

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE LA MADERA

**ESTUDIO DEL EFECTO DE LAS ONDAS MECANICAS
SOBRE *Reticulitermes hesperus* Banks EN MADERA DE
Pinus radiata (D. DON)**

Memoria para optar al Título
Profesional de Ingeniero de la Madera

BRUNO GERARDO TEJER SOTELO

Profesor Guía: Ing. Civil Mecánico USACH
Ingeniero de L'Ecole Superieure du Bois (París, Francia)
Sr. José Tomás Karsulovic Carrasco

Profesor Guía: Ing. Forestal UCH, Sr. Rene Carmona Cerda

SANTIAGO - CHILE.
2004

**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE LA MADERA**

**ESTUDIO DEL EFECTO DE LAS ONDAS MECANICAS EN *Reticulitermes
hesperus* Banks EN MADERA DE *Pinus radiata* (D. DON)**

Memoria para optar al Título
Profesional de Ingeniero de la Madera

Bruno Gerardo Tejer Sotelo

Calificaciones:	Nota	Firma
Prof. Guía Sr. Tomás Karsulovic C.	7,0
Prof. Guía Sr. Rene Carmona C.	6,6
Prof. Consejera Sra. Amanda Huerta F.	6,2
Prof. Consejero Sr. Victor Gaete M.	6,9

SANTIAGO-CHILE

2004

A mis Padres
María Isabel y Oscar Francisco

AGRADECIMIENTOS

Al Fondo de Desarrollo de las Ciencias y la Tecnología FONDECYT por el financiamiento otorgado al desarrollo de esta memoria a través del Proyecto N° 1990680.

A mi profesor guía Sr. José Tomás Karsulovic Carrasco por la confianza depositada en el desarrollo de esta memoria, por sus consejos y constante apoyo.

A mi profesor co – guía Sr. Rene Carmona Cerda por los consejos y ayuda entregada.

Al profesor consejero Sr. Victor Gaete M. por toda la ayuda entregada, dada su formación en el campo de la acústica, por sus consejos y apoyo.

A la profesora consejera Sra. Amanda Huerta F. por la rapidez en la corrección de esta memoria.

Al Laboratorio de Ultrasonidos del Departamento de Física de la Facultad de Ciencia de la Universidad de Santiago, especialmente a la profesora Yolanda Vargas Hernández (Dra. en Ciencias con mención en Física) por la desinteresada ayuda brindada.

A mis amigos de las carreras de Ingeniería de la Madera, Ingeniería Forestal y Agronomía.

RESUMEN

Esta memoria se desarrolló en el marco del Proyecto FONDECYT N° 1990680 y tuvo por objetivo analizar el comportamiento de las termitas subterráneas (*Reticulitermes hesperus* Banks) frente a la influencia de ondas mecánicas a través de pulsos sónicos y ultrasónicos.

Los ensayos a nivel del rango ultrasónico se efectuaron con las frecuencias de 100, 500 y 1000 kHz. Estas frecuencias fueron aplicadas en madera de *Pinus radiata* (D. Don), que estaba siendo atacada por termitas pertenecientes a la casta de las obreras. Al término de esta experiencia se completaron 20 horas de aplicación de ultrasonido y se realizó un análisis cualitativo de los resultados.

Los resultados obtenidos para las frecuencias ubicadas en el rango ultrasónico no entregaron señales claras sobre la influencia del ultrasonido en termitas en proceso de ataque a madera de *P. radiata*, es decir, no hubo un menor grado de ataque de las probetas ensayadas con respecto a las testigos.

Los ensayos a nivel del rango sónico se llevaron a cabo con las frecuencias de 11 y 20 kHz en condiciones de cavitación en agua. Para la realización de este ensayo se utilizaron transductores de potencia, sumergiéndose las termitas en agua destilada a una temperatura de 25 °C. Para cada frecuencia se aplicó potencias de 5, 10 y 15 Watts. A su vez cada potencia fue analizada para 2, 5 y 10 minutos de aplicación de ultrasonido.

Con estos resultados se efectuó un análisis de varianza por medio de un diseño trifactorial de efectos fijos con 3 repeticiones, en el que los factores estudiados fueron frecuencia, potencia y tiempo.

Por último para las frecuencias ubicadas en el rango sónico, las termitas se vieron directamente afectadas debido a la cavitación acústica, fenómeno que les ocasionó la muerte con una mortalidad promedio del 91%. La mayor tasa de mortalidad se produjo para la radiación de 11 kHz con un 95% de mortalidad.

SUMMARY

This report has been developed in the frame of a FONDECYT Project N° 1990680. The main objective of this study was to analyze the behavior of subterranean termite (*Reticulitermes hesperus* Banks) under to the influence of mechanical waves through ultrasonic and sonic pulses.

The tests at the ultrasonic level range took place with the frequencies of 100, 500 and 1000 kHz. These stimuli were applied to *Pinus radiata* (D. Don) wood, that presented an attack level by termites belonging to the caste of the workers. At the end of this experience 20 hours of application of ultrasound were completed and a qualitative analysis of the results was made.

The results obtained for the frequencies located in the ultrasonic range did not present clear evidence of the influence of the ultrasound over the termites attack process in *P. radiata.*, that is to say, there was no a smaller degree of attack of the samples tried with respect to the witnesses.

The tests at the sonic range was carried out with frequencies of 11 and kHz in conditions of water cavitation. For the accomplishment of this test immersion transducers were used, therefore the termites were submerged in 25° C distilled water. For each frequency analyzed the powers levels of 5, 10 and 15 Watts was tested. Each power level was induced during 2, 5 and 10 minutes of application.

With the obtained results an analysis of variance by means of a trifactorial design of fixed effects with 3 repetitions was computed, the three considered factors were frequency, power and time.

Finally for the frequencies located in the sonic range, the termites was directly affected due to the acoustic cavitation, phenomenon that cause the death with a mortality average to them of 91%. The greater rate of mortality took place for the radiation of 11 kHz with a 95% of mortality.

1. INTRODUCCION

En nuestro país, la madera se utiliza como material de construcción hace muchos años, no obstante, subsisten muchos prejuicios respecto a su uso como son pobreza, combustibilidad, baja resistencia mecánica, susceptibilidad al ataque de organismos biológicos, entre algunos de los más recurrentes. Actualmente muchas instituciones públicas y privadas intentan revertir esta situación, lo que sin duda no se logrará en el corto plazo, por lo arraigado que están estos conceptos en la población.

Una forma de revertir estos prejuicios, es dar a conocer las características de la madera como material, con sus fortalezas y debilidades, presentando diversas alternativas para prevenir y superar éstas últimas.

Una importante característica de la madera como material constructivo es que se trata de un material de origen biológico por tanto es biodegradable. Por este motivo al construir es conveniente utilizar madera tratada, sin embargo, por los costos en que se incurren generalmente esto no se realiza. Otra manera de asegurar un buen desempeño de la madera en servicio es la adopción correcta de los métodos constructivos, lo que tampoco es habitual en la práctica.

La madera en servicio se puede ver afectada tanto por factores de tipo abiótico como biótico. Entre los factores de tipo abiótico se incluyen fuego, solicitaciones mecánicas, productos químicos y otros originados por factores ambientales; en el caso de los factores bióticos se encuentran organismos tales como hongos, insectos, moluscos y crustáceos.

Los agentes biológicos más recurrentes que atacan a la madera corresponden a hongos y termitas, que se alimentan de la celulosa, el principal componente de la madera. Por lo general, las termitas no revelan su presencia en la madera, quedando ésta en evidencia al presentarse fallas locales en elementos tales como marcos de puertas, bastidores de las ventanas, soleras y revestimientos.

Las termitas se clasifican en: termitas de madera seca, de madera húmeda y subterráneas. Las termitas subterráneas dan indicios de su actividad por la presencia de túneles que construyen, sirviéndose de fragmentos diminutos de tierra y madera parcialmente digerida y cementada con excrementos, los que utilizan para acceder a la madera que no se encuentra en contacto directo con el suelo.

La mayoría de los métodos existentes para controlar el ataque de las termitas subterráneas son paliativos, no curativos. Esto es debido a que las termitas establecen sus termiteros fuera de la madera, por lo que se podrá eliminar a las termitas que la están atacando pero difícilmente se podrá combatir su nido.

Basado en que la remoción o eliminación del termitero es difícil de realizar por lo complejo de su localización, este estudio analiza la posibilidad de eliminar, incapacitar o ahuyentar a las termitas haciendo uso de ondas mecánicas, que se utilizan actualmente en el control de plagas como roedores e insectos.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

- Analizar el efecto de las ondas mecánicas sobre *Reticulitermes hesperus* Banks en madera comercial de *Pinus radiata* (D. Don).

2.2 Objetivos específicos

- Determinar un método que permita establecer y controlar el efecto de las ondas mecánicas en el comportamiento de individuos aislados de la casta de las obreras, pertenecientes a una colonia de termitas.
- Establecer el grado de efecto de las ondas mecánicas en las termitas en proceso de ataque en madera de *P. radiata*.
- Determinar el rango de frecuencia y niveles de energía que alteran el comportamiento de las termitas.

3. REVISION BIBLIOGRAFICA

3.1 Termitas

Las termitas se encuentran principalmente en latitudes tropicales y subtropicales, pero también habitan en regiones templadas. Son muy benéficas en las áreas forestales ya que ayudan en la descomposición de la madera muerta, la reincorporación de este material al suelo y la aereación del mismo. Sin embargo, a menudo son muy destructivas en los edificios, postes de cercas y otras estructuras de madera (Coulson y Witter, 1990).

Las termitas son insectos sociables, viven en colonias y dividen sus actividades esenciales entre formas o castas especializadas. En una colonia suele haber tres castas: los reproductores, los soldados y los obreros (Hunt y Garrat, 1962).

Los termitas se alimentan de la celulosa de la gran mayoría de las especies de madera, en distintas formas: madera, tableros, papel, tejidos, etc. aún cuando los mayores daños se dan en las maderas estructurales y de carpintería interior e incluso exterior de viejos edificios (Rodríguez, 1998).

En Chile a estos insectos se les conoce como termitas, termites, trintaros, chalilos o vacas peladas. Pequeños, con una talla de no más de 10 mm los mayores, a 3 mm los más pequeños. Los individuos no alados son de color blanco cremoso con una mancha longitudinal central sobre el abdomen, que corresponde al tracto digestivo que se trasluce a través del delgado e incoloro tegumento. Los alados por el contrario, son fuertemente quitinizados, de color café (Cammousseight, 2000).

Las termitas como todos los insectos sociales necesitan de un sistema de comunicación, éste se basa, en compuestos químicos secretados por glándulas ubicadas en el tegumento o exoesqueleto de los insectos. Estas glándulas reciben el nombre de tegumentarias, las que a su vez son clasificadas en dos tipos: unicelulares, las que se encuentran ubicadas en todo el tegumento y entre sus funciones se destacan el reconocimiento de individuos pertenecientes a una misma colonia; y las pluricelulares, entre las que se puede destacar la glándula frontal característica de las termitas

subterráneas, presentando un mayor desarrollo en la casta de los soldados, el producto secretado sirve de advertencia para la defensa del nido frente al ataque de invasores.

3.2 Clasificación de las termitas

3.2.1 Termitas subterráneas

Se trata de pequeñas formas aladas, promediando 6 mm de largo. Las termitas subterráneas de la familia *Rhinotermitidae*, son comúnmente las más perjudiciales en las estructuras de los EE.UU. (Metcalf y Flint, 1965; Coulson y Witter, 1990). Los insectos incluidos en este grupo son por naturaleza habitantes del suelo, penetran en la madera solamente desde él y requieren para su existencia una provisión constante de humedad (Hunt y Garrat, 1962; Rodríguez, 1998). Pueden acceder a madera que no se encuentra en contacto con el suelo, para lo cual, se sirven de túneles que construyen sirviéndose de fragmentos diminutos de tierra y madera parcialmente digerida, cementada con excrementos. De esta manera se generan las condiciones de humedad y temperatura necesarias para su supervivencia. En la figura 1 es posible apreciar los túneles de los cuales se sirven las termitas para acceder a la madera.

Los límites del territorio ocupado por una colonia son difíciles de precisar, alcanzando grandes extensiones invadidas por miles de individuos obtenidos de numerosas parejas reproductoras (aladas o neoténicas), las que, sin rechazarse, mantienen la cohesión y la permanente actividad de una sociedad fuerte y en constante renovación (Cammousseight, 1997).

De acuerdo a Cabrera (1999), las termitas subterráneas se desarrollan en suelos con un rango de temperatura entre los -4 y 27° C, y una humedad que varía entre 6 a 37% (muestras tomadas a 10 – 15 cm de profundidad).

Figura 1. Túneles construidos por termitas subterráneas para acceder a la madera.



3.2.2 Termitas de la madera seca

Las termitas de la madera seca difieren de las termitas subterráneas en que habitan únicamente en la madera, nunca penetran en el suelo y requieren poca humedad para su existencia. En la época del enjambramiento, los reproductores alados entran en la madera sana y seca, directamente desde el aire. Pueden trabajar en madera con un contenido de humedad tan bajo como 10 a 12%. Sus colonias son más pequeñas que las de los termites subterráneos, y no tienen una casta obrera permanente (Hunt y Garrat, 1962; Coulson y Witter, 1990).

3.2.3 Termitas de la madera húmeda

Las termitas de la madera húmeda penetran directamente en la madera desde el aire en la época de enjambrazón y por lo común no tienen contacto con el suelo. Pero a diferencia de los termites de madera seca necesitan gran cantidad de humedad para su existencia, y por esto limitan sus actividades en gran parte a la madera húmeda o en putrefacción. Sin embargo, pueden labrar sus galerías en las partes sanas de la madera

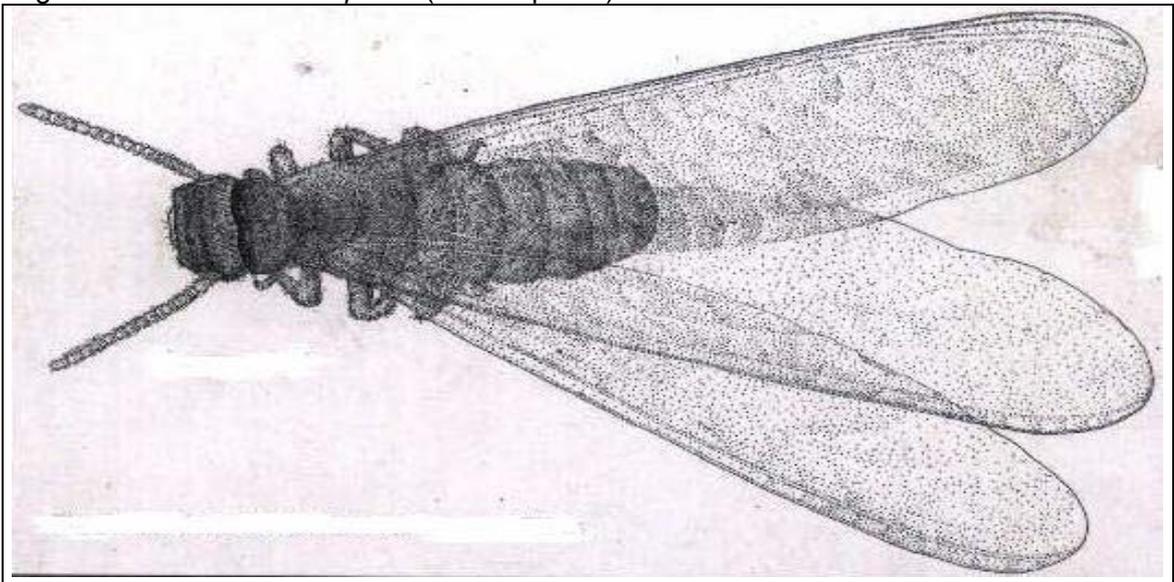
cuando no disponen de madera podrida. En ocasiones atacan madera relativamente seca (Hunt y Garrat, 1962; Rodríguez, 1998).

3.3 Castas presentes en una colonia de termitas

3.3.1 Reproductores

Los reproductores corresponden a machos y hembras de cuerpo oscuro, con 4 alas, conocidas como reyes y reinas (figura 2). Los reyes y reinas pueden reproducir todas las castas, incluyendo la de ellos mismos, las cuales en ciertas estaciones salen en enjambres desde los nidos en grandes cantidades apareciendo frecuentemente en o cerca de los edificios infestados, dando la primera señal de alarma e indicación de su presencia. Sus alas son largas, angostas, blanquizcas o semitransparentes, con muchas venas indistintas; y los dos pares son casi exactamente iguales en su tamaño y apariencia. Las alas se usan para un solo vuelo nupcial, después del cual se rompen cerca de la base (Metcalf y Flint, 1965; Cammousseight, 1997). Aunque el vuelo suele ser corto, el viento puede llevar a los alados a una distancia de varios kilómetros (Hunt y Garrat, 1962).

Figura 2. Adulto de *R. hesperus* (vista superior).



Fuente: Cammousseight, A. 1999.

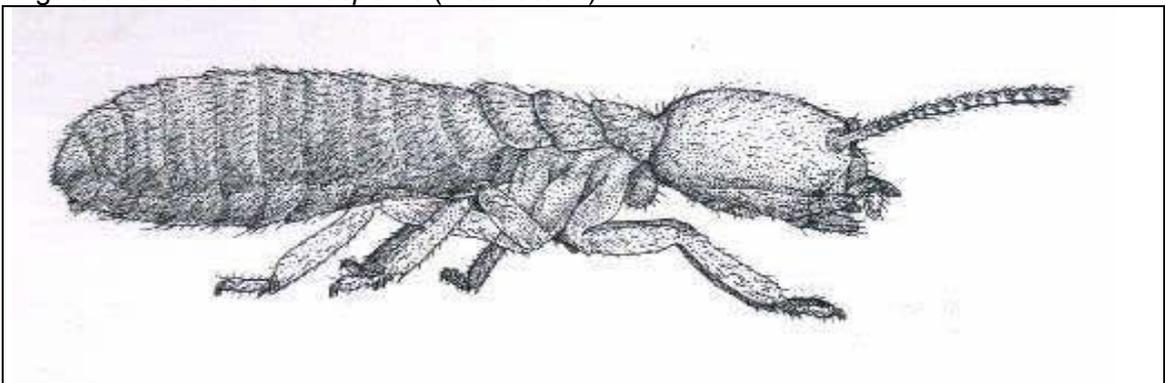
A causa de la depredación por aves y otros insectos, sólo unos cuantos reproductores (reyes y reinas) sobreviven y forman una nueva colonia (Coulson y Witter, 1990). Cammousseight (2000) explica que luego del vuelo y ya en tierra, se produce el corte de las alas y la formación de los tandems (contacto antenal de los machos con el extremo abdominal posterior de las hembras) y paseo nupcial, una vez concluida la etapa del cortejo la pareja real se dedica a construir una cavidad o copulario donde se encerrarán y amputarán, parcial y mutuamente las antenas, para por último copular y comenzar con la primera puesta.

Numerosas especies de termitas crean nuevas sociedades, utilizando individuos que en el curso del desarrollo alcanzan la madurez sexual sin perder su apariencia juvenil. Estos individuos son llamados neoténicos, y la sociedad creada a partir de ellos se reconoce como originada de esquejes.

3.3.2 Obreros

En las colonias de termitas, los obreros son la casta más numerosa. Son estériles, ápteros y ciegos, y sus cuerpos, de color claro, tienen algo menos de 6 mm de largo (figura 3). Aunque están provistos de quijadas poco desarrolladas, sus mandíbulas están adaptadas especialmente para arrancar fragmentos de madera, y esta casta es el agente de las destrucciones causadas por las especies subterráneas.

Figura 3. Obrero de *R. hesperus* (vista lateral).



Fuente: Cammousseight, A. 1999.

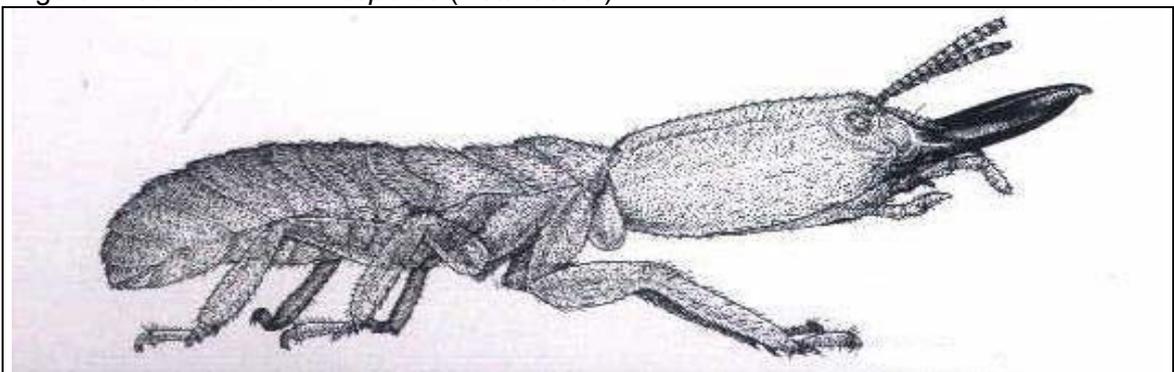
A los obreros se les asignan los trabajos de construcción y ampliación de los nidos y otros lugares que alberga la colonia, la recolección de alimentos, la vigilancia y la alimentación

de los adultos y los jóvenes y el cuidado de los diversos individuos de la colonia. En contraste con las especies subterráneas, las termitas de la madera seca y de la madera húmeda no tienen casta obrera especializada, y las ninfas no maduras realizan los diversos trabajos de la colonia, cumpliendo con las funciones del cuidado y alimentación de la colonia. Después de este período de servidumbre las ninfas maduras se hacen soldados o alados (Hunt y Garrat, 1962; Coulson y Witter, 1990).

3.3.3 Soldados

Los soldados son los encargados de la custodia de la colonia, son estériles, no tienen alas ni ojos funcionales, y su longitud varía de menos de 6 mm (termites subterráneos) a 9 – 12 mm (especie de madera seca) o incluso 18 mm (especie de madera húmeda). Su cabeza es grande y coloreada, sus mandíbulas son fuertes, están adaptadas para luchar, pero inútiles para excavar la madera (figura 4). Cuando las galerías de una colonia se abren voluntariamente al exterior a fin de expeler las píldoras fecales o dejar salir a los alados, o cuando se rompe accidentalmente la coraza protectora de madera, los soldados guardan las entradas contra sus enemigos naturales, las verdaderas hormigas, y los termites de otras colonias. Estos bloquean las pequeñas aberturas con sus duras cabezas y tratan de matar a los invasores con sus mandíbulas (soldados mandibulados) o descargan una sustancia pegajosa (soldados nasutiformes) para detener el ataque de los insectos incursores (Hunt y Garrat, 1962; Rodríguez, 1998).

Figura 4. Soldado de *R. hesperus* (vista lateral).



Fuente: Cammousseight, A. 1999.

Las termitas del género *Coptotermes* se caracterizan, entre otros, por el gran desarrollo que presenta la glándula frontal, que, por medio de un prominente tubo, se abre al exterior

en la parte dorsal anterior de la cabeza. Los soldados utilizan la producción de secreción lechosa de dicha glándula para atacar a los invasores (Cammousseight, 1997).

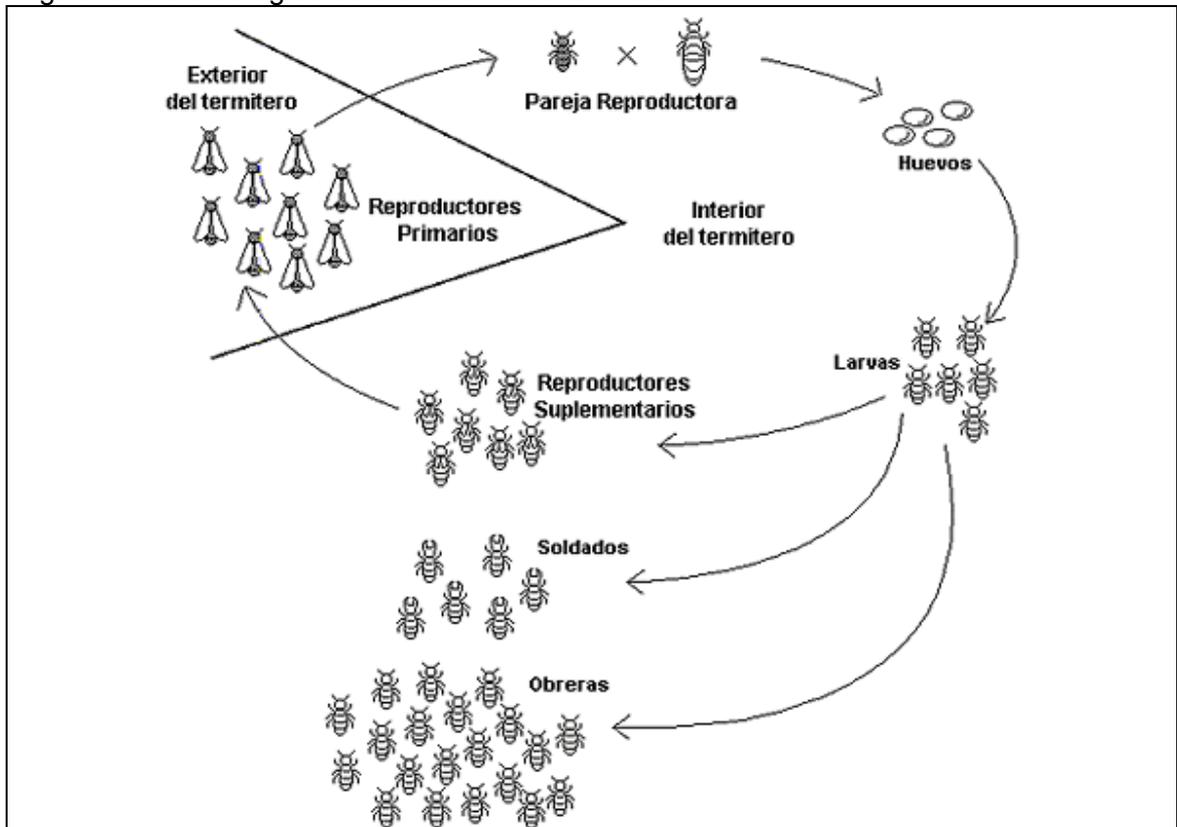
3.4 Ciclo biológico y alimentación de una colonia de termitas

3.4.1 Ciclo biológico de una colonia de termitas

En las primeras fases del desarrollo de una colonia de termitas (figura 5), los reproductores sexualmente maduros consisten en una pareja de rey y reina. Durante el primer año de su vida reproductiva, la reina pone pocos huevos, pero sus ovarios se van haciendo gradualmente mayores, al tiempo que se alarga y engruesa su cuerpo. Producto de esto se incrementa la capacidad ponedora de la reina, aumentando el número de individuos de la colonia. La capacidad de las termitas para engendrar reyes y reinas secundarios (neoténicos) hace posible que una colonia establecida continúe existiendo indefinidamente, mientras las provisiones de alimento y humedad sean suficientes y los insectos queden protegidos de hormigas y otros enemigos (Hunt y Garrat, 1962).

Desde la puesta del huevo hasta el nacimiento del individuo transcurre un número variable de días, correspondientes al desarrollo embrionario característico de cada especie. Al final de este período nace una ninfa I, que permanece inactiva y se nutre de alimentos estomodeales y proctodeales, luego de 7 – 14 días muda, dando origen a una ninfa II que se alimenta como la anterior, la cual muda al final de 15 a 20 días. Esta tercera ninfa trabaja, se nutre de madera, cuida a las ninfas menores y a los adultos y contribuye a agrandar el nido y luego de 28 – 35 días muda nuevamente. El individuo que emerge de esta tercera muda si presenta esbozos alares pertenecerá a la casta de los alados, si presenta abultamiento de la cabeza y prolongación de las mandíbulas, el individuo será un soldado y si no presenta modificaciones, tan solo aumento de tamaño, será parte de la casta de los obreros (Cammousseight, 1997).

Figura 5. Ciclo biológico de una colonia de termitas.



Fuente: Sitio Web N° 1.

La combinación de temperatura y humedad relativa juegan un importante rol en la supervivencia de las termitas subterráneas. De acuerdo a Smith y Rust (1993, a), la supervivencia de termitas subterráneas es mayor con temperaturas frescas (15,6° C a 21,1° C) y una humedad relativa alta (HR ≥ 99%). Las obreras de *R. hesperus* necesitan temperaturas frescas para largos períodos en busca de alimento (Smith y Rust, 1993, b). Las termitas subterráneas nunca se encuentran en zonas en donde la temperatura supera los 40° C (Smith y Rust, 1994).

Las pruebas de laboratorio con termitas subterráneas que alcanzan el nivel del agua han demostrado que *Reticulitermes* spp. no intenta escapar cuando es sumergida. Las termitas que son completamente sumergidas entre 11 y 14 horas entran en un período de reposo cuando se ven enfrentadas a excesivas cantidades de agua en su hábitat subterráneo (Forschler y Henderson, 1995).

Las experiencias realizadas por el Departamento de Ingeniería de la Madera de la Universidad de Chile con termitas pertenecientes a la casta de las obreras de *R. hesperus* que fueron sumergidas durante 10, 20 y 30 minutos en agua destilada a una temperatura de 25° C, permitieron comprobar que las termitas al ser ubicadas en el medio líquido entraban en un período de menor actividad, la que recuperaban luego de unos minutos de ser extraídas del agua.

3.4.2 Alimentación de una colonia de termitas

Según Cammoueight (2000), las termitas junto con alimentarse de celulosa, también practican la necrofagia, canibalismo y oofagia.

A los obreros se les asigna la alimentación de la colonia, el fin de este hábito servidor (trofolaxia) es proporcionar un intercambio de secreciones corporales, también sirve para mantener a las termitas libres del moho y micelio de hongos que pueden desarrollarse dentro de un termitero (Hunt y Garrat, 1962).

Los termitas se alimentan de la celulosa de la madera mediante un proceso de endosimbiosis en el que colaboran ciertos protozoos estomacales así como bacterias y hongos intestinales. Los primeros, desmenuzan mecánicamente la madera, mientras que los segundos, la disocian, proporcionando alimento asimilable al insecto. También asimilan la quitina de sus individuos muertos, que son rápidamente devorados (Rodríguez, 1998).

Los protozoarios y sus hospederos están unidos en una cadena de hechos bioquímicos que empieza con la digestión de la celulosa insoluble de la madera, y termina con su conversión en materia celular para los protozoarios y para la termita; así como dióxido de carbono e hidrógeno como productos de desecho. La termita consume la madera, rompiéndola en partículas muy pequeñas que pueden ser ingeridas por los protozoarios. Estos digieren la celulosa y las poliosas, transformándolas en azúcar, la cual fermentan, de ahí obtienen las moléculas necesarias para su funcionamiento y liberan ácido acético, el cual es absorbido y oxidado por la termita para cubrir sus necesidades de energía. La absorción del ácido producido por la fermentación, no solamente alimenta al insecto, sino

que repercute en beneficio de los mismos protozoarios, ya que impide la acumulación de ácido que le es dañina (Hungate, 1975).

Las termitas consumen dos tipos de alimentos, estomodeal que es secretado por las glándulas salivales y se mezcla con el contenido del buche, y el proctodeal que corresponde al contenido de la panza rectal, el que se debe diferenciar de los excrementos pese a que se eliminan por la misma vía (Camousseight, 1997).

Las termitas realizan una búsqueda errática de alimento, este comportamiento ha sido observado en la crianza en laboratorio y en terreno (Cabrera, 1999).

3.5 Equipos de detección de daño ocasionado por termitas

La detección de daños en la madera, se realiza normalmente de forma visual apreciándose distintas señales tales como: orificios de salida de insectos, grietas, cambios de coloración, presencia de micelios de hongos, etc. Este método se complementa con el empleo de sistemas mínimamente destructivos, divididos en Sistemas Tradicionales y Sistemas Sofisticados (Rodríguez, 1998).

3.5.1 Sistemas Tradicionales

- Sistemas de Percusión: la madera es golpeada con un elemento sólido, como por ejemplo, un martillo y dependiendo de si el sonido es claro y macizo o si es hueco se podrá tener una idea del estado sanitario de la madera inspeccionada.
- Sistemas de Punción: se realiza utilizando taladros, que permiten determinar la presencia de daños internos ya sea por el tipo de aserrín extraído o la fuerza aplicada al taladrar.

3.5.2 Sistemas Sofisticados

- Aparatos portátiles de medición de la velocidad de propagación de ondas de esfuerzo a través de la madera: se basa en que la velocidad de propagación en madera sana difiere de la que se observa en madera con presencia de daños.

- Aparatos detectores de sonidos emitidos por insectos xilófagos presentes en el interior de la madera: los insectos xilófagos emiten vibraciones y ruidos que pueden ser amplificados, filtrados y transformados en una secuencia digital que puede ser registrada y comparada con la señal recibida con un patrón correspondiente a un determinado insecto. De esta manera se puede determinar de qué tipo de insecto se trata y también su área de actuación.

- Aparatos de termografía axial computarizada (T.A.C.): se basan en la reconstrucción por computador de planos tomográficos de la madera, en los que quedan en evidencia las zonas atacadas.

3.6 Tratamientos Existentes

Camousseight (2000) indica que cualquier medida de control debe implicar el ataque al nido, a pesar de ser difíciles de alcanzar dadas sus particulares ubicaciones, unos al interior de la madera y sin contacto con el exterior, y los otros subterráneos. En el caso de los nidos pertenecientes a termitas subterráneas la situación es muy compleja y se requiere diferenciar el tipo de control que se desea efectuar:

a) Control preventivo: debe considerar entre otros, estudio del terreno antes de construir, utilización de barreras físicas o químicas que impidan el acceso a la construcción que consideren el posible ataque de termitas, utilización de madera especialmente tratada.

b) Control paliativo: que elimine exteriormente y por un corto período el problema, lo que se puede conseguir con cualquier producto químico expendido en supermercados, considerada la vulnerabilidad de los insectos como consecuencia de sus frágiles tegumentos. En este caso el nido resulta intacto.

c) Control curativo: a través de la inundación del subsuelo y por ende el nido con los productos tóxicos o que dichos productos sean transportados hasta el interior por los propios individuos.

De acuerdo a Lewis *et al.* (2)¹ los termiticidas más comúnmente usados (chlordane, aldrin, dieldrin y heptachlor) fueron voluntariamente retirados por la Agencia de Protección del medio Ambiente de los Estados Unidos por la preocupación pública originada debido a su permanencia y efectos tóxicos en nuestro medio ambiente. Nuevos termiticidas han sido desarrollados como reemplazantes de los hidrocarburos clorados, pero su desempeño y eficacia ha sido menor, se estima que el 30% de los tratamientos fallan dentro de un año. El costo por daños y control se han triplicado en algunas zonas del sureste de los Estados Unidos desde que el uso del producto chlordane ha sido discontinuado. Los hidrocarburos clorados han sido ensayados en terreno y su eficacia es mayor a los 40 años, los nuevos termiticidas se consideran efectivos si previenen el daño solamente por 5 años.

Actualmente se utiliza Hexaflumorón a través de cebos, éstos consisten en celulosa con el producto tóxico incorporado. Las obreras se alimentan del cebo y de esta manera lo transportan al interior de las colonias donde debido al intercambio de alimento (trofolaxia) efectuado por las obreras, el insecticida es distribuido en el nido. El tóxico actúa como un inhibidor de la síntesis de quitina, que forma parte del exoesqueleto de los insectos, por lo que al realizar las siguientes mudas no podrán generarlo y como consecuencia no podrán sobrevivir.

3.7 Problemas generados por las termitas

3.7.1 Problemas a nivel mundial

Hace muchos años que las termitas subterráneas afectan a los países europeos y de Norteamérica. La experiencia demuestra que los daños causados por los insectos provocan millonarias pérdidas año tras año, por lo que se han realizado múltiples estudios para lograr su control. Es imposible una valoración exacta de los daños causados por los termites, pero solamente los daños ocasionados en edificios suman millones de dólares anualmente. Ya en 1926 se comunicó que el 80% de las casas particulares de Nueva Orleans y el 50% de los edificios comerciales de Pasadena (California) habían sido dañados por estos insectos (Hunt y Garrat, 1962).

¹ Fuente: Sitio Web N° 2

Las termitas rara vez dañan o matan a los árboles vivos, pero pueden ser muy destructoras en edificios, postes telefónicos, cercas y otros productos de madera, particularmente en los trópicos y en el sur de los Estados Unidos. El daño y costo del control de termitas en los Estados Unidos se estima entre 500 y 1.000 millones de dólares al año (Coulson y Witter, 1990). Las termitas de Formosa, las más voraces y agresivas de las 2.400 especies conocidas son capaces de abrirse paso masticando las vigas y la madera nueve veces más rápido que sus parientes más pacíficos. Durante mucho tiempo habitaron principalmente en Lousiana, pero avanzan destruyendo propiedades en 13 estados de los Estados Unidos, desde Virginia hasta California.

Las especies del género *Reticulitermes* (Isoptera: Rhinotermitidae) son la mayor plaga que se encuentra infestando estructuras de madera en los Estados Unidos y otros países. Se ha estimado que se gastan más de \$1,5 billones de dólares anualmente para el control de las termitas en dicho país, de este monto el 80% se destina al control de la termita subterránea. Una revisión de los daños ocasionados por las termitas revela que las cinco principales especies presentes en los Estados Unidos corresponden a *Reticulitermes flavipes* (Collar), *Reticulitermes virginicus* (Banks), *R. hesperus*, *Reticulitermes tibialis* (Banks) y *Coptotermes formosanus* (Shiraki). El 90% de empresas dedicadas al control de la termita subterránea involucra a estas cinco especies (Austin et al., 2002).

3.7.2 Problemas a nivel nacional

La familia *Kalotermitidae* sería la más numerosa, con las especies: *Cryptotermes brevis* (Walker), presente en Arica, Iquique, Antofagasta y Archipiélago de Juan Fernández, originaria de Jamaica y actualmente cosmopolita; *Kalotermes gracilignathus* Emerson, descrita como de Juan Fernández; *Neotermes chilensis* (Blanchard), descrita como del país. La familia *Termopsidae* (Subfamilia *Porotermitinae*) está representada por la especie endémica de esta región, *Porotermes quadricollis* (Rambur), característica de la zona sur del país y conocida como “termes de la madera húmeda”. La familia *Rhinotermitidae* (Subfamilia *Heterotermitinae*) se encuentra presente en el país con la especie *R. hesperus*, originaria de los Estados Unidos de Norteamérica e introducida en la década de los sesenta en Santiago (Cammousseight, 2000).

De acuerdo a Cabrera (1999), la especie de termita subterránea presente en Chile es *R. hesperus*, según la identificación realizada por el Museo Nacional de Historia Natural. La teoría más probable es que habría ingresado al país mediante madera de embalaje proveniente de Estados Unidos. Actualmente se ha verificado su presencia en Santiago y Valparaíso. Producto de una prospección que duró 13 meses, entre mayo de 1997 y junio de 1998, se detectaron 80 focos de infestación en 29 comunas, en la figura 6 se puede apreciar un mapa de la Ciudad de Santiago con los focos identificados. Luego de 6 años del estudio en terreno efectuado por INFOR e INTEC, y considerando la categoría de plaga urbana que ha alcanzado en nuestro país la termita subterránea, el número de focos como de comunas afectadas se deben haber visto incrementados, similar situación debe ocurrir con el número de regiones afectadas. A pesar de lo anterior no se han observado políticas claras por parte del gobierno para efectuar un debido control y una adecuada educación a la población.

Respecto a las especies de madera en las que se verificó ataque de *R. hesperus* se encuentran: pinos insigne y oregón, álamo, roble, raulí, eucalipto, acacia, tepa, abedul y otras especies ornamentales como arce, manzano, ciruelo, damasco y palto.

Debido a que no toda la comunidad puede acceder a tratamientos de control adecuados, ya que un tratamiento de suelo puede variar entre \$300.000 a \$2.000.000, es necesario un apoyo gubernamental de manera de enfrentar este grave problema que afecta a nuestro país.

Figura 7. Piso atacado por termitas subterráneas.



Como ya se mencionó, los sectores medios y altos de nuestra sociedad no se encuentran libres de este problema, sin embargo, en estos sectores los ataques se producen con una menor velocidad y su disposición a realizar la denuncia respectiva es menor ya que esto implica una disminución en la plusvalía de la propiedad.

En estos momentos las municipalidades de la Región Metropolitana han sido quienes se han visto en la obligación de tomar medidas preventivas tales como: entrega de folletos de difusión en lo que respecta a educación medioambiental, registro de denuncias y en alguna de ellas se entregan servicios de fumigación a bajo costo, lo que no asegura de ninguna manera la eliminación del problema.

3.8 Ondas Mecánicas

Suponiendo un medio compuesto de un gran número de partículas, cada una de ellas unida o acoplada a sus vecinas por una sustancia elástica, si uno de los extremos del medio se perturba o se desplaza de algún modo, el desplazamiento no tendrá lugar inmediatamente en todas las restantes partes del medio. El desplazamiento inicial originará una fuerza elástica en la sustancia próxima a él; entonces la próxima partícula se desplazará, después lo hará la inmediata, y así sucesivamente. En otras palabras, el desplazamiento se propagará a lo largo del medio con una velocidad determinada (Sears y Zemansky, 1957). Luego una onda corresponde a una perturbación en un medio, que una vez iniciada, se propaga por sí misma en el medio, moviéndose en el espacio y en el tiempo.

De lo anterior, se puede afirmar que las ondas mecánicas, son aquellas que requieren un medio para propagarse, no pudiendo hacerlo en el vacío (son las que se propagan en una cuerda, en la superficie del agua, en el aire, etc).

Las ondas mecánicas requieren:

- a) una fuente de perturbación
- b) un medio para propagarse
- c) cierta conexión física por medio de la cual partes adyacentes del medio puedan afectarse entre sí.

Las ondas viajan a una rapidez específica, la cual depende de las propiedades del medio perturbado. Las ondas sonoras viajan por el aire a temperatura ambiente a una rapidez aproximadas de 343 m / s, en tanto que la rapidez del sonido en casi todos los sólidos es mayor (Serway y Beschner, 1997).

3.8.1 Variables que caracterizan a una onda mecánica

Las ondas mecánicas se pueden caracterizar a través de los siguientes parámetros:

a) Período (T): es el tiempo en que cada partícula efectúa una oscilación completa.

b) Frecuencia (f): es el número de ciclos u oscilaciones efectuadas en la unidad de tiempo. Se puede definir por el número de ciclos que se completan en la unidad de tiempo. La frecuencia se mide en Hertz (Hz), un fenómeno tiene la frecuencia de 1 Hz cuando se cumple un ciclo completo en un segundo.

c) Longitud de onda (λ): corresponde a la distancia en que se propaga la onda durante un período.

d) Amplitud de onda (A): corresponde al mayor valor que toma el parámetro que la describe (densidad, presión acústica, velocidad de vibración) a partir de su valor de equilibrio. Por ejemplo si se trata de amplitud de desplazamiento, la amplitud de onda sería la mayor distancia que separa a la partícula de su posición de equilibrio.

e) Velocidad de fase (v): corresponde al producto entre la longitud de onda y la frecuencia.

f) Velocidad de partícula: es la velocidad de desplazamiento de una partícula individual a medida que la onda pasa a través de su posición. Depende de la cantidad de energía recibida en el origen, de la distancia entre la partícula y el origen, y de la energía que pierde durante la transmisión.

g) Naturaleza de las ondas: una onda consta de dos movimientos, uno es la vibración de las partículas y el otro es la propagación de la onda en sí. Si el movimiento de cada partícula es normal a la dirección de propagación es una onda transversal. Si la partícula se mueve en la misma dirección de propagación la onda se denomina longitudinal.

3.9 Ultrasonido

3.9.1 Generalidades

Para las ondas acústicas se establecen los siguientes rangos: infrasónico (1 – 16 Hz), sónico o audible (16 Hz – 20 kHz) y ultrasónico (20 kHz en adelante).

Las vibraciones acústicas, que incluyen a las ultrasónicas, viajan en forma de onda, de manera similar a como se propaga la luz, sin embargo, se diferencian en que la luz se puede propagar en el vacío y el ultrasonido requiere un medio elástico como un líquido o un sólido.

Se entiende por Ultrasonidos a una vibración de las partículas materiales cuya frecuencia es mayor al umbral superior de audición humana, que se ha establecido en 20 kHz. Las ondas ultrasónicas pueden ser producidas por las vibraciones elásticas de un cristal inducidas por resonancia al aplicar un campo eléctrico alterno (Almagro, 1967).

En algunos cristales la conversión de la energía mecánica en eléctrica se denomina “efecto piezoeléctrico directo” (descubierto por los hermanos Curie en 1890), y la producción de energía mecánica por la aplicación de un potencial eléctrico se llama “efecto piezoeléctrico inverso”. Los cristales que presentan el efecto piezoeléctrico son aquellos que no presentan un centro de simetría.

Se define como transductor a un dispositivo capaz de transformar la energía de una forma en otra (Beranek, 1961). Un transductor es capaz de transmitir o recibir una onda que se propaga a través de un medio. Posee una frecuencia propia de resonancia a la cual la energía transmitida es máxima. Cuando la onda ya ha sido transmitida al medio, no depende sólo de la vibración del transductor, sino que también de las condiciones físicas del medio y del ángulo con que la onda ultrasónica incide sobre la superficie de interfase (Almagro, 1967).

Las ondas ultrasónicas se producen al excitar un transductor mediante un pulso eléctrico de alta frecuencia generado por un dispositivo conocido como generador de pulso. Una señal eléctrica es transmitida desde el generador al transductor emisor, donde es transformada en pulso ultrasónico. Este pulso viaja a través de la muestra (probeta) y es recibida por el transductor receptor, y es transformada nuevamente en señal eléctrica, la cual es visualizada en un osciloscopio. Esto permite la medición del tiempo transcurrido entre la emisión y recepción del pulso ultrasónico, el que servirá para determinar la velocidad de propagación de la onda (Bucur, 1995).

Para evitar pérdidas de energía es importante que el transductor se encuentre en íntimo contacto con el medio sólido en donde se quiere propagar la onda ultrasónica, por lo que generalmente se aplica entre ellos una película de gel para que se reduzca al mínimo la presencia de aire y de esta manera lograr una mejor transmisión de la onda. Para que la medición sea exacta ambos transductores deben estar alineados y en forma paralela, lo cual es difícil de conseguir si se acoplan directamente sobre la madera.

Es frecuente utilizar el método por transmisión, utilizando dos transductores acoplados directamente al material, a través de una ligera capa de gel o bien el método de eco reflejado, el cual se basa en el estudio de un pulso que envía un transductor que a la vez hace de receptor de éste al reflejarse en la cara opuesta o en alguna singularidad (Bucur, 1995).

La utilización práctica de los ultrasonidos se encuentra en el aprovechamiento de la energía o bien en el análisis de la propagación de la onda, durante su permanencia en un medio (inspección física de metales, estudios de absorción).

Un importante parámetro asociado a la transmisión de ondas es la impedancia acústica, la que determina la resistencia que oponen los materiales al paso de una onda acústica. Cuando una onda acústica pasa de un medio a otro de diferentes impedancias parte de ella es reflejada y otra transmitida (Almagro, 1967).

Debido al pequeño valor de la longitud de una onda ultrasónica propagándose en la madera, por ejemplo para pino radiata con una densidad de $0,450 \text{ g/cm}^3$ a un 12% de contenido de humedad, la velocidad de propagación es del orden de 4.435 m/seg , lo que

implica que la longitud de onda es del orden de $4,4435 \times 10^{-3}$ m para una frecuencia de 1 MHz. Esta pequeña longitud de onda es apropiada para la investigación y determinación de las propiedades elásticas de la madera. La interacción de la propagación de la onda ultrasónica con la estructura de la madera entrega parámetros para la caracterización de las propiedades del material. La presencia de defectos en las muestras ensayadas origina cambios en estos parámetros los que indican su presencia (Karsulovic et al., 2000).

Una revisión de las publicaciones sobre la detección de actividad de agentes biológicos en madera sólida mediante técnicas acústicas revela que este método no ha sido muy utilizado (Bucur, 1995).

El ultrasonido puede modificar a la materia mediante dos mecanismos: el térmico y la cavitación. En el primer caso la absorción de la energía ultrasónica genera calor, en el segundo el fenómeno se caracteriza por el aumento de la presión y temperatura de burbujas o cavidades con gas y líquido.

3.9.2 Equipos ultrasónicos para aplicaciones médicas y ensayos no destructivos

3.9.2.1 Clasificación de los sistemas

Moreno (3)², indica que desde los inicios del sonar durante las guerras mundiales, las aplicaciones del ultrasonido han ampliado su espectro, particularmente en la industria y la medicina.

Entre los parámetros que clasifican tecnológicamente a un equipo de ultrasonido se encuentran:

a) Potencia: los equipos de ultrasonidos se clasifican según la potencia que generan. De aquí se originan equipos de alta potencia (dependiendo de si el ultrasonido cambia alguna propiedad del material) o baja potencia (es utilizado para la medición o diagnóstico).

² Fuente: Sitio Web N° 3

b) Frecuencia: existe una zona de baja frecuencia que se puede ubicar en el intervalo de 25 kHz hasta cercano a 1 MHz. El intervalo medio cubre de 1 a 10 MHz, donde se ubican los equipos médicos de diagnóstico y sobre los 10 MHz corresponde a lo que se denomina alta frecuencia.

c) Longitud de la onda: las aplicaciones médicas e industriales se dividen de acuerdo al tipo de señal que generan los transductores: continua o pulsada. En el caso de ondas pulsadas, las ondas pueden tener diferentes longitudes y de acuerdo al tipo de transductor que se utilice existen dos variantes las que pueden ser del tipo escalón (el transductor es excitado por una transición rápida de voltaje) o del tipo Radiofrecuencia (el transductor es forzado con unos ciclos de RF y se obliga a emitir a una frecuencia dada por el generador de pulso).

3.9.3 Aplicación del ultrasonido para el estudio de la madera

La técnica ultrasónica se ha utilizado para la caracterización de la madera mediante la determinación de sus constantes elásticas y la detección de defectos. Los métodos no destructivos de evaluación, son aquellos que no cambian las propiedades requeridas para el uso final de los materiales que son ensayados (Schad *et al.*, 1996).

Entre las aplicaciones del ultrasonido, muchos investigadores han examinado una variedad de parámetros ultrasónicos para detectar defectos en la madera. Estos estudios consideran madera en condiciones naturales, aplicaciones en procesamiento de imágenes y ensayos de muestras en laboratorio (Kabir *et al.*, 2000).

De acuerdo a León (1993) los primeros estudios se realizaron hace aproximadamente 40 años en Estados Unidos. Los estudios se relacionaban con las propiedades vibracionales de la madera a través de ondas generadas por esfuerzo mecánico. Los estudios se centraban en demostrar que los ensayos no destructivos permitían caracterizar mecánicamente al material en forma adecuada. Los ensayos se basaron en el análisis de defectos, influencia de la densidad, contenido de humedad y temperatura; no obstante los ensayos de clasificación de madera no fueron validados.

Los primeros estudios basados en el método ultrasónico, se centraron en la medición de velocidades de ondas acústicas y su relación con las propiedades elásticas del material, con el objeto de caracterizar a la madera. También se han desarrollado estudios en donde las variables investigadas son la densidad y el contenido de humedad (Carvajal, 2001).

El parámetro utilizado en aplicaciones ultrasónicas en la madera, dependerá de los objetivos de interés; si se trata de caracterizar al material se utiliza la velocidad de propagación, si se quiere detectar anomalías se emplea la absorción o atenuación ultrasónica. Sin embargo, ambos parámetros pueden dar una mayor información en la caracterización de singularidades en la madera (Marín, 1999).

La velocidad de ondas de esfuerzo en la dirección tangencial (perpendicular a la fibra) es aproximadamente de un 30% de la velocidad longitudinal (paralela a la fibra). La relación matemática entre el ángulo del grano y la velocidad puede ser expresada en la forma de una ecuación hiperbólica de segundo orden (Armstrong *et al.*, 1991).

Los métodos ultrasónicos han demostrado ser una herramienta muy útil para la caracterización mecánica de madera estructural. Este método tiene como ventaja la integración de parámetros esenciales como son la densidad y el módulo elástico de la madera (Sandoz, 1989).

La madera se comporta como un material anisotrópico con respecto al sonido, presentándose diferencias significativas en la velocidad de propagación de una onda ultrasónica en zonas de fibra inclinada. Dado que la orientación de fibra de la madera libre de defectos es por lo general paralela al eje longitudinal de la pieza, y que los defectos están comúnmente asociados a la presencia de fibra inclinada, de esto se tiene que la velocidad de propagación de la onda se mantiene relativamente constante en madera libre de defectos para una especie dada, pero varía significativamente a través de madera defectuosa. La propagación de la onda es afectada por la densidad y elasticidad del medio, lo cual es de especial importancia, dado que los defectos de la madera usualmente están asociados a variaciones de estos parámetros (Karsulovic *et al.*, 2000).

Para madera libre de defectos, Biernacki y Beall (1993), determinaron que el ángulo del anillo de crecimiento es el factor más importante en la variabilidad de la transmisión acústica y ultrasónica en la dirección perpendicular a la fibra.

Karsulovic et al. (2000), concluyeron que para madera clear el efecto del ángulo del anillo de crecimiento sobre la propagación de la onda ultrasónica corresponde al factor más importante de la variación de la transmisión de la velocidad del sonido en la dirección perpendicular a la fibra.

3.9.4 Efecto de la densidad y contenido de humedad de la madera en la propagación del ultrasonido

3.9.4.1 Efecto de la densidad

El tránsito de la onda ultrasónica se realiza a través del material de mayor rigidez dentro del medio donde ésta se propaga, que en el caso de la madera corresponde a la pared celular, por lo que si aumenta la proporción de ésta, la velocidad de propagación tiende a incrementarse.

Wilcox (1988) detectó pudrición en los estados iniciales del ataque, basándose en que la velocidad de propagación frente a la disminución de la densidad de la madera, presentaba un descenso en sus valores.

De acuerdo a Niemz et al. (1994), al aumentar la densidad de la madera se produce un aumento de la velocidad del ultrasonido a través de la madera. Los estudios en madera temprana y tardía indican que la velocidad es determinada por la zona más densa.

Mishiro (1996) se refiere al efecto de la densidad con respecto a la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas en la dirección longitudinal (paralela a la fibra), afirma que ésta se podría dividir en tres grupos:

- la velocidad ultrasónica tiende a incrementarse cuando la densidad aumenta
- la velocidad es independiente de la densidad
- la velocidad ultrasónica tiende a disminuir cuando la densidad aumenta.

Karsulovic et al. (2000) al detectar la presencia de nudos en madera de *P. radiata* determinaron que la velocidad de propagación en la dirección longitudinal tiende a incrementar sus valores cuando se aumenta la densidad, presentando una correlación lineal de $r = 0,64$, mientras que en las direcciones radial y tangencial, tienden a disminuir sus valores con incrementos en la densidad, con correlaciones de $r = -0,59$ y $r = -0,34$ respectivamente.

3.9.4.2 Efecto del contenido de humedad

El contenido de humedad (CH) en la madera representa a la relación que existe entre la cantidad de agua existente y la cantidad de material anhidro. Desde 0% a 30% de CH, el agua se encuentra químicamente unida a la madera mediante enlaces de hidrógeno. Cuando la madera se encuentra sobre el punto de saturación de las fibras, el agua se encuentra libre en las células de la madera, y su influencia en las propiedades de la madera son menos importantes (Sandoz, 1993).

Ensayos realizados por Sandoz (1993), determinaron que a medida que se incrementa el contenido de humedad en la madera, la velocidad con que se propagan las ondas ultrasónicas disminuye. Sin embargo, este decrecimiento es más notorio hasta el punto de saturación de las fibras, luego de este punto la velocidad disminuye pero con una pendiente más suave.

Mishiro (1995), determina que la velocidad de las ondas ultrasónicas a través de la madera se incrementa cuando el contenido de humedad promedio decrece en las direcciones radial y tangencial.

El promedio del contenido de humedad en el cual las velocidades ultrasónicas empiezan a incrementarse rápidamente es aproximadamente el punto de saturación de las fibras (32 %) (Mishiro, 1996).

Espejo (2002) determinó que el contenido de humedad influye sobre la velocidad de propagación de una onda ultrasónica disminuyendo su valor a medida que aumenta el contenido de humedad. Además concluye que la velocidad longitudinal es

aproximadamente tres veces la velocidad de la dirección radial y cuatro veces la velocidad de la dirección tangencial para un 12 % de contenido de humedad.

3.10 Cavitación en líquidos

La cavitación se refiere a la formación y colapso de las cavidades en un líquido en las que existe un alto vacío o se encuentran saturadas de vapor de dicho líquido (Shutilov, 1988).

La cavitación puede limitar la intensidad del sonido que puede ser propagada a través de un líquido, y puede también actuar como un poderoso agente capaz de producir efectos que son inaccesibles por otros medios (Hueter y Bolt, 1965).

Dentro de un volumen de agua aparece cavitación cuando por aplicación de un campo sonoro de alta intensidad se generan pequeñas masas de gas en forma de burbujas que oscilan de manera no lineal en una banda de frecuencias cercana a la de excitación. El tamaño de las burbujas producidas de esta manera depende de la frecuencia y de la intensidad del campo acústico aplicado.

Si un líquido es expuesto a intensas vibraciones sonoras, se pueden observar pequeñas burbujas de gas que se forman en el interior del líquido. El efecto de los gases disueltos depende de la presión y de la temperatura del líquido. El gas se puede presentar en la forma de moléculas ubicadas en sitios vacantes de la estructura del líquido o éste puede estar contenido en burbujas de dimensiones microscópicas. Estas burbujas constituyen puntos débiles dentro del líquido, las fuerzas de tensión superficial son determinadas por la cantidad de burbujas presentes (Shutilov, 1988).

Si la amplitud de la presión sonora es incrementada, se forman flujos nebulosos. Estos consisten de burbujas pequeñas que desaparecen gradualmente cuando el sonido es detenido (el generador es apagado). Mientras más pequeña es la burbuja, mayor es su presión interna, a causa del efecto de la tensión superficial (Hueter y Bolt, 1965).

La cavitación es independiente de la frecuencia empleada cuando se trabaja con presiones acústicas menores a la presión atmosférica.

3.11 Efecto del ultrasonido en los seres vivos

Existen evidencias de que las ondas ultrasónicas pueden cambiar la razón de síntesis de macromoléculas y causar cambios ultraestructurales dentro de la célula (Almagro, 1967).

La respuesta de los insectos y larvas al ultrasonido está fuertemente influenciada por la presencia de microscópicos poros de aire.

Extensos trabajos se han desarrollado sobre la acción del ultrasonido sobre sistemas químicos y en largas moléculas de interés biológico. Los efectos a este nivel son de tres tipos: absorción pasiva de la energía ultrasónica, degradación mecánica de las cadenas y efectos químicos debidos a la cavitación causada por acción de los radicales libres (WHO, 1982).

Algunos insectos mueren en poco tiempo por efecto del ultrasonido y los organismos embrionarios presentan desarrollo anormal. Ahora si los órganos sobre los que se quiere actuar se encuentran sumergidos, los efectos producidos son más violentos debido al aumento de la superficie expuesta.

Muchos estudios se han realizado en huevos, larvas y estados prepupales en *Drosophila melanogaster* y se ha observado una variedad de desarrollos anormales en moscas adultas. Todos los insectos contienen microscópicos cuerpos gaseosos estables a través de su ciclo de vida. Estos cuerpos oscilan bajo la influencia del ultrasonido y genera flujos en tejidos blandos adyacentes que pueden ser responsables de los efectos observados (WHO, 1982).

En ratones los trabajos que se han llevado a cabo para estudiar los efectos sobre el desarrollo se han centrado en el uso de altas frecuencias ultrasónicas y los resultados observados se han producido por el calentamiento de los tejidos debido a la exposición a que se ven sometidos (WHO, 1982)

4. MATERIALES Y METODO

4.1 Materiales y equipos

4.1.1 Materiales

Material biológico

Se utilizaron termitas subterráneas colectadas de colonias pertenecientes al termitero del Departamento de Ingeniería de la Madera de la Universidad de Chile, las que fueron mantenidas a una temperatura entre 20° C a 25° C y a una humedad relativa de aproximadamente 70%.

También se emplearon probetas provenientes de piezas de madera de *P. radiata* secada en horno a un contenido de humedad de 12%, provenientes de aserradero (primera etapa del estudio).

A continuación se mencionan otros materiales y accesorios empleados:

- Tubos de vidrio abierto en ambos extremos, uno de los cuales debía estar esmerilado, con diámetro interior de 25 mm y altura de 110 mm.
- Adhesivo no comestible por las termitas y no tóxico (adhesivo epóxico).
- Pintura de aluminio para sellar los extremos de las probetas (sección transversal).
- Arena fina de cuarzo blanco, silicato de aluminio, de hierro y de magnesio hidratado, espuma de poliuretano, agua destilada.
- Vasos precipitados.
- Termómetro.
- Cronómetro.
- Pinceles para la manipulación de las termitas.
- Cápsulas Petri.
- Gel ultrasónico.
- Agua destilada (como medio de acople).

4.1.2 Equipos y accesorios

- Equipo generador de pulso ultrasónico marca PANAMETRICS Ultrasonic Pulser / Receiver modelo 5058 PR (figura 8).
- Equipo detector de fallas ultrasónico EPOCH III modelo (figura 8).
- Transductores piezoeléctricos de contacto marca PANAMETRICS de onda longitudinal (100 kHz., 500 kHz., 1000 kHz.), que poseen 1.125" de diámetro, modelo Videoscan P/N V194 – RB.
- Generador Ultrasónico de Potencia 500 W. Modelo LC. – 9601 (figura 9).
- ENI (Power systems) . Model EMB 2K 250 Power Meter (Potentiometer) (figura 10).
- Generador Ultrasónico de Potencia 500 W. Unidad de adaptación. Modelo LC. – 9301(figura 11).
- Transductores de potencia tipo bocina escalonada de 11 y 20 kHz.
- Termostato JUMO Modelo B2320002, control temperatura en ambientes con polvo y humedad. Rango de temperatura: 0 – 50 ° C.
- Higrómetro JUMO Modelo A6080001, Control de humedad ambiental. Rango de humedad: 30 – 100%. Rango de temperatura: 0 – 50° C.
- Balanza digital EXCELL Modelo BH – 300. Capacidad 300 grs. Precisión 0,01 grs.
- Calefactor
- Humidificador

Figura 8. Equipo generador de pulso ultrasónico PANAMETRICS Ultrasonic Pulser / Receiver modelo 5058 PR (A) y Equipo detector de fallas ultrasónico EPOCH III PANAMETRIC modelo 2300 (B).



Figura 9. Generador Ultrasónico de Potencia 500 W. Modelo LC. – 9601.



Figura 10. ENI Power Meter (Potentiometer). Model EMB 2K 250.



Figura 11. Generador Ultrasónico de Potencia 500 W. Unidad de adaptación. Modelo LC-9301.



4.2 Método

El trabajo experimental se desarrolló en dos etapas. La primera etapa se llevó a cabo en el Departamento de Ingeniería de la Madera de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Chile. La segunda etapa se efectuó en el Laboratorio de Ultrasonidos del Departamento de Física de la Universidad de Santiago de Chile. Las dos etapas son descritas a continuación.

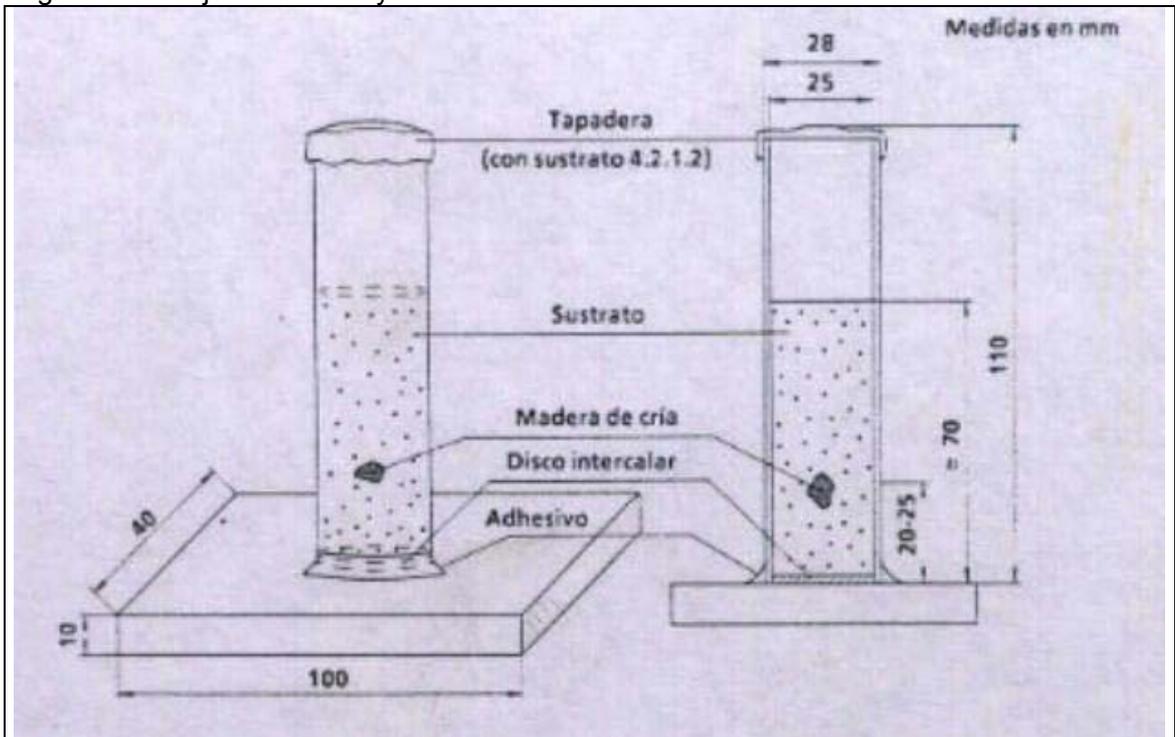
4.2.1 Influencia de las ondas mecánicas sobre termitas en proceso de ataque a madera de *P. radiata*

Se utilizó la Norma Europea EN 118 “Determinación de la eficacia preventiva contra *Reticulitermes santonesis* de Feytaud” con algunas modificaciones; en efecto en lugar de una película protectora como especifica la norma se aplicó un campo ultrasónico como barrera, empleándose las siguientes frecuencias 100, 500 y 1000 kHz. La variable respuesta a analizar correspondió a la eliminación, inhibición a la alimentación o incapacitación de las termitas durante su proceso de ataque a madera de *P. radiata*.

Las probetas se confeccionaron con una sección transversal de 10 mm x 40 mm y 100 mm de longitud, las que fueron selladas en sus extremos con pintura de aluminio para evitar variaciones en su contenido de humedad. Luego, se procedió a fijar los tubos en el centro de las probetas por medio del adhesivo epóxico. Las probetas junto con el tubo adherido se pueden apreciar en la figura 12.

Una vez que fueron obtenidas las probetas, se ingresaron a una cámara de clima para uniformar sus contenidos de humedad. Las condiciones en las que se programó la cámara fueron 40° C y 69% de humedad relativa, para lograr un contenido de humedad de equilibrio del 12%.

Figura 12. Conjunto de ensayo.



Fuente: Norma Europea EN 118.

La densidad de las probetas se obtuvo a partir de mediciones de volumen realizadas mediante pie de metro y del peso obtenido mediante una balanza digital. El valor promedio de las densidades fue de 613 Kg/m^3 , para un contenido de humedad de las probetas de un 12%.

Las termitas se obtuvieron del termitero perteneciente al Departamento de Ingeniería de la Universidad de Chile, recolectándose termitas pertenecientes a la casta de los obreros de *Reticulitermes hesperus* Banks. Se seleccionaron grupos de 250 termitas eliminando insectos en período de muda y aquellos que presentaban una baja actividad.

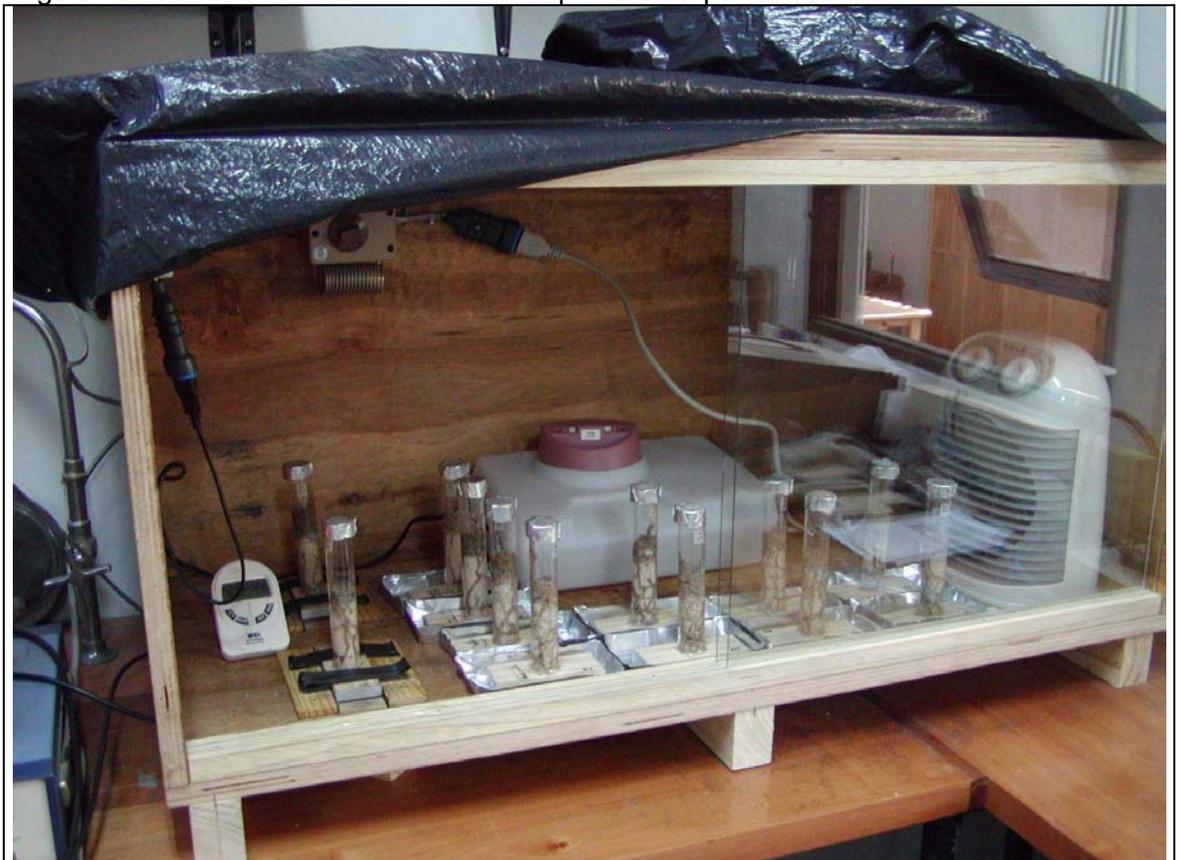
A continuación se procedió a la instalación de las termitas, para lo cual se agregó arena en los tubos alcanzando una altura de 70 mm desde la base del tubo. La arena fue previamente humedecida con agua destilada en proporción de un volumen de agua por cuatro de arena. A la distancia de un cm de la base del tubo se agregó 0,2 grs de madera de cría, la que sirvió de alimento para la colonia durante los primeros días del ensayo. Luego las termitas se introdujeron en los tubos. Se procedió a pesar el conjunto de ensayo (probeta, tubo, arena humedecida, madera de cría y termitas) de manera de

registrar el peso, ya que éste debe mantenerse constante durante la duración del ensayo. De esta forma las probetas fueron controladas visual y gravimétricamente todos los días, agregando agua destilada para mantener la humedad inicial. Diariamente se registró el peso que presentaba el conjunto y con el que quedaba luego de la adición de agua destilada.

Cada conjunto de ensayo (probeta y tubo) se instaló sobre una bandeja de aluminio, a cada tubo se le colocó una tapa del mismo material, la que tenía adherida una rejilla metálica para permitir el ingreso de aire y evitar el escape de los insectos.

Luego de esto el set de ensayo fue llevado a una cámara de clima especialmente diseñada en el Laboratorio de Ultrasonidos del Departamento de Ingeniería de la Madera de la Universidad de Chile. La cámara se puede apreciar en la figura 13.

Figura 13. Cámara de clima utilizada en la primera etapa del estudio.



Después de siete días en que las termitas se adecuaron a sus nuevas condiciones, las probetas comenzaron a ser ensayadas por dos horas diarias con las frecuencias establecidas, realizándose dos repeticiones para cada frecuencia. Tres probetas sirvieron de testigos para el análisis del ataque de las termitas sobre la madera a las que no se les aplicó ultrasonido. Se ingresaron además 3 probetas para controlar el contenido de humedad final de la madera después del ensayo.

La evaluación del grado de ataque se efectuó según lo establecido por la Norma Europea EN 118 que se presenta el cuadro 1. Es necesario destacar que la norma está concebida para la determinación de la eficacia de recubrimientos como protectores superficiales frente al ataque de termitas subterráneas y que los ensayos de esta naturaleza tienen una duración de 2 meses.

Cuadro 1. Clasificación del ataque según intensidad del daño.

Grado de ataque	Descripción
0	Ningún ataque
1	Tentativa de ataque: arañazos o roeduras superficiales cuya profundidad no se puede medir.
2	Ataque ligero: ataque superficial (menos de 1 mm) y limitado en extensión a 1/4 de la superficie expuesta como máximo, o una perforación única de profundidad inferior a 3 mm, sin que exista otra tasa de ataque.
3	Ataque medio: ataque superficial (menos de 1 mm) que se extiende a más de 1/4 de la superficie expuesta o erosión (de 1 a 3 mm) sobre una superficie inferior o igual a 1/4 de la expuesta o perforaciones puntuales superiores a 3 mm, pero que no se extiendan en cavernas o no atraviesen.
4	Ataque fuerte: erosión sobre más de 1/4 de la superficie expuesta o ataque penetrante superior a 3 mm extendiéndose en cavernas en el interior de la probeta o sin extenderse en cavernas, pero atravesándola.

Fuente: Norma Europea EN 118, 1992.

En el caso de la experiencia efectuada, ésta tuvo una duración de 1 mes y dentro de éste período se completaron 20 horas de aplicación de ultrasonido en tiempo acumulado, luego del cual se llevó a cabo un análisis cualitativo de los resultados obtenidos. La aplicación por intervalos de tiempo y su acumulación durante el mes se debe a una limitación física de los equipos, la que se traduce en un calentamiento de los transductores.

4.2.2 Cavitación en agua

En esta etapa la variable respuesta analizada fue la mortalidad de las termitas bajo la acción directa del ultrasonido por efecto de cavitación. Para efectuar la experiencia se utilizaron transductores de potencia con una frecuencia de resonancia de 11 kHz y 20 kHz. Como medio de acople se utilizó agua destilada en que las termitas fueron sumergidas e irradiadas con ultrasonido.

Para cada repetición se seleccionaban 2 grupos de 10 termitas pertenecientes a la casta de las obreras. Cada grupo fue ubicado en vasos de precipitados con agua destilada. Uno de los grupos sirvió como testigo, en el otro vaso se instaló el transductor y se procedió a la aplicación del ultrasonido. En la figura 14 se aprecia a las termitas en el vaso precipitado en contacto con el transductor de potencia.

Figura 14. Termitas en contacto con el transductor de potencia.



En la figura 15 se aprecia a las termitas que sirvieron de testigo, inmersas en agua destilada a temperatura ambiental.

Figura 15. Termitas testigos inmersas en agua destilada.



Cada frecuencia se ensayó con tres potencias y a su vez cada potencia se ensayó con tres tiempos. Los resultados obtenidos en los ensayos de cavitación se examinaron mediante un análisis de varianza, para el cual se utilizó un diseño trifactorial de efectos fijos con tres repeticiones.

Los factores analizados fueron Frecuencia (A), Potencia (B) y Tiempos (C). Determinadas las diferencias de medias, se realizó una prueba de intervalos Duncan para establecer las diferencias significativas en las medias de los factores en que sus niveles fuesen superiores a dos.

5. RESULTADOS

5.1 Influencia de las ondas mecánicas sobre termitas en proceso de ataque a madera de *P. radiata*

En esta etapa del estudio se analizaron los efectos de las ondas mecánicas en las termitas en proceso de ataque en madera de *P. radiata*, determinándose el porcentaje de supervivencia de los individuos en forma cuantitativa y se analizó cualitativamente el grado de ataque efectuado por las termitas sobre las probetas.

En el cuadro 2 se presenta la supervivencia promedio de las termitas para las distintas frecuencias ensayadas como para las probetas testigos.

Cuadro 2. Supervivencia promedio de las termitas para cada frecuencia y testigos.

Tratamientos [kHz]	Supervivencia	
	N° de Individuos	%
100	142	56,8
500	154	61,6
1000	86	34,4
0 (Testigos)	135	54,0

En el cuadro 3 se presenta el grado de ataque promedio que sufrieron las probetas luego de ser desmontados los conjuntos de ensayo.

Cuadro 3. Grado de ataque promedio sufrido por las probetas según Norma EN 118.

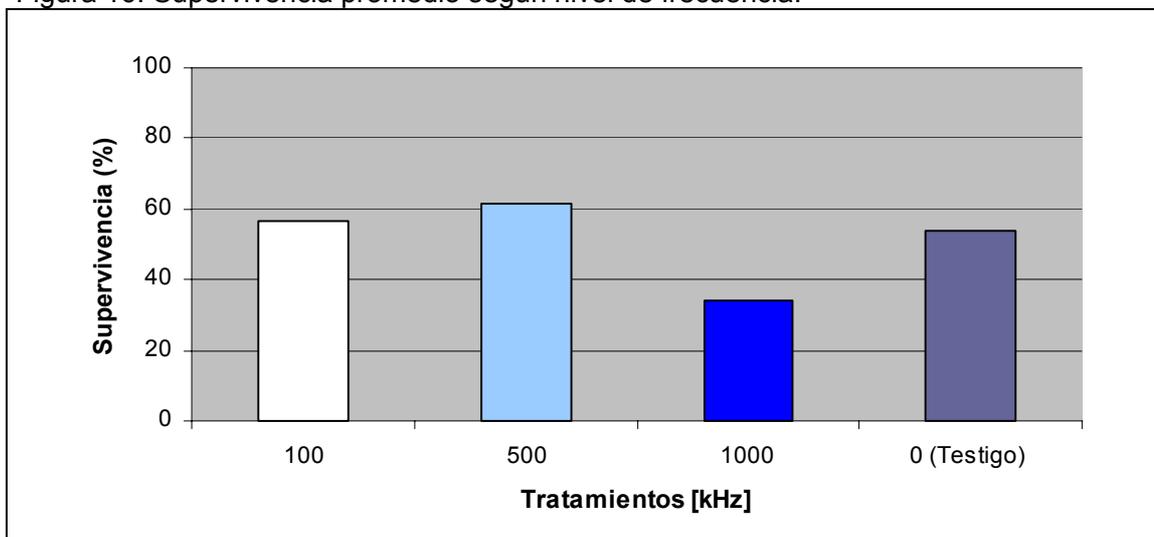
Probeta	Grado de ataque *
100 kHz	4
500 kHz	3
1000 kHz	4
Testigos	4

* 3 = medio; 4 = fuerte

La Norma Europea EN 118 “Determinación de la eficacia preventiva contra *Reticulitermes santonesis* de Feytaud” fija como válidos los ensayos en los que 2 de 3 testigos alcanzan una supervivencia mayor a un 50% de sus individuos, lo que en este ensayo de laboratorio se logró debido al riguroso control a que fueron sometidas las unidades de ensayo y las condiciones ambientales.

Las termitas presentaron una supervivencia promedio mayor al 50% en los ensayos con 100 y 500 kHz, a diferencia de las termitas ensayadas con la frecuencia de 1000 kHz en las que la supervivencia fue de un 34%. Esto se puede apreciar gráficamente en la figura 16. Sin embargo; la menor supervivencia obtenida con esta frecuencia, no se ve reflejada en el grado de ataque producido por los insectos durante el período de duración del ensayo, como se puede apreciar en los cuadros 2 y 3.

Figura 16. Supervivencia promedio según nivel de frecuencia.



En las figuras 17, 18 y 19 se presentan fotografías de las probetas en base a las cuales se determinó el grado de ataque alcanzado en ellas. En las figuras se aprecia el grado de ataque que sufrieron las probetas, se observa erosión sobre $\frac{1}{4}$ de la superficie expuesta o ataque penetrante superior a 3 mm extendiéndose en cavernas en el interior de la probeta o sin extenderse en cavernas pero atravesándola.

Figura 17. Probetas ensayadas con 100 kHz y probetas testigo.

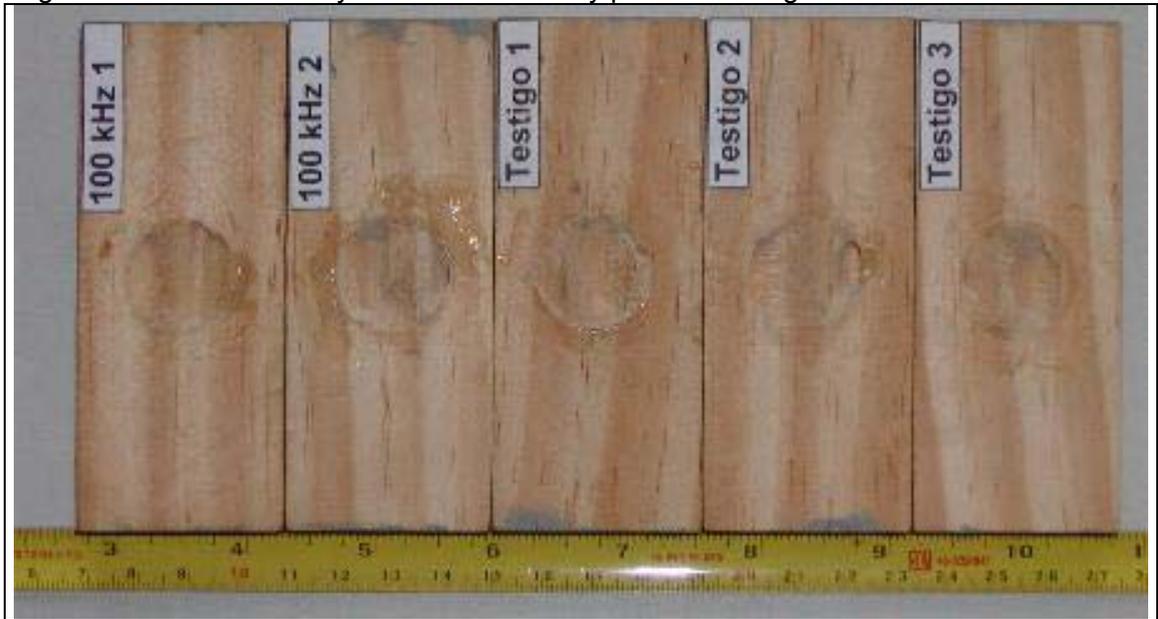


Figura 18. Probetas ensayadas con 500 kHz y probetas testigo.

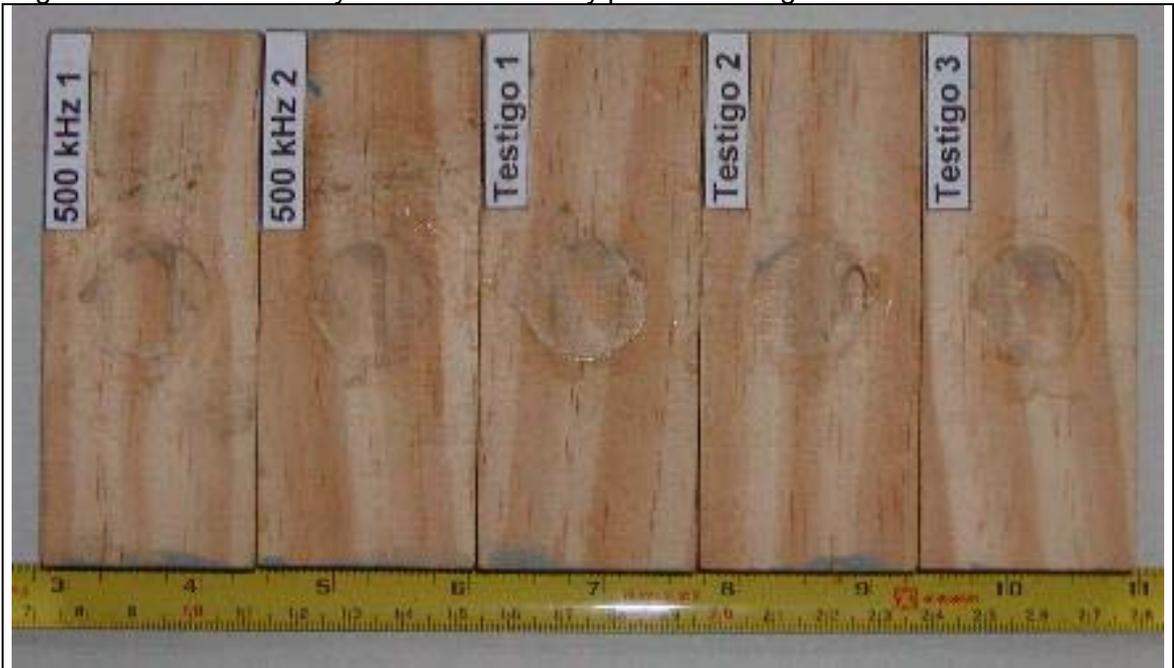
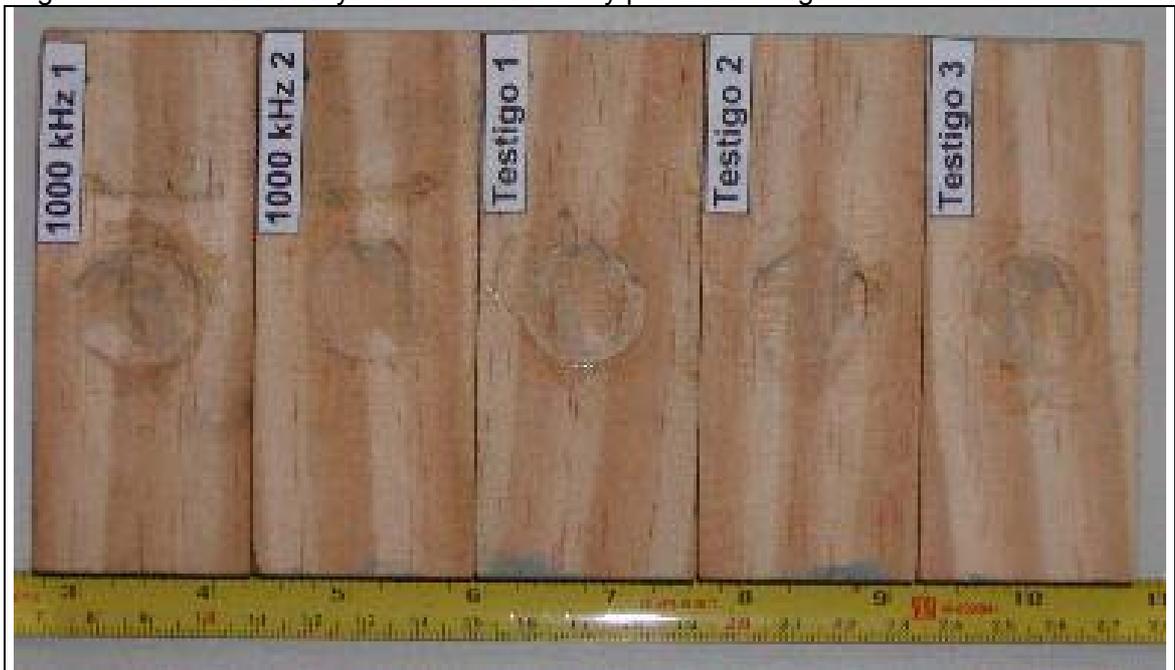


Figura 19. Probetas ensayadas con 1000 kHz y probetas testigo.



Las probetas ensayadas con la frecuencia de 500 kHz sufrieron un ataque que es clasificado como 3, el que se define como ataque medio y el que corresponde a un ataque de tipo superficial que se extiende a más de $\frac{1}{4}$ de la superficie expuesta. No obstante, es el tratamiento que presenta el mayor % de supervivencia.

Las probetas ensayadas con las frecuencias de 100, 1000 kHz y las probetas testigos sufrieron un ataque clasificado como 4, el que se define como ataque fuerte y corresponde a una erosión sobre más de $\frac{1}{4}$ de la superficie expuesta o ataque penetrante superior a 3 mm.

No existen diferencias entre el grado de ataque sufrido por las probetas ensayadas con 100 y 1000 kHz respecto de las probetas testigos, a diferencia del grado de ataque alcanzado por las probetas ensayadas con 500 kHz en las que el ataque fue levemente menor. De acuerdo a lo anterior no existen señales claras de la influencia del ultrasonido a las frecuencias ensayadas sobre la actividad de las termitas en proceso de ataque en madera de *P. radiata*.

Es importante hacer notar algunas características de interés sobre el comportamiento de las termitas en el interior de los tubos durante el proceso de ataque a la madera. Los conjuntos de ensayo fueron llenados con arena hasta una altura de 7 cm al inicio del ensayo y producto de la actividad para la construcción de sus galerías que les permiten movilizarse a través del sustrato y de acceder a la probeta para poder alimentarse, las termitas depositaban la arena removida en la zona superior del sustrato con lo que la altura del nivel de la arena aumentó. En las probetas testigo el nivel superior de la capa de arena se incrementó en 2 cm, en tanto que en las probetas tratadas con ultrasonido para las tres frecuencias el incremento fue de 1 cm.

Las termitas construyeron túneles utilizando fragmentos diminutos de tierra y madera parcialmente digerida cementada con excrementos sobre las paredes del vidrio. Estos túneles aparecieron primero en las probetas que estaban siendo ensayadas con ultrasonido.

Se pudo observar que en las probetas que se ensayaron con ultrasonido, las termitas registraron menor actividad durante el período en que eran irradiadas. Se apreció que las termitas no bajaban a través de sus galerías a la madera durante el período de aplicación, luego de unos minutos de suspendida la aplicación de ondas mecánicas las termitas bajaban a la madera a continuar con el ataque a la probeta, período en que éstas podrían haber atacado a las probetas con mayor voracidad.

5.2 Cavitación en agua

Cabe recordar que al inicio de cada experiencia se ingresaron 10 termitas en el vaso de precipitados con agua destilada para ser ensayadas. En forma paralela a los ensayos de cavitación acústica, se ingresaron 10 termitas en otro vaso de precipitado como testigos, en cada uno de los tratamientos.

Con respecto a los resultados de supervivencia en las termitas utilizadas como testigo, se observó que el 100% de éstas sobrevivieron a los períodos de tiempo sumergidas en agua destilada. Las termitas recuperaron su actividad normal después de aproximadamente 15 minutos de ser retiradas de los depósitos.

El fenómeno de cavitación acústica ocurrió para ambas frecuencias (11 y 20 kHz), lo que concuerda con Shutilov (1988) quien afirma que para niveles de presión sonora mayor a la presión atmosférica el fenómeno de cavitación acústica es independiente de la frecuencia.

En el cuadro 4 es posible apreciar la mortalidad promedio de las termitas para cada tratamiento aplicado, el detalle de los resultados se puede observar en el Apéndice II.

Cuadro 4. Mortalidad de las termitas (%) para las distintas frecuencias, potencias y tiempos de aplicación.

FRECUENCIA (A)	POTENCIAS (B)								
	5 W			10 W			15 W		
	TIEMPOS (C)								
	2min	5min	10min	2min	5min	10min	2min	5min	10min
11 kHz	93	87	100	90	97	100	100	100	93
20 kHz	33	50	100	90	100	100	100	100	100

Del cuadro 4 se desprende el alto porcentaje de mortalidad de las termitas producto del fenómeno de cavitación acústica, lo que se confirma gráficamente en la figura 20.

En el cuadro 5 se presenta un resumen del análisis de varianza, el detalle se presenta en el Apéndice II.

Cuadro 5. Análisis de varianza para mortalidad de los individuos.

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Media de Cuadrados	Fo
Frecuencia (A)	12,52	1	12,52	11,46*
Potencia (B)	50,04	2	25,02	22,90*
Tiempos (C)	19,70	2	9,85	9,02*
AB	34,48	2	17,24	15,78*
AC	11,26	2	5,63	5,15*
BC	31,63	4	7,91	7,24*
ABC	16,74	4	4,19	3,83*
Error	39,33	36	1,09	
Total	215,70	53		
para $f_{36;1;0,005} = 4,15$ para $f_{36;2;0,005} = 2,90$ para $f_{36;4;0,005} = 2,90$				

* Significativo al 95 %.

Para el caso de la frecuencia se rechaza la hipótesis de independencia con un grado de confianza de un 95% y un valor crítico de $f_{36; 1; 0,005} = 4,15$. Este valor es menor que el calculado $Fo = 11,46$. De acuerdo a lo anterior existe una razón para creer que las frecuencias aplicadas y la mortalidad de las termitas son dependientes.

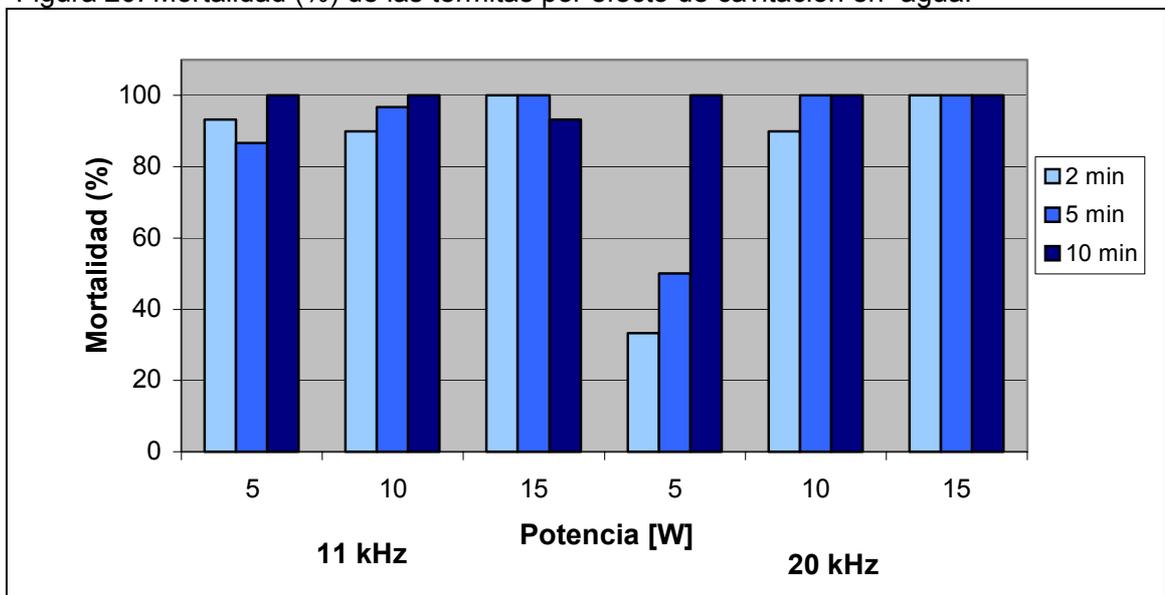
Para el caso de la potencia se rechaza la hipótesis de independencia con un grado de confianza de un 95% y un valor crítico de $f_{36; 2; 0,005} = 2,90$. Este valor es menor que el calculado $Fo = 22,90$. De acuerdo a lo anterior existe una razón para creer que las potencias aplicadas y la mortalidad de las termitas son dependientes.

Para el caso de los tiempos de exposición se rechaza la hipótesis de independencia con un grado de confianza de un 95% y un valor crítico de $f_{36; 2; 0,005} = 2,90$. Este valor es menor que el calculado $F_0 = 9,02$. De acuerdo a lo anterior existe una razón para creer que los tiempos de exposición y la mortalidad de las termitas son dependientes.

Del análisis estadístico se determinó que la mortalidad de las termitas se ve afectada significativamente por la frecuencia, potencia y los tiempos de exposición con un nivel de significación del 5 %, la interacción entre los factores también fue significativa. Finalmente la mortalidad de las termitas depende de la frecuencia irradiada, potencia aplicada y tiempos de exposición al campo sonoro.

Este comportamiento de dependencia se aprecia en la figura 20 en la que se compara la mortalidad para las distintas frecuencias, potencias y tiempo de aplicación. En esta figura no se ve una clara tendencia en el comportamiento de la mortalidad de las termitas con respecto a las dos frecuencias ensayadas al aumentar la potencia en los distintos tiempos aplicados, esto se puede atribuir a la posición relativa de las termitas frente al campo sonoro y a la unidireccionalidad del frente de ondas.

Figura 20. Mortalidad (%) de las termitas por efecto de cavitación en agua.



En la figura 20 se puede apreciar la tendencia similar en el comportamiento de la mortalidad de los insectos, para la potencia de 10 W en las 2 frecuencias (11 y 20 kHz) en en que aumenta la mortalidad al incrementarse los tiempos de exposición.

El valor promedio para la mortalidad de las termitas ensayadas considerando las 2 frecuencias (11 y 20 kHz), las 3 potencias (5, 10 y 15 W) y los 3 tiempos de aplicación (2, 5 y 10 minutos) en condiciones de cavitación en agua corresponde al 91% de los insectos ensayados.

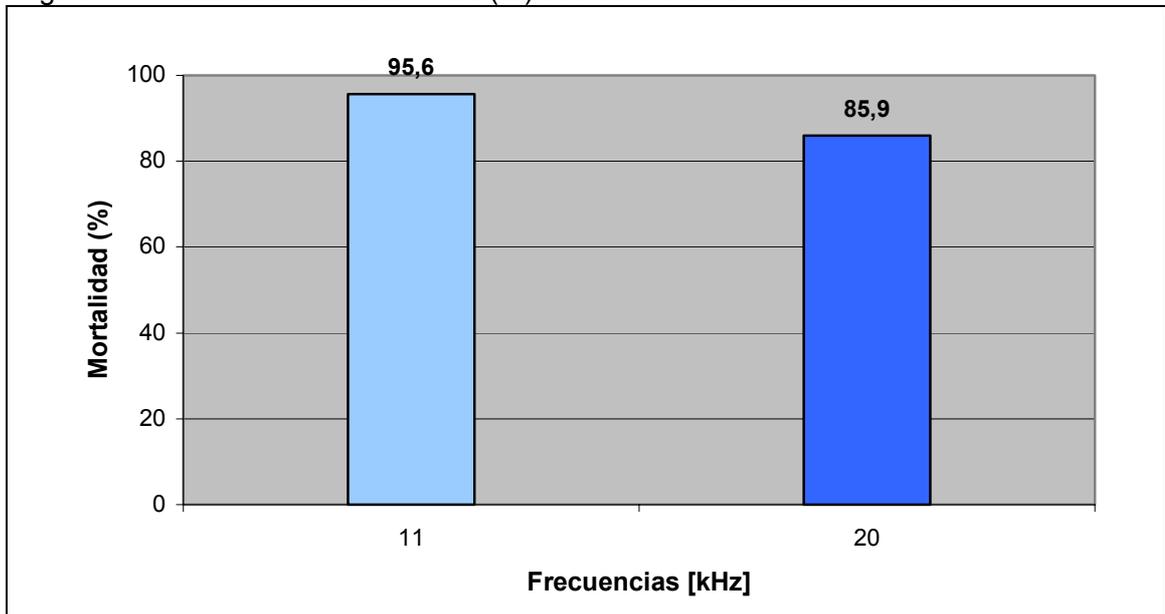
La mortalidad de la totalidad de los insectos se produce para las dos frecuencias ensayadas en la potencia más alta utilizada y un tiempo de aplicación de 10 minutos. Los menores valores de mortalidad de las termitas se produjeron para la frecuencia de 20 kHz con una potencia de 5 W, con tiempos de aplicación de campo sónico de 2 y 5 minutos.

Para la aplicación práctica de los resultados obtenidos se debe considerar que la frecuencia y la potencia empleada son parámetros inherentes a los equipos utilizados, pero se debe tener presente que las frecuencias más bajas son menos disipativas. Esto se explica por la longitud que presentan las ondas a distintas frecuencias, longitudes de ondas más largas son menos sensibles a las imperfecciones del material por lo que existe menor reflexión de ellas.

Por ejemplo, las frecuencias de 11 y 20 kHz presentan longitudes de onda de 14 y 8 cm. En cambio las frecuencias de 100, 500 y 1000 kHz presentan longitudes de onda de 0,004; 0,009 y 0,04 mts respectivamente.

De acuerdo a los resultados entre las frecuencias consideradas de 11 y 20 kHz, la primera es la que produjo una mayor mortalidad, con aproximadamente un 10% de diferencia con respecto a la segunda. Este comportamiento se presenta en la figura 21.

Figura 21. Mortalidad de las termitas (%) debido a las distintas frecuencias.



Para la frecuencia de 11 kHz se determinó un nivel de presión sonora de 6,6 [kPa] y para la frecuencia de 20 kHz se determinó un nivel de presión sonora de 4,5 [kPa], el detalle de estas determinaciones se presenta en el Apéndice III. Se podría desprender que la cavitación acústica producida en los ensayos es independiente de la frecuencia.

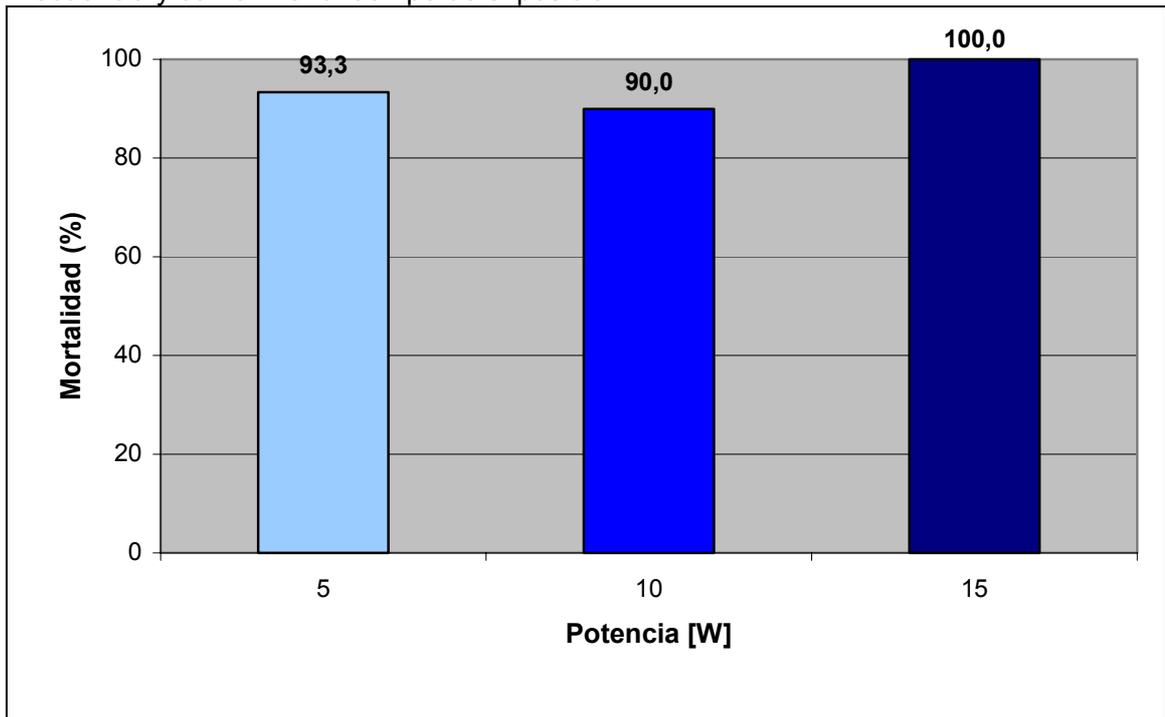
Las ondas mecánicas que presentan altas frecuencias son muy disipativas por lo que se hace conveniente trabajar con frecuencias más bajas, agregando a esto que la construcción de este tipo de transductores resulta más sencilla.

La utilización de mayores potencias se traduce en un mayor poder destructivo, los resultados obtenidos corroboran lo anterior ya que la mayor mortalidad de las termitas se produjo con la potencia de 15 W, sin embargo, la diferencia existente entre las potencias de 15 y 10 W es leve (2%).

De la prueba de intervalos Duncan para la Potencia (B) se determinó que existen diferencias estadísticamente significativas entre la potencia de 15 W respecto a la de 10 W y 5 W en la mortalidad de las termitas.

En la figura 22 se presentan la mortalidad porcentual alcanzada por los insectos en los ensayos desarrollados con la menor frecuencia (11 kHz) y en el menor tiempo de exposición al campo sonoro (2 min).

Figura 22. Mortalidad de las termitas (%) debido a las distintas potencias con la menor frecuencia y con el menor tiempo de exposición.



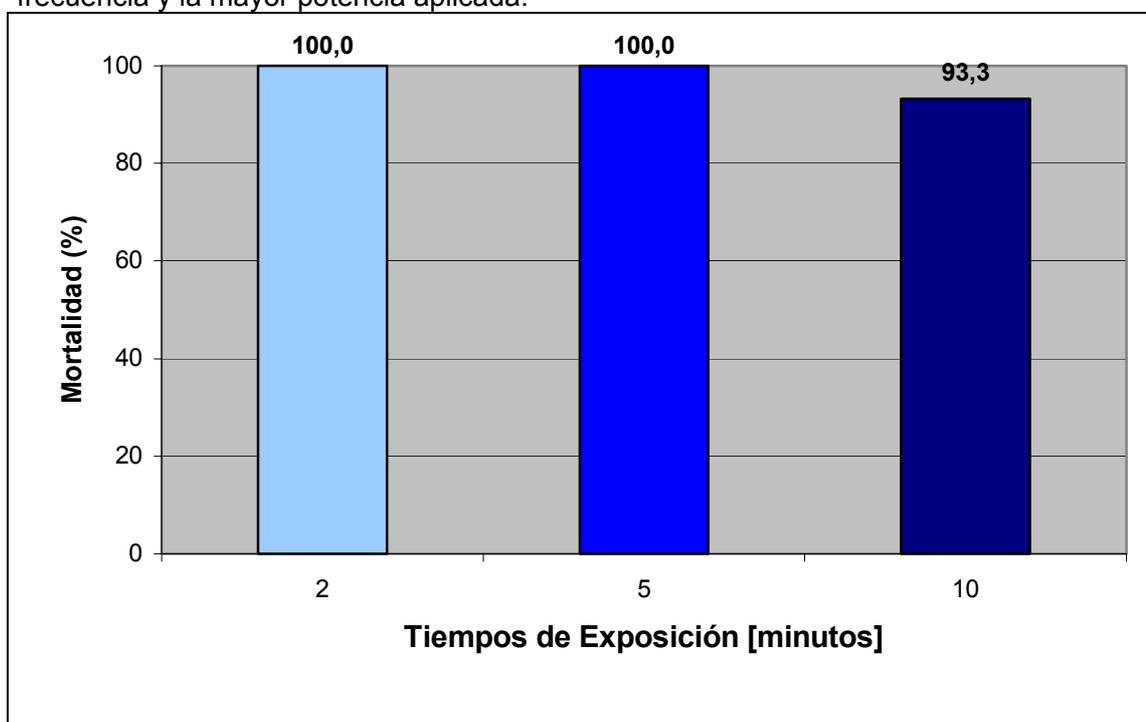
Se puede observar gráficamente que al emplear una frecuencia de 11 kHz, una potencia de 15 W y 2 minutos de exposición se logra que la totalidad de los insectos mueran producto del fenómeno de cavitación acústica.

El empleo de menores tiempos de aplicación se traduce en un menor consumo de energía por lo que lo hace más eficiente desde el punto de vista práctico. Si bien la mayor mortalidad de las termitas se produce con la exposición por un lapso de 10 minutos a la acción del ultrasonido se pudo comprobar que en aquellas combinaciones de tratamientos en que la mortalidad fue de un 100%, las termitas morían producto de la cavitación a que se veían sometidas a partir de los 15 segundos de iniciada la aplicación de las ondas ultrasónicas.

De la prueba de intervalos Duncan para los Tiempos (C) se determinó que existen diferencias estadísticamente significativas de los 10 minutos con respecto a los 5 y 2 minutos de aplicación del ultrasonido en la mortalidad de las termitas. Entre los tiempos de 5 y 2 minutos no existen diferencias estadísticamente significativas.

En la figura 23 se presentan la mortalidad porcentual alcanzada por los insectos en los ensayos desarrollados con la menor frecuencia (11 kHz) y la mayor potencia aplicada (15 W).

Figura 23. Mortalidad de las termitas (%) debido a los distintos tiempos con la menor frecuencia y la mayor potencia aplicada.



El efecto destructivo de la cavitación acústica sobre la fisiología de las termitas subterráneas podría deberse al efecto combinado de la cavitación del líquido y de la cavitación interna de las termitas producto del 70 % de agua presente en su composición física.

6. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos se desprenden las siguientes conclusiones:

a) Generales

- La influencia de las ondas mecánicas sobre termitas subterráneas (*R. hesperus*) en proceso de ataque a madera de *P. Radiata*, en el rango ultrasónico (estudiadas en medio aéreo) no entregó señales claras con respecto a su efectividad en el control de la actividad de los insectos.
- Los ensayos efectuados en medio acuoso en el rango sónico, permitieron establecer que el fenómeno de cavitación acústica produce la muerte de las termitas.

b) Específicas

Rango Ultrasónico

- La metodología utilizada en el estudio de la Influencia de ondas mecánicas en termitas en proceso de ataque a madera de *P. radiata*, resulto adecuada para el análisis del efecto de las ondas mecánicas en madera en proceso de ataque.
- El menor grado de ataque se produjo a la frecuencia de 500 kHz, el que se clasificó como ataque medio, sin embargo en este caso el nivel de supervivencia fue mayor, lo que deja en evidencia que no existe una relación clara entre ambas variables en el proceso de ataque.
- Como resultado de la aplicación del ultrasonido a termitas en proceso de ataque a madera de *P. radiata*, se produjo un mayor nivel de mortalidad para la frecuencia de 1000 kHz, sin embargo esto no se vio reflejado en el grado de ataque sufrido por las probetas ensayadas con esta frecuencia, el que fue clasificado como un ataque fuerte.

Rango Sónico

- La mortalidad de las termitas ensayadas en medio acuoso depende fundamentalmente de la frecuencia irradiada, potencia aplicada y del tiempo de exposición a las ondas mecánicas.
- De las frecuencias ensayadas en medio acuoso la que presentó una mayor tasa de mortalidad fue la de 11 kHz.
- Para las potencias utilizadas en los ensayos en medio acuoso se determinó que a mayores potencias se produce mayor mortalidad de las termitas. Existe una leve diferencia (3 %) entre las tasas de mortalidad producidas por las potencias de 15 y 10 W.
- De los tiempos de aplicación en los ensayos en medio acuoso se determinó que a tiempos más prolongados de exposición mayor es la mortalidad de las termitas, independiente del nivel de potencia.
- Los tratamientos que presentaron los valores más bajos de mortalidad de las termitas fueron aquellos que combinan la frecuencia de 20 kHz, 5W y los tiempos de 2 y 5 minutos, es decir, mayor frecuencia, menor potencia y tiempos de aplicación más cortos
- De los tratamientos empleados, el que resulta efectivo y eficiente es el que combina la frecuencia de 11 kHz, una potencia de 15 W y 2 minutos de irradiación. Este produjo una mortalidad del 100 % para las termitas ensayadas.

7. RECOMENDACIONES

- Es conveniente estudiar los ensayos efectuados en la primera etapa del estudio en que se analizó la Influencia de ondas mecánicas en termitas en proceso de ataque a madera de *P. radiata* con frecuencias ubicadas en el rango de los 11 – 80 kHz.
- Debido al alto grado de disipación de energía de las ondas de alta frecuencia debe verificarse la intensidad del campo sonoro a que realmente están expuestas las termitas, es decir, en la zona de ataque de las probetas.
- En los ensayos de cavitación sería de interés estudiar el efecto del campo sonico sobre las termitas a distintas distancias de la fuente.

8. BIBLIOGRAFIA

- ALMAGRO, V. 1967. Los ultrasonidos: teoría y aplicaciones. Madrid, España. 130 p.
- ARMSTRONG, J., PATTERSON, D., SNECKENBERGER, J. 1991. Wood and Fiber Science. 23 (1): 32 – 43.
- AUSTIN, J., SZALANSKI, A., UVA, P., BAGNERES, A., VENCE, A. 2002. A Comparative Genetic Analysis of the Subterranean Termite Genus *Reticulitermes* (Isoptera: Rhinotermitidae). Ann. Entomol. Soc. Am. 95 (6): 753 – 760.
- BARBAGELATA, J. 1999. Caracterización de nudos de madera de Pino radiata mediante ultrasonido. Memoria para optar al título profesional de Ingeniero Forestal. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Chile. 101 p.
- BERANEK, L. 1961. Acústica. Editorial Hispano Americana S.A. Buenos Aires, Argentina. 492 p.
- BIERNACKI, J. y BEALL, F. 1993. Development of an acousto – ultrasonic scanning system for nondestructive evaluation of wood and wood laminates. Wood and Fiber Science. 25 (3): 289 – 297.
- BUCUR, V. 1995. Acoustics of Wood. CRC Press, Inc. 284 p.
- CABRERA, P. 1999. La prevención como antídoto. Chile Forestal, Número 276.
- CAMMOUSSEIGHT, A. 1997. Amenaza latente. Chile Forestal, Número 231.
- CAMMOUSSEIGHT, A. 1999. Las termitas y su presencia en Chile. CONAF. Nota técnica: Año 19. N° 37.
- CAMMOUSSEIGHT, A. 2000. Enemigo complejo. Chile Forestal, Número 279.
- CANAVOS, G. 1988. Probabilidad y estadística. Aplicación y método. McGraw – Hill. México. 651p.

- CARVAJAL, M. 2001. Detección de grietas internas en madera dimensionada mediante ultrasonido. Memoria para optar al título profesional de Ingeniero Forestal. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Chile. 91 p.
- COULSON, R. y WITTER, J. 1990. Entomología Forestal: Ecología y Control. Editorial Limusa. México D.F. 751 p.
- ESPEJO, F. 2002. Efecto de la densidad y contenido de humedad de la madera de pino radita (*Pinus radiata* D. DON) sobre la atenuación y velocidad de propagación ultrasónica. Tesis de Magíster. Universidad de Chile. 64 p.
- FORSCHLER, B., HENDERSON, G. 1995. Subterranean Termite Behavioral Reaction to Water and Survival of Inundation: Implications for Field Populations. Environ. Entomol. 24 (6): 1592 – 1597.
- HUETER, T.F. y BOLT, R.H. 1965. Sonics. Techniques for the use of sound and ultrasound in engineering and science. John Wiley & sons, Inc., New York. Fourth printing. 447 p.
- HUNGATE, R. E., 1975. La celulosa en la nutrición animal. Compañía Editorial Continental. Primera Edición en Español. 36 p.
- HUNT, G. y GARRAT, H. 1962. Preservación de la madera. Salvat Editores, S.A. 486 p.
- KABIR, M.F., SCHMOLDT, D.L., SCHAFER, M.E. 2000. Detection of defects in red oak deckboards by ultrasonic scanning. 4 th International Conference on Image Processing and Scanning of Wood. 89 – 96.
- KARSULOVIC, J.T., GAETE, L., y LEON, L.A. 2000. "Ultrasonic detection of Knots and Annual Ring orientation in Pinus Radiata lumber". Wood and fiber Science 32 (3) pp 278 – 286.
- LEON, L. A., 1993. Mecanismos de disipación de energía de ondas acústicas por presencia de nudos en la madera. Tesis de Magíster. Universidad de Chile. 123 p.

- MARÍN, C. 1999. Estudio de la anisotropía elástica de madera de *Pinus radiata* (D. Don) mediante ultrasonido. Memoria para optar al título de Ingeniero Forestal. Facultad de Cs. Forestales. Universidad de Chile. 120 p.
- METCALF, C. L. y FLINT, R. L. 1965. Insectos destructivos e insectos útiles. Compañía Editorial Continental. Primera Edición. México D.F. 1208 p.
- MISHIRO, A. 1996. Ultrasonic velocity and moisture content in Wood. *Mokuzai Gukkaishi*. 42 (10): 930 – 936.
- NIEMZ, P., AGUILERA, A., ROLLERI, A. 1994. Velocidad de propagación del sonido en algunas especies creciendo en Chile y su relación con propiedades físicas. *Bosque* 15(2): 49 – 54.
- NORMA EUROPEA, EN 118, 1990.
- RODRÍGUEZ, J. A. 1998. Patología de la madera. Coedición Fundación Conde del Valle de Salazar Ediciones Mundiprensa. 349 p.
- SANDOZ, J. L. 1989. Grading of construction timber by ultrasound. *Wood Science and Technology*. 23 : 95 – 108.
- SANDOZ, J.L. 1993. Moisture content and temperature effect on ultrasound timber grading. *Wood Science and Technology*. 27: 373 – 380.
- SEARS, F. y ZEMANSKY, M. 1957. Física General. Grafiplás, S.A. 1040 p.
- SERWAY, R. y BESCHNER, R. 1997. Física para Cs. e Ingeniería. Quinta Edición. Tomo I. McGraw – Hill. 701 p.
- SCHAD, K., SCHMOLDT, D., ROSS, R. 1996. Nondestructive methods for detecting defects in soft wood logs. Res. Pap. FPL – RP – 546. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 13 p.
- SHUTILOV, V.A. 1988. Fundamental physics of ultrasound. 377 p. Printed in Great Britain

- SMITH, J., RUST, M. 1993, a. Effect of Relative Humidity and Temperature on the survival of *Reticulitermes hesperus* (Isoptera: Rhinotermitidae). Sociobiology. Vol. 21. N ° 2: 217 – 224.
- SMITH, J., RUST, M. 1993, b. Effect of Temperature on Tunneling, Feeding Rates, and Oxygen Requirements of the Western Subterranean Termite, *Reticulitermes hesperus* (Isoptera: Rhinotermitidae). Sociobiology. Vol. 21. N ° 3:225 – 236.
- SMITH, J., RUST, M. 1994. Temperature preferences of the western subterranean termite, *Reticulitermes hesperus* Banks. Journal of Arid Environments. 28: 313 – 323.
- WILCOX, W. 1988. Detection of early stages of wood decay with ultrasonic pulse velocity. Forest Product Journal. 38 (5): 68 – 73.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO) 1982. Ultrasound. Printed in Finland. 199 p.

Sitios Web:

(1) IBERTRAC. Control de plagas. Termitas, comportamiento. [en línea]. <www.ibertrac.com/servicios/termitas/termitas2.html> [consulta: 12 julio 2004].

(2) LEWIS, V., HAVERTY, M., CARVER, D., FOUCHE, C. Field Comparison of Sand or Insecticide Barriers for Control of *Reticulitermes* spp. (Isoptera: Rhinotermitidae) Infestations in Homes in Northern California. [en línea]. <<http://nature.berkeley.edu/lewis/fieldcompa.pdf>> [consulta: 12 julio 2004].

(3) MORENO, E. 1998. Propagación de ondas mecánicas y aplicaciones de los ultrasonidos. Publicaciones en Línea de la Página Web de Ritul. [en línea]. <<http://www.iai.csic.es/ritul/pubs.html>> [consulta: 12 julio 2004].

APENDICES

APENDICE I.
CONTROL APLICADO A LAS TERMITAS.

Control de peso y adición diaria de agua destilada a las probetas

	Vi 4/7	Lu 7/7		Ma 8/7		Mi 9/7		Ju 10/7	
Probeta	Peso	Pqpta	Pqqda	Pqpta	Pqqda	Pqpta	Pqqda	Pqpta	Pqqda
100 kHz 1	99,59	97,39	99,62	99,09	99,62	99,07	99,62	99,21	99,63
100 kHz 2	99,5	94,42	97,53	96,58	97,57	96,64	97,57	96,79	97,63
500 kHz 1	101,4	97,85	101,41	100,49	101,45	100,58	101,66	100,8	101,7
500 kHz 2	99,07	96,1	99,24	98,38	99,25	98,47	99,25	98,52	99,4
1000 kHz 1	98,78	95,37	98,79	97,89	98,77	97,89	98,79	98,01	98,82
1000 kHz 2	99,66	97,49	99,78	99,22	99,9	99,34	99,92	99,45	99,96
Testigo 1	100,53	96,67	100,56	99,69	100,56	99,74	100,58	99,86	100,59
Testigo 2	98,63	96,34	98,64	97,95	98,67	97,98	98,68	98,05	98,67
Testigo 3	99,85	96,97	100,02	99,17	100,02	99,21	100,03	99,34	100,01

	Vi 11/7		Lu 14/7		Ma 15/7		Mi 16/7		Ju 17/7	
Probeta	Pqpta	Pqqda								
100 kHz 1	99,28	99,84	98,81	99,89	99,39	99,92	99,24	100,52	99,87	99,87
100 kHz 2	96,93	97,64	96,07	97,65	96,95	97,97	97,16	97,98	97,16	98
500 kHz 1	100,93	101,75	99,98	101,75	100,96	101,75	100,83	101,78	100,92	101,8
500 kHz 2	98,8	99,47	98,05	99,56	98,92	99,65	98,85	99,64	98,82	99,66
1000 kHz 1	98,09	98,86	97,25	98,87	98,19	98,92	98,09	98,95	98,07	98,96
1000 kHz 2	99,54	99,96	99,05	99,96	99,51	100,05	99,44	100,05	99,5	100,05
Testigo 1	99,93	100,6	99,2	100,77	100,13	100,88	100,04	100,89	100,03	100,87
Testigo 2	98,07	98,7	97,34	98,74	98,12	98,78	98	98,78	98,02	98,8
Testigo 3	99,35	100,12	98,63	100,36	99,7	100,38	99,55	100,39	99,56	100,38

	Vi 18/7		Lu 21/7		Ma 22/7		Mi 23/7		Ju 24/7	
Probeta	Pqpta	Pqqda								
100 kHz 1	99,19	99,88	99,19	100,07	98,96	99,88	98,96	99,88	100,1	100,14
100 kHz 2	97,05	98,1	96,93	98,13	96,62	98	96,62	98	98,24	98,24
500 kHz 1	100,82	101,9	100,66	101,95	100,31	101,82	100,31	101,82	102,2	102,21
500 kHz 2	98,79	99,68	98,68	99,93	98,53	99,65	98,53	99,65	100	100,01
1000 kHz 1	97,87	99,02	97,74	99,03	97,35	99,01	97,35	99,01	99,17	99,17
1000 kHz 2	99,42	100,09	99,49	100,33	99,32	100,03	99,32	100,03	100,4	100,38
Testigo 1	99,9	100,86	99,68	100,93	99,35	100,84	99,35	100,84	100,9	100,9
Testigo 2	97,83	98,81	97,62	98,85	97,37	98,98	97,37	98,98	99,02	99,02
Testigo 3	99,42	100,42	99,17	100,42	98,96	100,39	98,96	100,39	100,4	100,4

	Vi 25/7		Lu 28/7		Ma 29/7		Mi 30/7		Ju 31/7	
Probeta	Pqpta	Pqgda								
100 kHz 1	99,58	99,92	98,77	99,97	99,63	100,09	99,62	99,71	99,47	99,81
100 kHz 2	97,24	98,03	95,53	98,08	97,52	98,07	97,32	98,1	97,56	98,11
500 kHz 1	101,31	101,83	99,6	101,79	101,43	101,8	101,12	102,02	101,24	101,8
500 kHz 2	99,57	99,71	97,49	99,7	99,4	99,95	99,39	100,02	99,29	99,74
1000 kHz 1	98,44	99,03	97,04	99,14	98,74	99,15	98,45	99,14	98,54	99,13
1000 kHz 2	100,1	100,1	99,02	100,06	99,85	100,22	100,07	100,14	99,94	100,13
Testigo 1	99,97	99,97	97,32	100,91	99,83	100,91	99,89	100,94	100,16	100,92
Testigo 2	98,18	98,96	96,25	98,96	98,36	99,1	98,4	98,96	98,32	99,06
Testigo 3	99,37	99,37	96,24	100,3	99,28	100,3	99,82	100,31	99,7	100,37

	Vi 1/8		Lu 4/8	
Probeta	Pqpta	Pqgda	Pqpta	Pqgda
100 kHz 1	99,41	99,99	98,27	99,84
100 kHz 2	97,32	98,14	95,26	98,19
500 kHz 1	101,16	101,2	99,69	102,11
500 kHz 2	99,24	99,79	98,11	99,82
1000 kHz 1	98,52	99,12	98,14	99,3
1000 kHz 2	99,8	100,11	99,68	100,21
Testigo 1	100,08	100,9	97,13	101,98
Testigo 2	98,66	98,99	97,58	99,34
Testigo 3	99,73	100,31	98,05	100,29

**APENDICE II.
ANALISIS ESTADISTICO.**

Análisis estadístico para mortalidad de termitas

FREC. (A)	POTENCIAS (B)																		
	5 W						10 W						15 W						
	TIEMPOS (C)																		
	2 min		5 min		10 min		2 min		5 min		10 min		2 min		5 min		10 min		
11 kHz	10		10		10		10		10		10		10		10		10		
	10	28	9	26	10	30	9	27	10	29	10	30	10	30	10	30	10	28	258
	8		7		10		8		9		10		10		10		8		
20 kHz	6		5		10		10		10		10		10		10		10		
	4	10	4	15	10	30	10	27	10	30	10	30	10	30	10	30	10	30	232
	0		6		10		7		10		10		10		10		10		
		38		41		60		54		59		60		60		60		58	490

Totales B x C
Y.jk.

139	173	178
-----	-----	-----

Totales A x B
Yij..

		B		
		5 W	10 W	15 W
A	11 kHz	84	86	88
	20 kHz	55	87	90
		139	173	178

Totales A x C
Yi.k.

		C		
		2 min	5 min	10 min
A	11 kHz	85	85	88
	20 kHz	67	75	90
		153	160	178

Análisis múltiple de medias “Prueba de intervalos Duncan”

DUNCAN			
Factor B	5W	10W	15W
	10	10	10
	10	9	10
	8	8	10
	6	10	10
	4	10	10
	0	7	10
	10	10	10
	9	10	10
	7	9	10
	5	10	10
	4	10	10
	6	10	10
	10	10	10
	10	10	10
	10	10	8
	10	10	10
	10	10	10
	10	10	10
Promedio	7,72	9,61	9,89
	y1	y2	y3

		y3	y2	y1
		9,8888889	9,6111111	7,7222222
y1	7,7222222	2,1666667	1,8888889	0
y2	9,6111111	0,2777778	0	0
y3	9,8888889	0	0	
p	2	3		
Rp	2,88	3,03		
Raíz (cme/n*a*c)	0,2463729			
RP	0,7095539	0,7465098		

DUNCAN			
Factor C	2 min	5 min	10 min
	10	10	10
	10	9	10
	8	7	10
	6	5	10
	4	4	10
	0	6	10
	10	10	10
	9	10	10
	8	9	10
	10	10	10
	10	10	10
	7	10	10
	10	10	10
	10	10	10
	10	10	8
	10	10	10
	10	10	10
	10	10	10
Promedio	8,44	8,89	9,89
	y1	y2	y3

		y3	y2	y1
		9,8889	8,8889	8,4444
Y1	8,4444	1,4445	0,4445	0
Y2	8,8889	1	0	0
Y3	9,8889	0	0	
P	2	3		
Rp	2,88	3,03		
Raiz (cme/n*a*b)	0,2463729			
RP	0,7095539	0,7465098		

DUNCAN									
BC	5W/2min	5W/5min	5W/10min	10W/2min	10W/5min	10W/10min	15W/2min	15W/5min	15W/10min
	10	10	10	10	10	10	10	10	10
	10	9	10	9	10	10	10	10	10
	8	7	10	8	9	10	10	10	8
	6	5	10	10	10	10	10	10	10
	4	4	10	10	10	10	10	10	10
	0	6	10	7	10	10	10	10	10
Pr	6,33	6,83	10	9	9,83	10	10	10	9,67
	y1	y2	y3	y4	y5	y6	y7	y8	y9

		y3	y6	y7	y8	y5	y9	y4	y2	y1
		10	10	10	10	9,83	9,67	9	6,83	6,33
y1	6,33	3,67	3,67	3,67	3,67	3,5	3,34	2,67	0,5	0
y2	6,83	3,17	3,17	3,17	3,17	3	2,84	2,17	0	
y4	9	1	1	1	1	0,83	0,67	0		
y9	9,67	0,33	0,33	0,33	0,33	0,16	0			
y5	9,83	0,17	0,17	0,17	0,17	0				
y8	10	0	0	0	0					
y7	10	0	0	0						
y6	10	0	0							
y3	10	0								
p	2	3	4	5	6	7	8	9		
Rp	2,88	3,03	3,11	3,19	3,24	3,28	3,31	3,35		
Raíz (cme/n*a)	0,427	0,427	0,427	0,427	0,427	0,427	0,427	0,427		
RP	1,229	1,293	1,327	1,361	1,383	1,400	1,412	1,430		

APENDICE III.
DETERMINACION DEL NIVEL DE PRESION SONORA EN MEDIO ACUOSO.

Determinación del Nivel de Presión Sonora (NPS)

a) Frecuencia de Resonancia = 11.631 Hz

Z = 21.24 Ohm

Potencia	Voltaje (Fluke) [V]	Sensibilidad [V/Pa]	NPS [kPa]
5 W	0.009	0.00000167	5,4
10 W	0.011	0.00000167	6,6
15 W	0.013	0.00000167	7,8

b) Frecuencia de Resonancia = 20.372 Hz

Z = 27.7 Ohm

Potencia	Voltaje (Fluke) [V]	Sensibilidad [V/Pa]	NPS [kPa]
5 W	0.005	0.00000167	3,0
10 W	0.006	0.00000167	3,6
15 W	0.010	0.00000167	6,0