,3 (0,21) |
| Madera enterrada en el suelo estructural (trabajo pesado y extremo) | UC4B, UC4C | 5,0 (0,31) |

Anexo 5. Designaciones de categoría de uso para las condiciones de servicio de acuerdo a la norma U1-13 de la AWWA, 2013.

| Categoría de uso | Condiciones de servicio | Medio ambiente del uso | Agentes comunes de deterioro | Aplicaciones Típicas |
|--|--|--|--|---|
| UC1 INTERIOR/ SECA | Construcción en interiores por arriba del nivel del suelo Seca | Protegidos continuamente de la intemperie y otras fuentes de humedad | Sólo insectos | Construcciones en interiores y muebles |
| UC2 INTERIOR/ HÚMEDO | Construcción en interiores por arriba del nivel del suelo Húmedo | Protegida de la intemperie, pero sujeta a otras fuentes de humedad | Insectos y hongos causantes de pudrición | Construcciones en interiores |
| UC3A POR ARRIVA DEL NIVEL DEL SUELO Protegido | Construcción en exteriores por arriba del nivel de suelo, recubierto y escurrimiento rápido de agua | Expuesto a todos los ciclos climáticos, no expuestos a mojado prolongad | Insectos y hongos causantes de pudrición | Molduras con acabado, forros exteriores y tablillas |
| UC3B POR ARRIVA DEL NIVEL DEL SUELO Expuesto | Construcción en exteriores por arriba del nivel de suelo sin recubrimiento o escurrimiento del agua deficiente | Expuesto a todos los ciclos climáticos, incluyendo a mojado prolongado | Insectos y hongos causantes de pudrición | Terrazas, viguetas de terrazas, barandales, cercas y molduras sin acabados |
| UC4A CONTACTO CON EL SUELO Uso general | Contacto con el suelo o agua dulce, uso en componentes no críticos | Expuesto a todos los ciclos climáticos, condiciones de exposición normales | Insectos y hongos causantes de pudrición | Postes de cerca, para terrazas, de transmisión y durmientes (áreas de nivel bajo de pudrición) |
| UC4B CONTACTO CON EL SUELO Trabajo pesado | Contacto con el suelo o agua dulce, uso en componentes críticos o de difícil reemplazo | Expuesto a todos los ciclos climáticos, alto potencial de pudrición, incluyendo salpicadura de agua salada | Hongos causantes de pudrición e insectos con mayor potencial de biodeterioro | Cimientos de madera permanentes, postes de construcción, horticultura, durmientes y postes de transmisión (área de nivel de pudrición severa) |
| UC4C CONTACTO CON EL SUELO Trabajo extremo | Contacto con el suelo o agua dulce, uso en componentes estructurales críticos | Expuesto a todos los ciclos climáticos, ambientes severos, alto potencial de pudrición | Insectos y hongos causantes de pudrición con potencial extremo de biodeterioro | Pilotaje en tierra y agua dulce, para cimientos de durmientes y postes de transmisión (áreas de nivel de pudrición severa) |
| UC5A USO MARINO | Agua salada y zona de lodo adyacente | Exposición marina continua (agua salada) | Organismos de agua salada | Pilotaje, muros de contención, arriostramientos |
| UC5B USO MARINO | Agua salada y zona de lodo adyacente | Exposición marina continua (agua salada) | Organismos de agua salada, incluyendo tolerantes a la creosotas, <i>Limnoria tripunctata</i> | Pilotaje, muros de contención, arriostramientos |
| UC5C USO MARINO | Agua salada y zona de lodo adyacente | Exposición marina continua (agua salada) | Organismos de agua salada, incluyendo <i>Martesia</i> , <i>Sphaeroma</i> | Pilotaje, muros de contención, arriostramientos |
| UCFA RETARDANTE DE FUEGO Interiores | Protección contra incendios según sea necesarios de acuerdo con los reglamentos de construcción de interiores | Protección continua de la intemperie y otras fuentes de humedad | Fuego | Revestimiento de techos, armaduras de cubierta, montantes, viguetas, paneles |
| UCFA RETARDANTE DE FUEGO Exteriores | Protección contra incendios según sea necesarios de acuerdo con los reglamentos de construcción de exteriores | Sujeta a mojarse | Fuego | Paredes exteriores verticales, superficies de techos inclinadas u otras construcciones que permitan que el agua drene rápidamente |