

# **COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO**

**POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES**

## **ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ENTRE LOS INDICADORES DE SALUD FORESTAL MATERIAL LEÑOSO CAÍDO, CONDICIÓN DE COPA Y DAÑOS AL ÁRBOLADO**

**ANTONIO DAVID QUIROZ REYGADAS**

**T E S I N A**  
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRÍA TECNOLÓGICA EN CONSERVACIÓN Y MANEJO  
SUSTENTABLE DE BOSQUES**

**MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO**

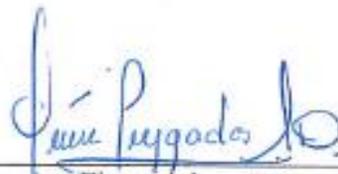
2017

**CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALIAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACION**

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe Antonio David Quiroz Reygadas, Alumno (a) de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor Dionicio Alvarado Rosales, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ENTRE LOS INDICADORES DE SALUD FORESTAL MATERIAL LEÑOSO CÁIDO, CONDICIÓN DE COPA Y DAÑOS AL ARBOLADO

y de los producto de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre el colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de México, a 16 de octubre de 2017



Firma del  
Alumno (a)



Dr. Dionicio Alvarado Rosales  
Vo. Bo. del Consejero o Director de Tesis

La presente tesis, titulada: **ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ENTRE LOS INDICADORES DE SALUD FORESTAL MATERIAL LEÑOSO CAÍDO, CONDICIÓN DE COPA Y DAÑOS AL ÁRBOLADO**, realizada por el alumno: Antonio David Quiroz Reygadas, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRÍA TECNOLÓGICA CONSERVACIÓN Y MANEJO SUSTENTABLE DE  
BOSQUES

CONSEJO PARTICULAR

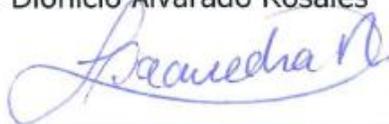
CONSEJERO



---

Dr. Dionicio Alvarado Rosales

ASESORA



---

Dra. Luz de Lourdes Saavedra Romero

ASESORA



---

Dra. Patricia Hernández de la Rosa

Montecillo, Texcoco, Estado de México, octubre 2017

# ANÁLISIS DE CORRELACIÓN ENTRE LOS INDICADORES DE SALUD FORESTAL MATERIAL LEÑOSO CAÍDO, CONDICIÓN DE COPA Y DAÑOS AL ARBOLADO

ANTONIO DAVID QUIROZ REYGADAS, M.T.

COLEGIO DE POSTGRADUADOS, 2017

## RESUMEN

La medición de la magnitud del impacto, duración y temporalidad de agentes estresantes, que alteran la salud forestal, conlleva la necesidad de establecer criterios e indicadores, así como el análisis de sus correlaciones con factores abióticos y antropogénicos, que permite obtener información para la toma de decisiones tendientes a un manejo forestal sostenible. Considerando los resultados del análisis de los Indicadores de Salud Forestal y los datos descriptivos obtenidos por el Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS), en la remediación de conglomerados para el año 2014, el objetivo del presente trabajo es determinar el nivel de correlación entre la carga del Material Leñoso Caído (**MLC**) y tres índices compuestos de salud en los ecosistemas templados de México: Índice de pérdida total de copa (**IPTC**), índice de cantidad relativa de copa (**ICRC**) e índice de severidad de daño (**ISD**). La matriz de correlación muestra que el material leñoso caído (**MLC**), tiene el mayor valor de correlación con el Índice de severidad de daño (**ISD**), obteniéndose valores de -0.19647 para **IDW<sub>2</sub>** y -0.17793 para **IDW<sub>3</sub>**. Se considera que **SI** hay una correlación entre material leñoso caído (**MLC**) y el Índice de severidad de daño (**ISD**), como se estableció en la hipótesis. Sin embargo, para los índices compuestos **IPTC** e **ICRC**, los valores son muy cercanos a cero, por lo tanto, **NO** hay correlación de estos índices con el material leñoso caído (**MLC**).

**Palabras claves:** Indicadores de salud, índices compuestos, condición de copa, daños al árbolado, material leñoso caído

# ANALYSIS OF CORRELATION BETWEEN FOREST HEALTH INDICATORS DOWN WOODY MATERIAL, CROWN CONDITION AND TREE DAMAGE

ANTONIO DAVID QUIROZ REYGADAS, M.T.

COLEGIO DE POSTGRADUADOS, 2017

## ABSTRACT

The measurement of the magnitude of the impact, duration and temporality of stressing agents that alter forest health, entails the need to establish criteria and indicators, as well as the analysis of their correlations with abiotic and anthropogenic factors, allows to obtain information for making decisions tending to sustainable forest management. Considering the results of the analysis of the Forest Health Indicators, as well as the descriptive data obtained by the National Forestry and Soils Inventory (INFyS), in the remediation of conglomerates in 2014, the objective of this work is to determine the level of correlation Down Woody Materials (**MLC**) and three composite health indexes in Mexico's temperate ecosystems: Total Crown Loss Index (**IPTC**), Relative Crown amount Index (**ICRC**), and Damage Severity Index **ISD**. The correlation matrix shows that the down woody Material (**MLC**) has the highest correlation value with the Damage Severity Index (**ISD**), obtaining values of -0.19647 for **IDW<sub>2</sub>** and -0.17793 for **IDW<sub>3</sub>**. It is considered that exist a correlation between down woody Material (**MLC**) and the Damage Severity Index (**ISD**), as established in the hypothesis. However, for the **IPTC** and **ICRC** composite indices, the values are very close to zero, hence do not exist a correlation of these indices with the down woody Material (**MLC**).

**Key words:** Health Indicator, composite Indicator, crown condition, tree damage, down woody material.

Dedico esta tesis a:

A mi familia; Diego, Fabiola, Lelia, André, Juan y mi Madre, quienes son parte fundamental en mi esfuerzo por ser un profesional más capacitado y una mejor persona.

Especialmente a ti Madre, que te extrañare por el resto de mi vida.



## AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento a la Comisión Nacional Forestal por la oportunidad que me brindo, para subir un peldaño en la escala del conocimiento, a todos y cada uno de los catedráticos que sacrificaron parte de su tiempo personal y familiar, con la finalidad de compartir los conocimientos y experiencia adquiridos en su desarrollo profesional, con un espíritu de enseñanza y aprecio hacia nosotros.

Un agradecimiento muy especial para el Dr. Alejandro Velázquez Martínez, el M. en C. José Medina Mora y la M. en C. Connie Figueroa Navarro, cuyo esfuerzo y dedicación, permitió integrar un programa de posgrado para el personal técnico de la Comisión Nacional Forestal.

Al Dr. Dionicio Alvarado Rosales y la Dra. Luz de Lourdes Saavedra Romero por su amistad, colaboración y apoyo, en los proyectos personales e institucionales que tuvimos a bien desarrollar, en el marco de las políticas tendientes a conocer la salud de nuestros bosques.

A mis amigos; Mayra Valdez L., Ricardo Sánchez V., Silvia García G., Juan Cruz A., Lucy Castillo J., Rebeca Aldana B., Carla G. Pech y Martha L. Medina G., de quienes siempre he tenido apoyo en los buenos y malos momentos, aunado a un cúmulo de gratas convivencias.

Al M. en C. Alfredo Nolasco Morales, quien con sus palabras me motivó para realizar un posgrado.

Por último, a todos mis compañeros de la maestría, con los que compartí días de gran compañerismo profesional.

# CONTENIDO

Página

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>- 1 -</b>
<b>3. HIPÓTESIS</b> .....	<b>- 6 -</b>
<b>4. MARCO DE REFERENCIA</b> .....	<b>- 7 -</b>
4.1. PLAGAS Y ENFERMEDADES .....	- 7 -
4.2. SALUD FORESTAL .....	- 9 -
4.3. MATERIAL LEÑOSO CAÍDO .....	- 11 -
<b>5. ANTECEDENTES</b> .....	<b>- 13 -</b>
5.1. VARIABLES ABSOLUTAS .....	- 16 -
5.2. ÍNDICES COMPUESTOS.....	- 17 -
5.2.1. ÍNDICE DE PÉRDIDA TOTAL DE COPA ( <i>IPCT</i> ).....	- 19 -
5.2.2. ÍNDICE DE CANTIDAD RELATIVA DE COPA ( <i>ICRC</i> ).....	- 22 -
5.2.3. ÍNDICE DE SEVERIDAD DE DAÑO ( <i>ISD</i> ). .....	- 24 -
<b>6. MATERIALES Y MÉTODO</b> .....	<b>- 28 -</b>
6.1. CAMA DE MATERIAL MUERTO CAÍDO .....	- 31 -
6.2. MATERIAL LEÑOSO CAÍDO .....	- 31 -
6.2.1. CÁLCULO DE LA CARGA DEL MATERIAL LEÑOSO CAÍDO.....	- 32 -
6.3 INTERPOLACIÓN <i>IDW</i> ( <i>INVERSE DISTANCE WEIGHTING</i> ).....	- 34 -
6.4. ANÁLISIS DEL MATERIAL LEÑOSO CAÍDO. ....	- 35 -
6.5. CORRELACIÓN ENTRE <i>MLC</i> VS <i>IPCT</i> , <i>ICRC</i> E <i>ISD</i> .....	- 38 -
6.6. CORRELACIÓN ENTRE ÍNDICES VS AGENTES CAUSALES BIÓTICOS Y ABIÓTICOS ....	- 41 -
<b>7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>- 45 -</b>
<b>8. CONCLUSIONES.</b> .....	<b>- 53 -</b>
<b>9. RECOMENDACIONES</b> .....	<b>- 54 -</b>
<b>10. LITERATURA CITADA</b> .....	<b>- 57 -</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURAS	Página
FIGURA 1. DISTRIBUCIÓN DE LOS BOSQUES TEMPLADOS EN MÉXICO. USO DE SUELO Y VEGETACIÓN, SERIE V INEGI. ....	- 8 -
FIGURA 2. COMPLEJO DEL MATERIAL MUERTO CAÍDO. ....	- 12 -
FIGURA 3. ÍNDICE DE PÉRDIDA TOTAL DE COPA EN BOSQUES TEMPLADOS, CORRESPONDIENTES A 18 ENTIDADES FEDERATIVAS. INFYS 2014. ....	- 21 -
FIGURA 4. ÍNDICE DE CANTIDAD RELATIVA DE COPA EN BOSQUES TEMPLADOS, CORRESPONDIENTES A 18 ENTIDADES FEDERATIVAS. INFYS 2014. ....	- 23 -
FIGURA 5. ÍNDICE SEVERIDAD DE DAÑO EN BOSQUES TEMPLADOS, CORRESPONDIENTES A 18 ENTIDADES FEDERATIVAS. INFYS 2014. ....	- 26 -
FIGURA 6. CÓDIGOS DE ACUERDO A LA LOCALIZACIÓN DEL DAÑO (TATTAR, 1989). ....	- 27 -
FIGURA 7. LA UNIDAD DE MUESTREO UTILIZADA POR EL INFYS, EN LA REMEDICIÓN 2014. ....	- 28 -
FIGURA 8. DISTRIBUCIÓN DE CONGLOMERADOS EN BOSQUES TEMPLADOS, CON EVALUACIÓN DE MATERIAL LEÑOSO CAÍDO ( <i>MLC</i> ). INFYS 2014. ....	- 30 -
FIGURA 9. UNIVERSO DE CONGLOMERADOS CORRESPONDIENTES A LA REMEDICIÓN 2014, DEL INFYS. ....	- 30 -
FIGURA 10. ESQUEMA DE MEDICIÓN DEL MATERIAL LEÑOSO CAÍDO EN LA REMEDICIÓN 2014, DEL INFYS. ....	- 32 -
FIGURA 11. ESQUEMA DEL PROCESO DE INTERPOLACIÓN PONDERADA ENTRE PUNTOS DE MUESTREO, ESTABLECIDA EN EL <i>INVERSE DISTANCE WEIGHTING</i> . ....	- 35 -
FIGURA 12. MULTIVARIATE DE SPATIAL ANALYST TOOLS “BAND COLLECTION STATISTICS”.....	- 36 -
FIGURA 13. VENTANA DE INGRESO DE COBERTURAS RÁSTER. ....	- 36 -
FIGURA 14. DIAGRAMA DE CORRELACIÓN ENTRE MATERIAL LEÑOSO CAÍDO VS ÍNDICES <i>IPTC, ICRC E ISD</i> . ....	- 38 -
FIGURA 15. INTERPOLACIÓN <i>IDW<sub>2</sub></i> , DISTRIBUCIÓN DE LA CARGA TOTAL DEL MATERIAL LEÑOSO CAÍDO. ....	- 39 -
FIGURA 16. INTERPOLACIÓN <i>IDW<sub>3</sub></i> , DISTRIBUCIÓN DE LA CARGA TOTAL DEL MATERIAL LEÑOSO CAÍDO. ....	- 40 -
FIGURA 17. DIAGRAMA DE CORRELACIÓN ENTRE ÍNDICES Y MATERIAL LEÑOSO CAÍDO VS AGENTES BIÓTICOS Y ABIÓTICOS ( <i>IDW<sub>3</sub></i> ). ....	- 42 -

FIGURA 18. DISTRIBUCIÓN DE AFECTACIÓN POR AGENTES ABIÓTICOS, CON BASE EN LOS DATOS OBTENIDOS DE LA REMEDIACIÓN 2014 DEL INFYS.....	- 43 -
FIGURA 19. DISTRIBUCIÓN DE AFECTACIÓN POR AGENTES BIÓTICOS, CON BASE EN LOS DATOS OBTENIDOS DE LA REMEDIACIÓN 2014 DEL INFYS.....	- 44 -

## LISTA DE CUADROS

CUADROS	Página
CUADRO 1. COMPARATIVO DE INDICADORES DE SALUD FORESTAL UTILIZADOS POR DIFERENTES AGENCIAS GUBERNAMENTALES, SFA <sup>+</sup> , EU/ICP* Y FHM <sup>o</sup> . .....	- 16 -
CUADRO 2. ÍNDICE DE LA CONDICIÓN DE SALUD, ESTABLECIDO POR LA SFA (STATE FORESTRY ADMINISTRATION), PARA EL MONITOREO DE LOS BOSQUES DE CHINA. ....	- 18 -
CUADRO 3. ÍNDICE DEL RIESGO DE IMPACTO A LA SALUD FORESTAL, ESTABLECIDO POR LA SFA (STATE FORESTRY ADMINISTRATION), PARA EL MONITOREO DE LOS BOSQUES DE CHINA. ....	- 18 -
CUADRO 4. ÍNDICE DE LA FUNCIÓN ECOLÓGICA DEL BOSQUE, ESTABLECIDO POR LA SFA (STATE FORESTRY ADMINISTRATION), PARA EL MONITOREO DE LOS BOSQUES DE CHINA. ....	- 19 -
CUADRO 5. CÓDIGOS EN BASE A LA NATURALEZA DEL AGENTE CAUSAL DEL DAÑO. ....	- 25 -
CUADRO 6. VALORES DE SEVERIDAD PARA PLANTAS PARÁSITAS Y EPÍFITAS. ....	- 25 -
CUADRO 7. GRADO DE DESCOMPOSICIÓN DEL MATERIAL LEÑOSO, BASADO EN CARACTERÍSTICAS FÍSICAS. ....	- 29 -
CUADRO 8. RELACIÓN ENTRE EL TAMAÑO DEL MATERIAL LEÑOSO Y TIEMPO DE RESPUESTA. ....	- 32 -
CUADRO 9. FACTOR DE CORRECCIÓN POR PENDIENTE PARA EL CÁLCULO DE LA CARGA DE MATERIAL LEÑOSO CAÍDO. ....	- 34 -
CUADRO 10. RESULTADOS DEL CÁLCULO DE LA CARGA DEL MATERIAL LEÑOSO CAÍDO. ....	- 37 -
CUADRO 11. AGRUPACIÓN DE LOS PRINCIPALES AGENTES DE DAÑO EN BOSQUES TEMPLADOS. ....	- 41 -
CUADRO 12. VALORES ESTADÍSTICOS DE LOS ÍNDICES Y <i>MLC</i> ( <i>IDW</i> <sub>2</sub> ). ....	- 45 -
CUADRO 13. VALORES ESTADÍSTICOS DE LOS ÍNDICES Y <i>MLC</i> ( <i>IDW</i> <sub>3</sub> ). ....	- 45 -
CUADRO 14. MATRIZ DE CORRELACIÓN, ÍNDICES VS <i>MLC</i> ( <i>IDW</i> <sub>2</sub> ). ....	- 46 -
CUADRO 15. MATRIZ DE CORRELACIÓN, ÍNDICES VS <i>MLC</i> ( <i>IDW</i> <sub>3</sub> ). ....	- 47 -
CUADRO 16. MATRIZ DE CORRELACIÓN, ( <i>IDW</i> <sub>3</sub> ). ÍNDICES VS AGENTES CAUSALES BIÓTICOS, <i>BIOT</i> . ....	- 47 -

CUADRO 17. MATRIZ DE CORRELACIÓN, ( $IDW_3$ ). ÍNDICES VS AGENTES CAUSALES	
ABIÓTICOS, <i>ABIO</i> .....	- 48 -
CUADRO 18. MATRIZ DE CORRELACIÓN, $MLC(IDW_{2 \vee 3})$ VS <i>BIOT</i> Y <i>ABIO</i> . ....	- 49 -

## 1. INTRODUCCIÓN

Los bosques son ecosistemas que proveen beneficios básicos y servicios como madera, medicamentos, alimentos, agua, empleos, purificación del aire que respiramos, reducción en la concentración de gases efecto invernadero y conservación de la biodiversidad. Sin embargo, en algunas áreas, las crecientes demandas de la sociedad han puesto en riesgo la salud y la sostenibilidad de los ecosistemas forestales. Entre los principales agentes estresantes destacan las plagas y enfermedades, la contaminación, las prácticas de manejo no sostenible y el cambio climático (Kolb *et al.*, 1994).

La medición de la magnitud del impacto, duración y temporalidad de estos, aunado a factores antropogénicos que alteran los procesos ecosistémicos, no son elementos fácilmente cuantificables y, por ende, requieren de parámetros que permitan evaluar y monitorear la salud forestal, lo que conlleva el establecimiento de criterios e indicadores que, aunados al estudio de sus correlaciones, posibilita tener más elementos en la toma de decisiones, tendientes a un manejo forestal sostenible.

Es por lo anterior, que en 1992 se celebró en Rio de Janeiro “La Cumbre para la Tierra o Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (CNUMAD)”, haciendo un llamado a todos los países e instándolos a garantizar el desarrollo sustentable, incluyendo el manejo apropiado de todos los tipos de bosques (Naciones Unidas, 1992).

Después de la CNUMAD, Canadá organizó un Seminario Internacional de Expertos sobre Desarrollo Sustentable de los Bosques Boreales y Templados. Este seminario, que tuvo lugar en Montreal en 1993, se concentró específicamente en criterios e indicadores, y en cómo éstos pueden ayudar a definir y medir los progresos en materia de manejo sustentable de los bosques. El Proceso de Montreal como es conocido hoy, comenzó en junio de 1994 en Ginebra, Suiza, con la primera reunión del Grupo de trabajo sobre criterios e indicadores. Los países miembros, incluido México, conforman

el 90% de los bosques templados y boreales, así como el 49% de todos los bosques y 58% de los bosques plantados (Montréalprocess.org., 1994).

En su sexta reunión del Grupo de Trabajo que tuvo lugar en Santiago, en la República de Chile (febrero de 1995), diez países acordaron un conjunto detallado de criterios e indicadores para la conservación y adaptación duradera de los bosques. Esta declaración de adhesión lleva por nombre la "Declaración de Santiago" (Montréalprocess.org., 1994).

Los países miembros ratificaron la declaración que comprende un conjunto amplio de siete criterios aplicables en el ámbito nacional y 67 indicadores destinados a guiar a las autoridades encargadas de formular las políticas, los administradores forestales y al público en general sobre estrategias que permitan la conservación y el manejo forestal sustentable de los ecosistemas templados y boreales (Montréalprocess.org., 1994), estos criterios, son:

- Conservación de la diversidad biológica.
- Mantenimiento de la capacidad productiva de los ecosistemas forestales.
- Mantenimiento de la sanidad y vitalidad de los ecosistemas forestales.
- Conservación y mantenimiento de los recursos suelo y agua.
- Mantenimiento de la contribución de los bosques al ciclo global del carbono.
- Mantenimiento y mejoramiento de los múltiples beneficios socioeconómicos a largo plazo.
- Marco legal, institucional y económico para la conservación y el manejo sustentable de bosques.

Es importante señalar que los criterios se caracterizan por ser un conjunto de indicadores relacionados, que son medidos periódicamente permitiendo evaluar el cambio. A su vez el indicador es la medición de un aspecto del criterio. Una variable

cuantitativa o cualitativa que puede ser evaluada de forma continua o descrita, y que cuando se observa periódicamente, muestra tendencias. Los indicadores, son:

- Fragmentación. Impacta en la conservación de la biodiversidad biológica.
- Características dasométricas. Condición de copa, incrementos en volumen.
- Sequia. Interacciona con otros factores como incendios y plagas. Tienen a disminuir el crecimiento y reduce la capacidad fotosintética.
- Incendios. El grado de afectación depende de la frecuencia e intensidad.
- Bioindicadores de O<sub>3</sub>. Ocasiona daños foliares, disminución del crecimiento, susceptibilidad a insectos y patógenos.
- Plagas y enfermedades. Causan mortandad y reducción del vigor del árbolado.
- Material muerto caído*. Estimación del material orgánico muerto, es decir, todo aquel material, carente de tejido vivo que yace en el suelo forestal, determinándose como un indicador de hábitat para la vida silvestre, combustible y captura de carbono.
- Propiedades físicas del suelo forestal. Contribución en el ciclo de carbono, tasa de erosión y compactación de suelo.
- Captura de carbono en suelo forestal. Estima, junto con otros datos, la tasa y cantidad de secuestro de carbono, lo que permite coadyuvar, significativamente, en la disminución del efecto invernadero.

Derivado de los acuerdos establecidos por los países firmantes han hecho esfuerzos en el establecimiento de los criterios e indicadores señalados con anterioridad. En 2003, Argentina, Australia, Canadá, Chile China, Japón, República de Corea, México, Nueva Zelandia, Rusia y Estados Unidos, presentan el primer reporte. No obstante, en 2009, solo Australia, Canadá, China (2013), Japón, República de Corea, Nueva Zelandia, Rusia y Estados Unidos (2011), presentan el segundo reporte.

Sin embargo, a pesar de ser México un país firmante de la "Declaración de Santiago" en su primer reporte (2003), específicamente para el criterio 3, expone y describe solo estadísticas de entidades gubernamentales, sobre superficie afectada y saneada en el periodo 1995-2002, así como los principales agentes que inciden en el deterioro de las masas forestales, principalmente en los ecosistemas templados. En el año 2009, México no presenta el segundo informe ante el grupo de trabajo.

Es por lo anterior que, en el marco de los trabajos de la Comisión Forestal para América del Norte (COFAN), el grupo de trabajo sobre Insectos y Enfermedades de los Bosques y Plantas Invasivas, se establecen los canales de comunicación e intercambio técnico que permitieran implementar criterios e indicadores, con objeto de conocer el estado de salud de los ecosistemas forestales de México.

Los esfuerzos de la COFAN para establecer los criterios e indicadores dan frutos con la incorporación de dos indicadores; Condición de copa y Daños al árbolado en la remediación realizada por el Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) en el año 2013 y, su posterior análisis realizado por Alvarado-Rosales y Saavedra-Romero (2014).

No obstante, en el desarrollo de los análisis de los datos obtenidos en las remediciones 2012 y 2013, surge la necesidad de establecer índices compuestos que integran las variables absolutas de cada indicador, y que fueron incorporadas en el análisis de la remediación 2014 del INFyS, por Alvarado-Rosales *et al.*, (2016).

Sin embargo, el grado de salud de un ecosistema forestal, depende de la interacción de factores bióticos, abióticos y cada vez en mayor grado, de los antropogénicos. Es por lo anterior que, ante este panorama multifactorial, se rompe con el paradigma de que la salud de un ecosistema forestal está ligado a la presencia-ausencia de plagas o enfermedades que afectan principalmente el estrato arbóreo. Con este rompimiento de la visión tradicional, emerge la necesidad de establecer nuevos indicadores de salud forestal y analizar la correlación que tienen entre sí, lo que permitiría entender e incrementar el conocimiento, sobre cómo evaluar, conservar e incrementar la salud de los ecosistemas forestales en México.

En el ámbito nacional, no existen estudios sobre el tema que nos ocupa, de hecho, el tema de salud forestal bajo un concepto de integración de diversos factores, bióticos y abióticos, es incipiente en México, enfocado solo a la presencia – ausencia de plagas y/o enfermedades.

Referente al uso de variables absolutas e indicadores de salud forestal, estas son utilizadas por Saavedra-Romero (2016), con objeto de probar la implementación de indicadores de salud forestal en áreas verdes urbanas, siendo este, el único estudio conocido.

En el ámbito internacional, la información referente a los indicadores de salud forestal, es mucho más amplia, tanto en estudios como en temporalidad, abarcando temas cuyo interés se ha incrementado en los últimos años, pudiendo señalar como ejemplo, el estudio de las comunidades liquénicas como bioindicadores (Jaramillo, 2010; McCune, 2000); la condición de copa como indicador de la salud forestal (Eichhorn *et al.*, 2016); el material fino caído, cuya descomposición es una vía importante de los flujos de nutrientes y determina la materia orgánica aportada a los suelos forestales y tiene una fuerte influencia sobre la productividad del bosque y el estado nutricional del suelo (Ukonmaanaho *et al.*, 2016).

De forma más específica en el tema investigación, Shawn *et al.*, (2013) señala, que los residuos leñosos (woody debris), han recibido más atención en los últimos años, ante la necesidad de cuantificar los cambios del carbón almacenado en los ecosistemas forestales. Otras líneas de investigación analizan el efecto del microclima y el cambio climático, sobre la descomposición de los residuos maderables (Russell *et al.*, 2014).

## 2. OBJETIVOS

General:

El presente estudio pretende determinar el nivel de correlación entre la carga del Material Leñoso Caído (**MLC**) y tres índices compuestos de salud en los ecosistemas templados de México: Índice de pérdida total de copa (**IPTC**), índice de cantidad relativa de copa (**ICRC**) e índice de severidad de daño (**ISD**), correspondientes a Condición de copa y Daños al árbolado, los cuales están definidos como indicadores de salud forestal y cuya información, en su conjunto, estaba disponible en la remediación del INFyS, para el año 2014.

Específicos:

- a) Determinar el nivel de correlación entre los valores de pixel obtenidos, a nivel nacional, de las coberturas ráster, correspondiente a la carga del material leñoso caído, (**MLC**), versus los valores de los índices compuestos (**IPTC**, **ICRC** e **ISD**), derivado de la información del remuestreo Nacional y Estatal del INFyS, (2014) y su posterior análisis.
  
- b) Análisis e interpretación de los resultados de las matrices de correlación entre las variables **MLC** versus **IPTC**, **ICRC** e **ISD**.

## 3. HIPÓTESIS

**Ho:** No existe correlación entre el **MLC** y los índices compuestos de la condición de salud de bosques templados: **IPTC**, **ICRC** e **ISD**.

**Ha:** Hay correlación entre **MLC** y los índices compuestos de copa (**IPTC**, **ICRC**) e **ISD**, como indicadores de la salud de bosques templados.

## 4. MARCO DE REFERENCIA

### 4.1. Plagas y enfermedades

En el 2014, se registró una superficie de 101,561 ha dañadas por algún tipo de plaga y/o enfermedad, concentrándose, principalmente, en las entidades de Jalisco, Chihuahua y Oaxaca con un 39.8%, (INEGI, 2015), superando la superficie de 8,840 hectáreas de cobertura arbórea, afectadas por incendios (Comisión Nacional Forestal, 2015).

Acorde con los resultados de obtenidos por Alvarado-Rosales *et al.*, (2016), en el Análisis de la Información obtenida en el remuestreo Nacional y Estatal 2014 del INFyS, de los indicadores de la condición de la salud de los bosques y selvas, en 16 Entidades Federativas de México, establece que los agentes de daños al árbolado con mayor incidencia son: insectos defoliadores con un 26.14% y factores ambientales como el viento (26.14%) y fuego (21.27%), si bien, señala que el rubro de afectación por “desconocido” tiene un 10.59%, considera que es un dato que refleja la necesidad de establecer una capacitación constante, que permita incrementar el conocimiento sobre síntomas y signos de los agentes causales más comunes, lo que permitirá, así mismo, mayor certidumbre en la toma de datos de campo por parte de las brigadas (Alvarado-Rosales *et al.*, 2016).

Sin embargo, cuando se acota el análisis a bosques templados (Figura 1), los datos cambian significativamente, siendo el fuego, el factor de mayor afectación con 71.01%, seguido de “desconocido” (8.05%) y *Tillandsia spp.* (4.24%). Es importante señalar, que la afectación por descortezadores representa el 1.2%, superado solo por plantas parásitas con el 3.02% (Alvarado-Rosales *et al.*, 2016), lo que nos lleva a presuponer que los principales agentes de daño causan una degradación de la salud de los bosques de forma lenta, constante y poco evidente, lo que incrementa la susceptibilidad y vulnerabilidad de las especies forestales al ataque de insectos descortezadores, defoliadores y barrenadores, cuyos daños son más evidentes, por los cambios en la estructura y coloración de la copa del organismo afectado.

# Bosques templados de México.

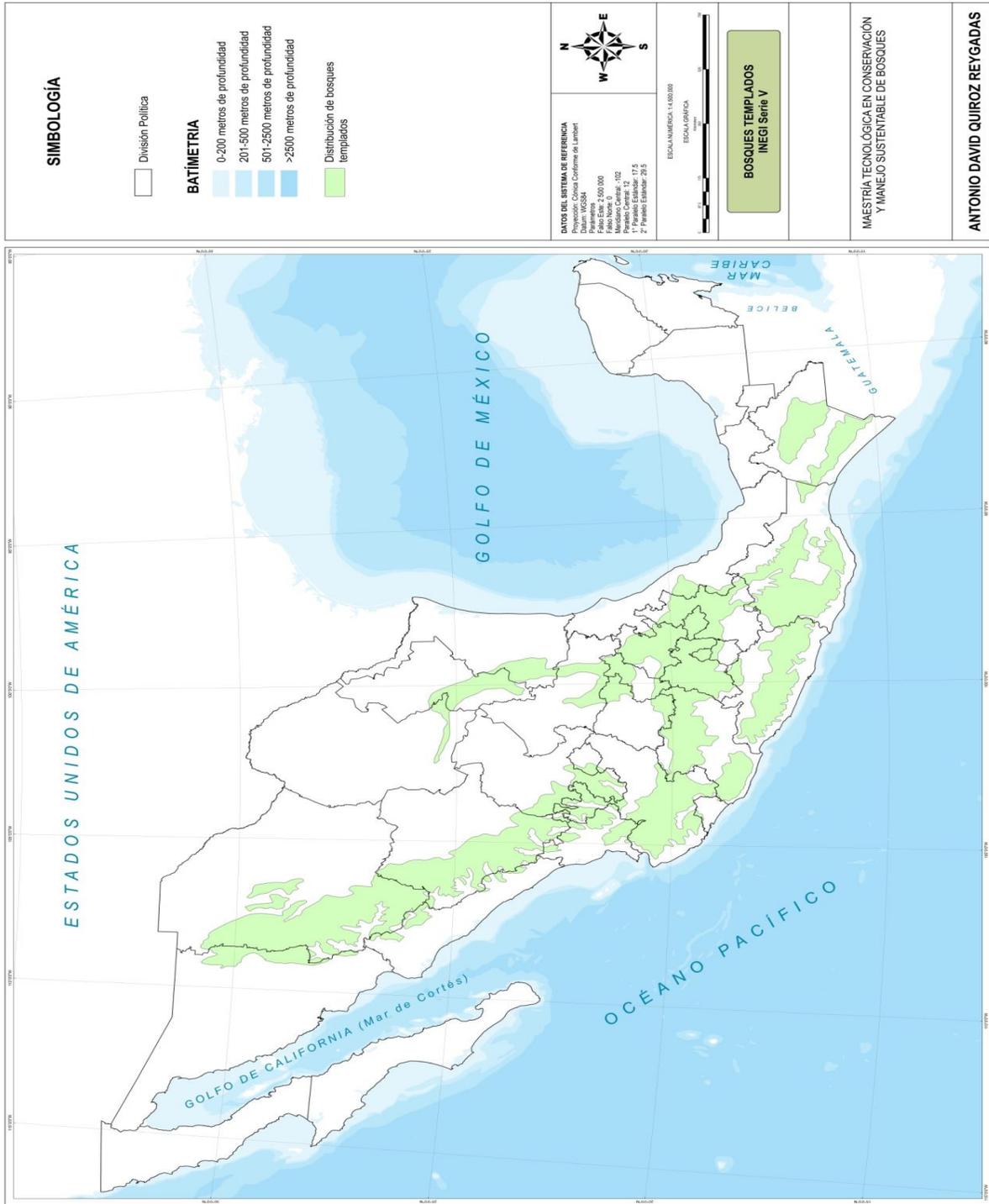


Figura 1. Distribución de los Bosques Templados en México. Uso de suelo y Vegetación, Serie V INEGI.

Considerando el grado de vulnerabilidad que presente el árbolado ante el ataque de insectos barrenadores, defoliadores y descortezadores, éste puede presentar resistencia al ataque, siempre y cuando no se encuentre bajo condiciones de estrés por factores bióticos o abióticos (Finley y Chhin, 2016).

Cabe señalar que cuando el hospedante se encuentra bajo condiciones de estrés, los descortezadores causan extensas afectaciones y altos niveles de mortalidad, por ende, pérdida de superficie forestal. Aunado a la pérdida de nichos ecológicos indispensables, para el establecimiento y conservación de la fauna silvestre, así como los bienes y servicios que se obtienen de los ecosistemas forestales.

#### **4.2. Salud Forestal**

El concepto de Salud Forestal se comenzó a utilizar en el contexto forestal y de manejo de recursos naturales, como un objetivo central para la condición futura de un bosque, dentro del manejo y aprovechamiento sustentable.

A pesar del amplio uso que ha tenido este término, frecuentemente es usado sin una claridad en su definición, lo que dificulta su aplicación en el manejo del bosque. Las diferentes definiciones y puntos de vistas de la salud forestal, no han sido discutidas a fondo. Debido al incremento en su uso y la importancia como un objetivo de manejo, profesionales forestales y en recursos naturales, aportaron conceptos y definiciones que permitieran establecer una definición y un entendimiento conceptual.

Kolb *et al.*, (1994), discute las diferentes definiciones de salud forestal, el problema de escala del concepto desde árboles individuales hasta ecosistemas y las relaciones entre salud forestal y manejo de plagas. Kolb señala que, en 1949, Aldo Leopold describió los síntomas de "áreas enfermas", basado en la reducción de la cobertura vegetal y erosión del suelo, resultante de la sobreexplotación del sitio. La implementación de prácticas "*saludables*" puede permitir la sustentabilidad de condiciones ecológicas y sus procesos, lo que permite conservar la integridad ecológica y la coevolución de la biodiversidad.

Otras definiciones más recientes la describen como "una condición donde factores bióticos y abióticos tiene influencia sobre el bosque, sin ser una amenaza para los objetivos del manejo presentes y futuros" (Douglas, 1994), es decir, el bosque es **saludable si satisface los objetivos del manejo y no saludable si no se logran los objetivos establecidos**. Sin embargo, esta definición ha sido criticada porque, por un lado, la salud forestal depende de los objetivos del manejo y, por otro lado, la salud forestal está bajo la consideración de los objetivos del manejo enmarcados en las nuevas filosofías de manejo de los ecosistemas. No obstante, nos lleva a un dilema cuando desde un punto de vista podemos decir que un bosque es saludable, pero bajo otros criterios podría no serlo (Kolb *et al.*, 1994), lo que provoca problemas para generar una definición de Salud Forestal.

Esto se complica más cuando son áreas forestales con múltiples objetivos de conservación y manejo, por lo que se propone simplificar los objetivos para un área específica y determinar su salud forestal, agrupando áreas o regiones con similitud de usos u objetivos.

Desde la perspectiva ecológica "un bosque saludable es una comunidad totalmente funcional de plantas y animales con su medio físico, estableciendo un balance" (Monning y Byler, 1992).

A nivel ecosistema se complica, en virtud que deberán ser considerados elementos como: producción primaria, ciclo de nutrientes, biodiversidad, fluctuación de las especies clave, estructura biótica e incidencia y severidad de plagas o enfermedades, en la mayoría de los ecosistemas esta información no está disponible. Es a través de programas de monitoreo y evaluación que podremos conocer la productividad de los ecosistemas forestales durante los diversos estados sucesionales, determinando su salud al considerar los patrones de afectación por plagas y enfermedades, tasas de cambio en la composición y estructura del bosque, junto con los factores abióticos que presentan una mayor incidencia como factores de disturbios.

Cuando nos movemos en diferente escala, surge el problema de aplicar el concepto de salud, entre la funcionalidad de un individuo (árbol), rodal o ecosistema forestal, lo que dificulta la utilización del concepto.

En el caso de un árbol podemos definir como no saludable "*a la desviación en el funcionamiento normal de una planta causada por algún tipo de agente persistente*" (Haskell *et al.*, 1992), evaluado bajo indicadores de condición de copa, tasa de crecimiento y signos externos causados por los agentes causales, tanto plagas como enfermedades. Sin embargo, la mortandad o condición no saludable de uno o varios árboles en un rodal, no puede ser indicativo de una condición no saludable, ya que no se requiere tener todos los árboles bajo una condición saludable, para mantener su función de protección de hábitats, suelo, agua y preservación de la biodiversidad, de hecho, los árboles muertos pueden ser parte de un rodal saludable.

Estas diferentes visiones no necesariamente causan conflictos, si se aplican diferenciadas en el manejo de masas forestales, estableciendo áreas con diferentes objetivos, estructuras, niveles de manejo, que satisfagan un rango de demandas requeridas por la sociedad, manteniendo las especies nativas y todos los procesos del ecosistema, que proveen los recursos y hábitat para su supervivencia.

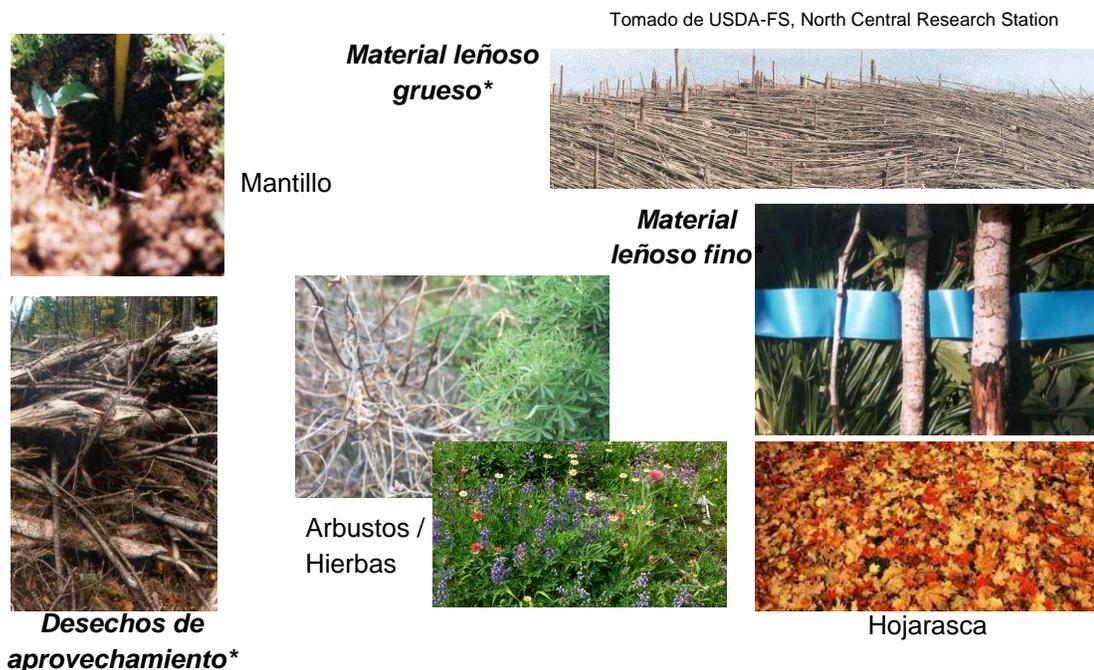
#### **4.3. Material leñoso caído**

El Material leñoso caído (Down Woody Material) es un componente importante de los ecosistemas forestales, el cual podemos observar disperso sobre el suelo forestal en diferentes estados de descomposición. Diversos especialistas y silvicultores, especialmente aquellos que utilizan al fuego como una herramienta silvícola, saben que el material leñoso caído es un elemento fundamental del comportamiento del fuego. No obstante, no debe verse solo como un elemento del triángulo del fuego, sino que además es un elemento que nos ayuda a describir lo siguiente:

- Calidad y estado del hábitat de vida silvestre.
- Diversidad estructural de un bosque.

- La cantidad de carbono capturado en la madera muerta.
- Almacenamiento, ciclo de nutrientes y del agua, elementos de importancia en la productividad del sitio.
- Características del suelo y sus vínculos con la salud forestal.
- Condiciones del hábitat.
- Condición post-afectación por plagas o enfermedades.

Este indicador estima el material leñoso proveniente de fustes, ramas y partes leñosas de árboles y arbustos muertos. El complejo de material muerto caído es definido en categorías bajo ciertos criterios como son: material leñoso grueso (Coarse Woody Material, *CWM*), leñoso fino (Fine Woody Material, *FWM*), hojarasca, hierba/arbustos, mantillo, humus y profundidad de la cama de material muerto, así como sus características, siendo las principales la carga, distribución de tamaños, compactación y continuidad (Figura 2) (Woodall y Williams, 2005).

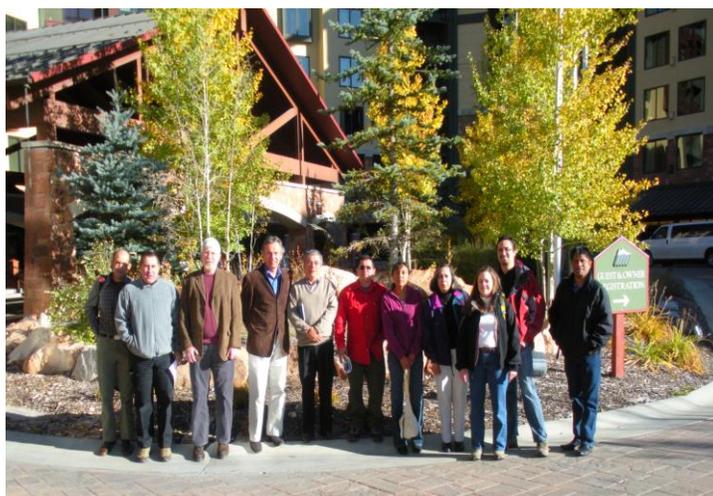


\* Elementos que son considerados, en el presente estudio, como: Material leñoso caído. Se considera todo elemento, proveniente del estrato arbóreo, que presenta tejido leñoso.

**Figura 2. Complejo del material muerto caído.**

## 5. ANTECEDENTES|

En México, con excepción de la información recabada por el Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS), no se ha llevado a cabo un monitoreo constante de la condición que guardan nuestros bosques y selvas, como es la salud de las poblaciones, comunidades y ecosistemas forestales, de cuyo óptimo funcionamiento no solo depende la calidad y cantidades de bienes y servicios que nos brindan sino además, la permanencia de las condiciones y requerimientos para el desarrollo de la fauna silvestre, todo esto en el marco de conservación de la biodiversidad, la cual México está catalogado como uno de los países con mayor número de especies a nivel mundial. Es ante esta necesidad, que en el marco de los trabajos de la Comisión Forestal para América del Norte (COFAN) y como parte de la necesidad de información, para integrar el informe ante el Grupo de trabajo del Proceso de Montreal, se impulsó la capacitación de personal técnico de la Comisión Nacional Forestal y de Investigadores del Colegio de Posgraduados, Campus Montecillo, a través de la asistencia a la reunión anual del Forest Inventory and Analysis (FIA), en octubre del año 2008 en la Ciudad de Park City, Estado de Utah. USA.



**Park City, 24 de octubre del 2008**

Derivado de la reunión del 2008 y como parte del compromiso de intercambio técnico entre ambos países, se realizó una reunión con los especialistas y



líderes de cada uno de los indicadores de salud forestal en abril del 2009, siendo sede la Ciudad de Guadalajara, Jalisco. México.

Posterior a esta reunión en el año 2010, expertos del Colegio de Postgraduados, asistieron a las oficinas del Forest Inventory and Analysis Headquarters, en Bristol, Virginia, con el objetivo de participar en el curso teórico-práctico que el FIA llevó a cabo, para la capacitación del personal técnico responsable de las remediciones a nivel Nacional, en Estados Unidos.

Después de diversos análisis y evaluaciones de las metodologías y procedimientos utilizados por el FIA, en la obtención de los Indicadores de Salud Forestal, se tomó la decisión de iniciar con dos índices en el marco de las remediciones llevadas por el INFyS: **Condición de Copa** (Schomaker *et al.*, 2007; Alvarado-Rosales *et al.*, 2012) y **Daños al Árbolado** (Alvarado-Rosales *et al.*, 2011).



Bristol, junio del 2010

En la remediación del INFyS correspondiente al 2012, se integran por primera vez la descripción y formatos de registro para las variables absolutas de los índices: **Condición de Copa y Daños al Árbolado**. Lo anterior conllevó la necesidad de

capacitación para las brigadas de las empresas participantes mediante la impartición de cinco cursos en las ciudades de Chetumal, Quintana Roo; San Miguel Regla, Hidalgo; Ciudad de Zacatecas, Zacatecas; Ciudad de Durango, Durango y Ciudad Guzmán, Jalisco, durante los meses de enero y febrero del 2012.



**Hidalgo**



**Jalisco**



**Zacatecas**

Con objeto de dar a conocer el trabajo que se está realizando a nivel mundial sobre los indicadores de salud forestal, se expone un cuadro comparativo realizado por Yang *et al.* (2015), entre los indicadores de salud forestal utilizados en Europa, Estados Unidos de Norteamérica y República de China (Cuadro 1), sin dejar de señalar que Canadá y Australia cuentan con programas similares.

Es importante señalar que las variables absolutas e indicadores de salud forestal en el INFyS, corresponden a los establecidos en el programa de Forest Health Monitoring por USDA- Forest Service de los Estados Unidos de Norteamérica, siendo estos los correspondientes a: Condición de Copa (Schomaker *et al.*, 2007) y Material leñoso caído (Woodall y Williams, 2005).

**Cuadro 1. Comparativo de indicadores de Salud Forestal utilizados por diferentes agencias gubernamentales, SFA<sup>+</sup>, EU/ICP\* y FHM<sup>o</sup>.**

Categorías	Indicadores		
	SFA	EU/ICP Forest	FHM
Vegetación	Crecimiento arbóreo	Crecimiento arbóreo	Condición de copa
	Condición de copa	Condición de copa	Material leñoso caído
	Fructificación y propagación	Química foliar	Diversidad vegetal
	-----	Tipo de vegetación	Comunidades líquénicas
	-----	Material leñoso caído	-----
	-----	Fenología	-----
	-----	Hojarasca	-----
Suelo	NA	Condición del suelo	Suelo forestal
		Química del suelo	
Factores ambientales	NA	Calidad de aire	NA
		Deposición de contaminantes	
		Meteorología	
Estrés	Nivel de riesgo	Daños inducidos por Ozono	Daños por ozono

+ State Forestry Administration of China (SFA).

\* European Union and the International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests (EU/ICP).

<sup>o</sup> Forest Health Monitoring program (FHM). U.S.A.

## 5.1. Variables absolutas

La medición de la copa ha sido ampliamente utilizada como un indicador de salud y vigor de los árboles, donde se ve reflejado el impacto de factores ambientales y antropogénicos, causantes de estrés y degradación de las masas forestales. Sin embargo, el impacto no solo se circunscribe a la masa arbórea, este se extiende a otros componentes del ecosistema forestal, como la fauna, sotobosque, suelo y su microfauna, etc. (Zarnoch *et al.*, 2004). La cantidad de biomasa en el follaje y su distribución en la copa, así como su distribución vertical, han sido relacionadas con los factores de estrés y calidad de sitio, respectivamente (Zarnoch *et al.*, 2004).

Es por lo anterior, que se establecieron las variables absolutas como una forma de evaluar, en campo, una determinada característica de la copa del árbol, lo que nos permitiría conocer el estado de salud y vigor, aunado al indicador de daño al arbolado.

## Condición de Copa

### Variables Absolutas

- Proporción de Copa Viva, PCV.
- Posición de Copa, PC.
- Exposición a la Luz, ExL.
- Densidad de Copa, DC.
- Transparencia de Copa, TC.
- Muerte Regresiva, MR.

## Daños al Árbolado

### Variables Absolutas

- Agente de Daño.
- Severidad de Daño.

## 5.2. Índices compuestos.

Se considera como índice compuesto, a todo elemento descriptivo de la estructura y condición de copa del árbolado, integrado por la combinación de dos o más variables absolutas. Lo anterior debido a la inferencia, de que dichas variables solo describen una característica de la estructura y condición de copa y, por ende, no reflejan la multiplicidad de aspectos que inciden en la distribución espacial y funcionalidad de la misma, la cual posee atributos tridimensionales (Zarnoch *et al.*, 2004).

Juknys y Augustaitis (1998), señalan que los índices compuestos pueden darnos información sobre la salud y crecimiento potencial del árbol. Bajo esta consideración, Yang *et al.* (2015) señalan que la State Forestry Administration of China (SFA), estableció tres índices compuestos: Condición de salud (Cuadro 2), evaluación del riesgo de impacto a la salud forestal (Cuadro 3) y función ecológica del bosque (Cuadro 4), con objeto de conocer la correlación entre factores ecológicos con la salud y función de los bosques.

**Cuadro 2. Índice de la condición de salud, establecido por la SFA (State Forestry Administration), para el monitoreo de los bosques de China.**

Variables	Clasificación			
	Saludable	Sub Saludable	Moderadamente saludable	No Saludable
Crecimiento arbóreo	Bien	Relativamente bien	Débil	Sin crecimiento
Condición de Copa	Tamaño y color Normal	Pequeñas áreas amarillentas o defoliación <10%	Parcialmente amarillento o defoliación del 10-30%	Severamente amarillento o defoliación >30%
Fructificación y propagación	Normal	Algunos impactos	Es restringida	No hay
Nivel de riesgo	Sin riesgo	Ligero	Medio	Alto

Tomado de: Yang *et al.* (2015)

**Cuadro 3. Índice del riesgo de impacto a la salud forestal, establecido por la SFA (State Forestry Administration), para el monitoreo de los bosques de China.**

Variables	Clasificación			
	Sin	Ligeramente	Medio	Alto
Plagas y enfermedades	Afectación menor al 10%	Afectación 10-29% de los árboles	Afectación 30-59% de los árboles	Afectación >60% de los árboles
Incendios Forestales	Sin desastres	Afectación <20% de los árboles, Buen crecimiento	Afectación >20-49% de los árboles, crecimiento restringido	Afectación >50% de los árboles, La mayoría moribundos o muertos
Desastres Naturales y otros	Sin desastres	Afectación <20% de los árboles	Afectación >20-59% de los árboles	Afectación >60% de los árboles

Tomado de: Yang *et al.* (2015)

**Cuadro 4. Índice de la función ecológica del bosque, establecido por la SFA (State Forestry Administration), para el monitoreo de los bosques de China.**

Variables	Grado			Peso
	1	2	3	
Crecimiento de volumen (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> ) <sup>a</sup>	≥150	149-50	<50	0.2
Grado de conservación	1, 2	3, 4	5	0.15
Estructura vertical	1	2	3	0.15
Composición de especies	C6, C7	C3, C4, C5	C1, C2	0.15
Cobertura total de la vegetación (%)	≥70	69-50	<50	0.1
Densidad del dosel	≥0.7	0.69-0.4	0.39-0.2	0.1
Altura promedio de los árboles (m)	≥15.0	14.9-5.0	<5.0	0.1
Grosor de la capa de hojarasca (cm)	≥10.0	9.0-5.0	<5.0	0.05

Tomado de: Yang *et al.* (2015)

Es bajo esta perspectiva, que surge la necesidad de integrar índices compuestos basados en los valores de las variables absolutas, obtenidas durante la remediación del INFyS en el año 2013, tanto para Condición de Copa como para Daños al Árbolado (Alvarado-Rosales *et al.*, 2013). Posteriormente, se incorporan los índices compuestos Índice de Pérdida Total de Copa (***IPTC***) e Índice de Cantidad Relativa de Copa (***ICRC***), al análisis de la remediación correspondiente al año 2014 (Alvarado-Rosales *et al.*, 2016), bajo las consideraciones descritas en los artículos de Juknys y Augustaitis. (1998) y Zarnoch *et al.* (2004).

Los índices compuestos son obtenidos mediante la integración de variables absolutas en ecuaciones, que nos permiten representar e interpretar biológicamente, de la mejor forma, el potencial del árbol para capturar y utilizar los elementos abióticos en crecimiento, siendo estos índices, los más aceptados en el proceso de monitoreo de la salud forestal (Zarnoch *et al.*, 2004).

### **5.2.1. Índice de Pérdida Total de Copa (*IPTC*).**

Juknys y Augustaitis (1998), expresan que la disminución de la densidad de la copa, y el incremento en la transparencia y la muerte regresiva (pérdida de follaje, ramas y brotes), se debe a factores internos en la estructura del bosque, como la competencia, aunado a factores externos, tales como contaminación, enfermedades, plagas, etc.

Cabe señalar que tanto la Densidad de Copa, así como la Transparencia de Copa y Muerte Regresiva, son variables absolutas incorporadas en los remuestreos del INFyS.

$$IPTC = 100 - [(100 - DCp) * (100 - MRi)/100 * (100 - TCi)/100]$$

Donde:

**DCp** = Perdida de densidad de copa (%)

$$DCp = (DCn - DC)/DCn * 100$$

*DCn* = Valor promedio (%) obtenido de los mejores árboles por especie, INFyS\*.

*DC* = Densidad de copa (%) - valor absoluto

**MRi** = Incremento de Muerte Regresiva (%)

$$MRi = [(MR - MRn)/100 - MRn] * 100$$

*MRn* = Valor promedio (%) obtenido de los mejores árboles por especie, INFyS\*.

*MR* = Muerte regresiva (%) - valor absoluto

**TCi** = Incremento en Transparencia de Copa (%)

$$TCi = [(TC - TCn)/100 - TCn] * 100$$

*TCn* = Valor promedio (%) obtenido de los mejores árboles por especie, INFyS\*.

*TC* = Transparencia de copa (%) - valor absoluto

Considerando la formula anterior, e incorporando los valores obtenidos en la remediación del INFyS, Alvarado-Rosales *et al.*, (2016), obtuvieron la distribución del Índice de Pérdida Total de Copa (***IPTC***), para los ecosistemas templados (Figura 3).

# Índice de Pérdida Total de Copa, IPTC.

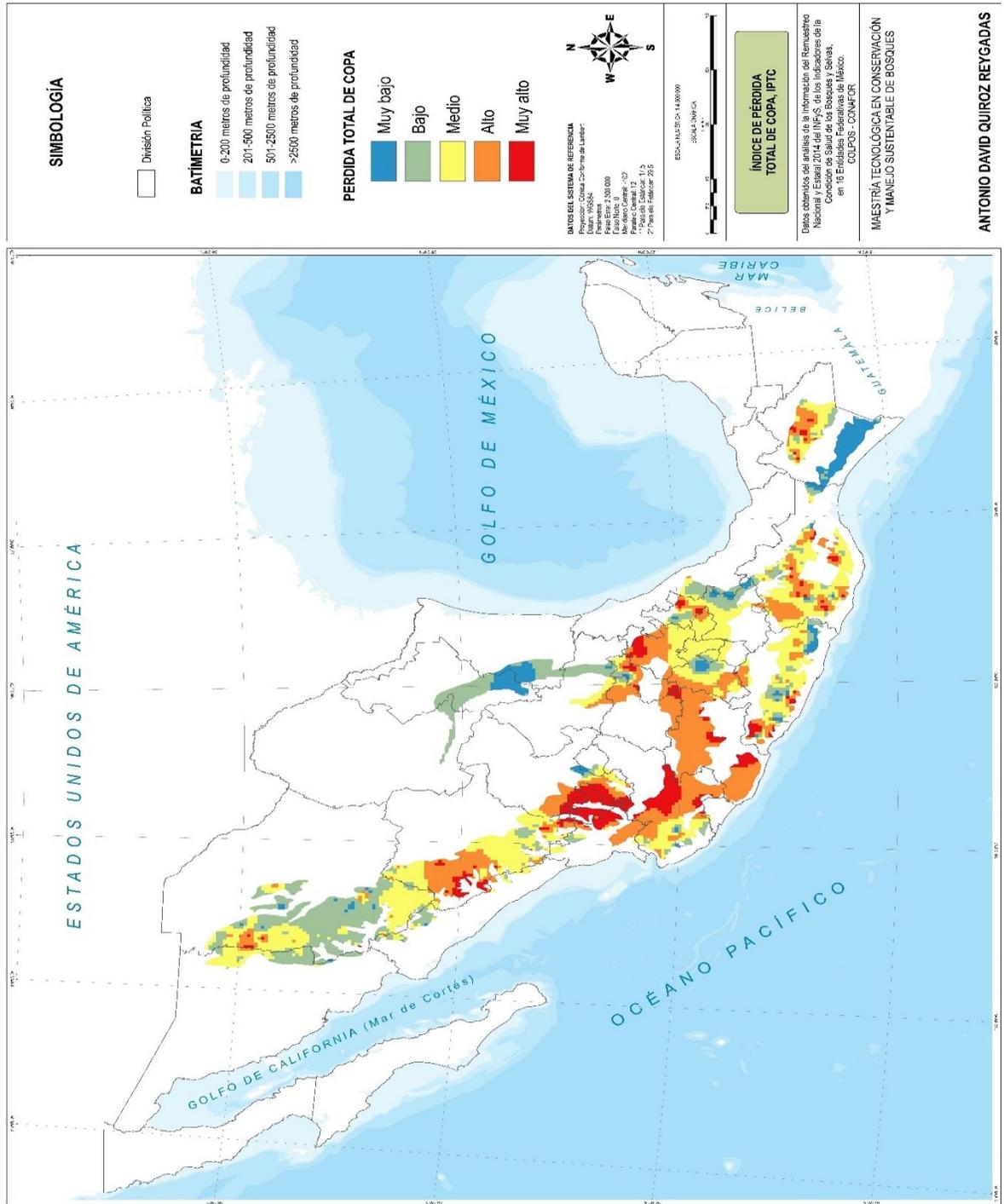


Figura 3. Índice de Pérdida Total de Copa en bosques templados, correspondientes a 18 Entidades Federativas. INFYS 2014.

### 5.2.2. Índice de Cantidad Relativa de Copa (*ICRC*).

Juknys y Augustaitis (1998), consideran que el *ICRC* es el índice de copa que integra la mayoría de las variables absolutas tanto cualitativas como cuantitativas.

$$ICRC = ICSC * \frac{DCn}{100} * (100 - IPTC) / 100$$

Donde:

*ICSC* = Indicador compuesto de superficie de copa (m<sup>2</sup>)

$$ICSC = DiaC * LC * \pi * 0.33$$

Donde:

$$LC = AT \left( \frac{PCV}{100} \right), \text{ longitud de copa (m)}$$

Donde:

*AT*= altura total

*PVC*= Proporción de Copa Viva

*DiaC* = Diámetro de copa (m)- indicador primario

$$\pi = 3.1416$$

*DCn* = Valor promedio (%) obtenido de los mejores árboles por especie, INFyS (2014).

*IPTC* = Indicador compuesto de Pérdida total de copa (%).

Alvarado-Rosales *et al.*, (2016), obtuvieron la distribución del Índice de Cantidad Relativa de Copa (*ICRC*), para los ecosistemas templados (Figura 4).

Se considera que árboles con valores altos de **proporción de copa viva no compactada y densidad de copa**, así como bajos valores de **muerte regresiva y transparencia de follaje**, tienen un mayor potencial de fijación de carbono, reservas de nutrientes, lo que les permite tener un mayor coeficiente de sobrevivencia y reproducción, (Schomaker *et al.*, 2007).

# Índice de Cantidad Relativa de Copa, ICRC.

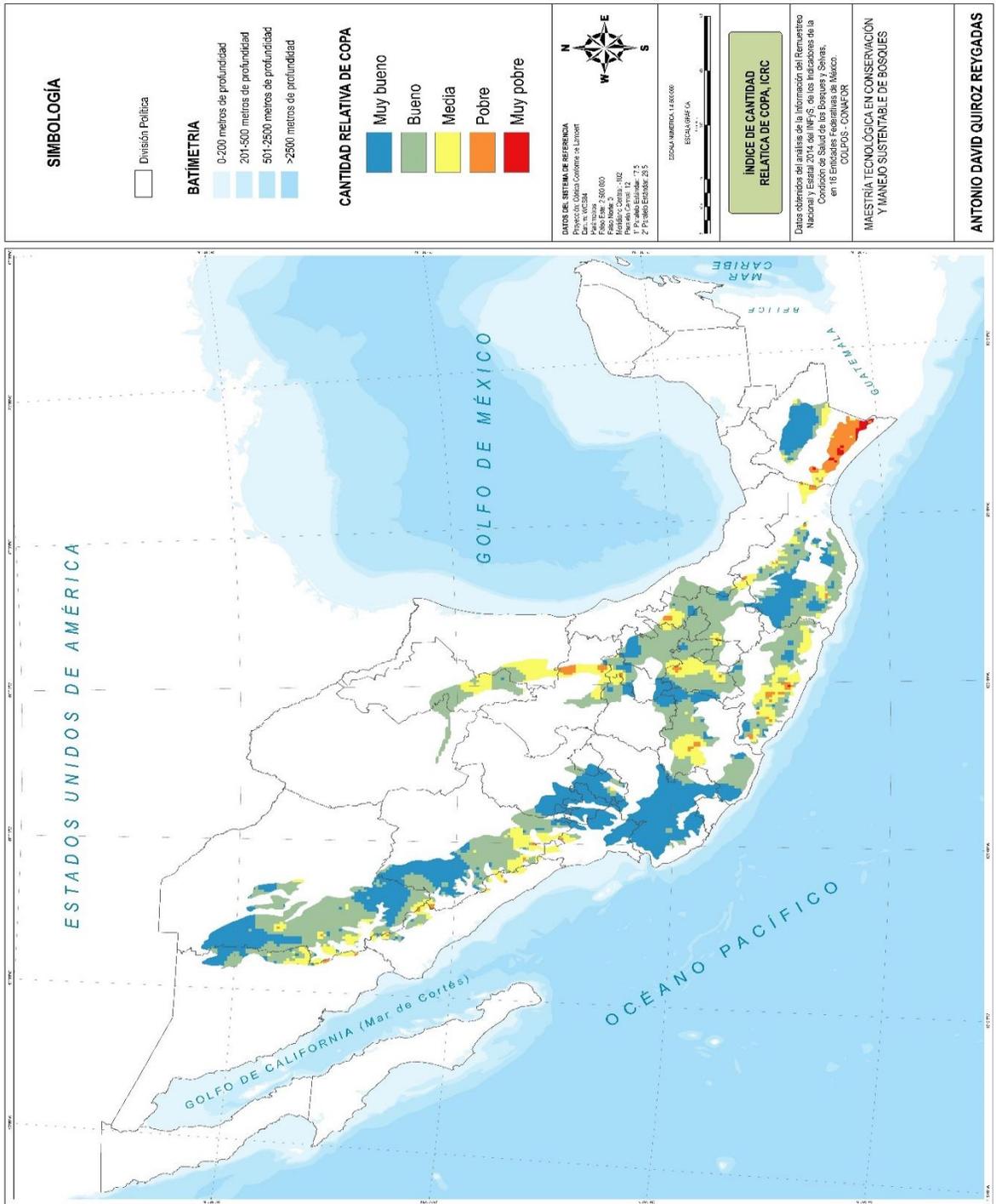


Figura 4. Índice de Cantidad Relativa de Copa en bosques templados, correspondientes a 18 Entidades Federativas. INFyS 2014.

Saavedra-Romero (2015), señala que diversos autores consideran como árboles saludables, aquellos que presentan las siguientes características: Proporción de copa viva >30%; Densidad de copa >50%; Transparencia de copa <30% y Muerte regresiva <5%.

Situación similar acontece con los índices compuestos de Pérdida Total de Copa (***IPTC***) e Indicador de Cantidad Relativa de Copa (***ICRC***), donde un incremento del ***IPTC*** conlleva un decremento del ***ICRC***, provocando una disminución del vigor debido a una menor capacidad fotosintética, que incide en la salud del árbol, factor que determina el grado de susceptibilidad y vulnerabilidad ante el ataque de plagas o enfermedades forestales.

### **5.2.3. Índice de Severidad de Daño (*ISD*).**

Alvarado-Rosales *et al.*, (2016), obtuvieron los valores descriptivos para el ***ISD***, para cada árbol presente en los cuatro sitios del conglomerado, a partir de tres componentes: naturaleza del agente causal (Cuadro 5), localización del daño (Figura 6) y severidad, cuando se cuente con este dato, como en el caso de plantas parásitas (Cuadro 6). El índice de severidad de daño se describe a partir de los datos del remuestreo 2014 y se muestran en la Figura 5. Conforme a la metodología presentada por Alvarado-Rosales *et al.* (2013), el índice de severidad de daño (***ISD***) se determina de la siguiente forma.

La asignación de códigos para la naturaleza del agente de daño se establece de la siguiente manera: para agentes que atacan la raíz y cuello se les asigna el valor de **3**, a los que atacan tronco y ramas **2** y los de follaje **1** (Cuadro 5). En cuanto a la localización del daño, se asigna un valor de **4** cuando éste se presenta en raíz y cuello, **3** cuando se presenta en tronco, **2** en ramas y **1** en follaje (Figura 6).

**Cuadro 5. Códigos en base a la naturaleza del agente causal del daño.**

<b>Códigos</b>	<b>Agente de daño</b>
<b>3</b>	Descortezadores (11 000) <i>Dendroctonus</i> spp. (11 001)
<b>2</b>	Barrenadores (12 000) <i>Hypsipyla grandella</i> (12 001) <i>Chrysobothris yucatanensis</i> (12 002)
<b>1</b>	Defoliadores (13 000)
<b>3</b>	Enfermedades de Raíz y Tocón (21 000) <i>Phytophthora cinnamomi</i> (21 001) <i>Ganoderma</i> spp. (21 002) <i>Heterobasidion annosum</i> (21 003) <i>Armillaria</i> spp. (21 004)
<b>2</b>	Cancros (no royas) (22 000) Cancro resinoso ( <i>Fusarium circinatum</i> ) (22 001) Royas de tronco y ramas (23 000) <i>Cronartium quercuum</i> (23 000) Hongos pudridores de árboles vivos (24 000) <i>Phellinus</i> spp. (24 0001)
<b>2</b>	Plantas parásitas (25 000) <i>Arceuthobium</i> spp. (25 001) <i>Phoradendron</i> spp. (25 002) <i>Psittacanthus</i> spp. (25 003) <i>Struthanthus</i> spp. (25 004) Enfermedades del Follaje (26 000) Epífitas (29 000) <i>Tillandsia</i> spp. (29 001)
<b>1</b>	Animales (27 000) Roedores (27 002)
<b>3</b>	Ocoteo (28 001) Fuego (30 001) Sequía (30 004)

**Cuadro 6. Valores de severidad para plantas parásitas y epífitas.**

<b>Agente causal</b>	<b>Severidad</b>
Muérdagos enanos	1 a 6 (con base en la escala de Hawksworth, 1996).
Muérdagos verdaderos y epífitas	5-35% valor 1; 40-70% valor 2; mayor a 75% valor 3

# Índice de Severidad de Daño, ISD.

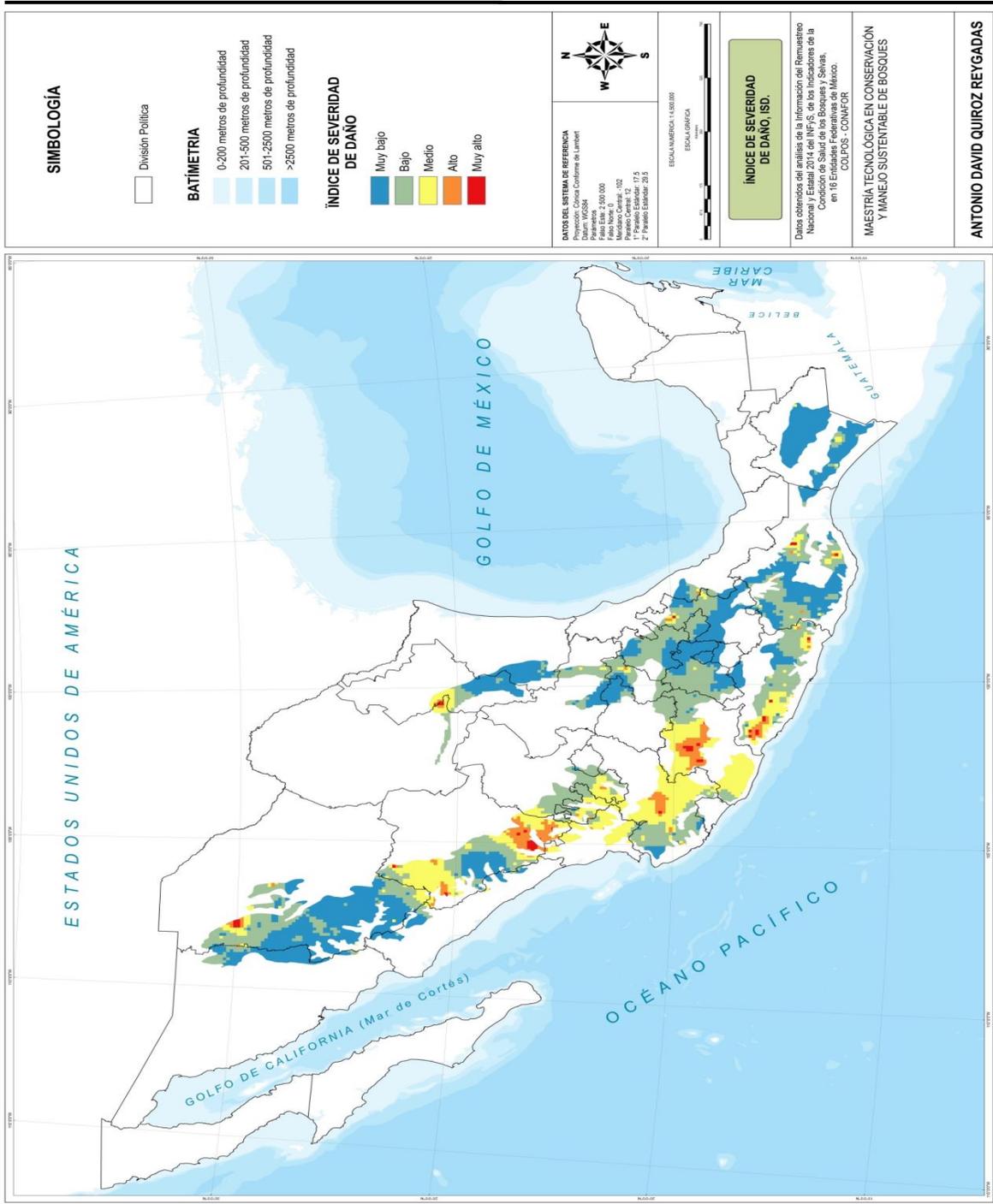


Figura 5. Índice Severidad de daño en Bosques Templados, correspondientes a 18 Entidades Federativas. INFyS 2014.

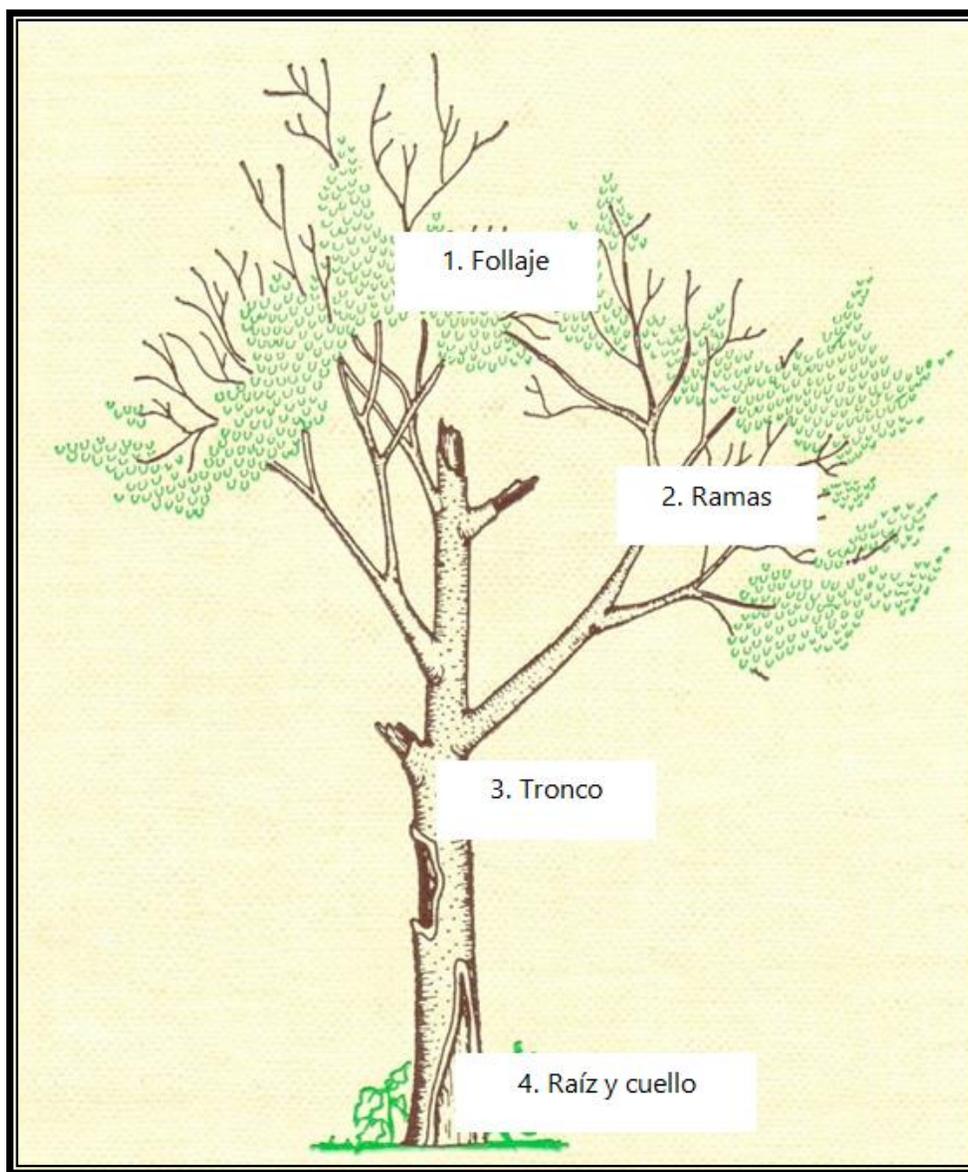


Figura 6. Códigos de acuerdo a la localización del daño (Tattar, 1989).

Se utiliza la siguiente fórmula cuando no exista el dato de severidad:

$$ISD = (\text{Naturaleza del agente causal} \times \text{Localización del daño})$$

Se utiliza la siguiente fórmula para plantas parásitas y epífitas:

$$ISD = (\text{Naturaleza del agente} \times \text{Localización del daño} + \text{Severidad})$$

## 6. MATERIALES Y MÉTODO

Es importante señalar que el presente trabajo se llevó a cabo con los datos derivados de la remediación del INFyS 2014 y de los estadísticos obtenidos del análisis realizado por Alvarado-Rosales *et al.* (2016)

El tipo del conglomerado utilizado por el INFyS, corresponde a una “Y invertida” de forma circular. La unidad de muestreo es un conglomerado integrado por 4 unidades circulares de registro o sitios equidistantes del centro a cada 45.14m, cuya distribución se observa en la Figura 7

Con el propósito de obtener los datos que permitan la estimación de la carga de material leñoso forestal en toneladas por hectárea, su distribución y estructura, el INFyS lleva a cabo la metodología de intersecciones lineales, donde se establecen cuatro transectos de 15 metros de longitud, dirigidos hacia los cuatro puntos cardinales.

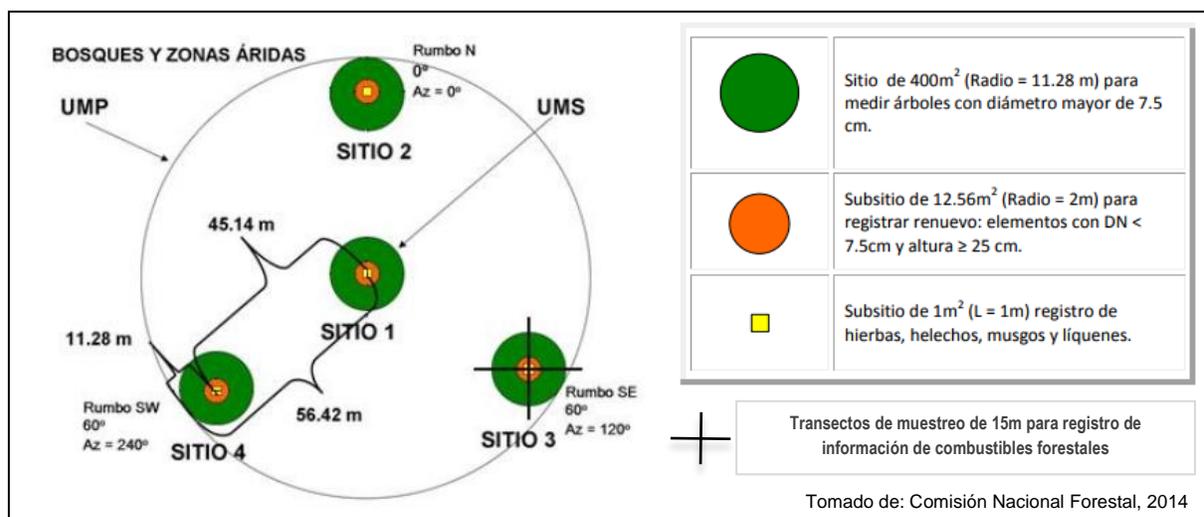


Figura 7. La unidad de muestreo utilizada por el INFyS, en la remediación 2014.

El muestreo se realiza partiendo del centro del sitio 3, en caso de inaccesibilidad se lleva a cabo en el siguiente sitio, siguiendo el orden 4, 2 y 1.

La toma de datos del material leñoso caído se hace a lo largo de los transectos, donde se debe de caminar del lado izquierdo visto del centro a la parte final del transecto y hacer los registros de información procurando hacerlo de manera consecutiva para alterar lo mínimo posible, la disposición original del material leñoso.

Se realiza la medición del material leñoso caído, considerando a todas las ramillas, ramas, troncos que se encuentran sobre la superficie y que estén acumulados al ras de suelo y hasta 2 metros de altura, siempre y cuando estén separados de su fuente original (no adheridos al tronco) y carentes de tejido vivo, estableciendo el grado de descomposición acorde a características presentes en el material leñoso y, que se describen en el Cuadro 7.

**Cuadro 7. Grado de descomposición del material leñoso, basado en características físicas.**

Partes del tronco o rama	Grado de descomposición (características)				
	1	2	3	4	5
Corteza	Intacta	Intacta	La corteza se está cayendo o está ausente	Separada o ausente	Separada o ausente
Acículas/Hojas	Presentes	Ausentes	Ausentes	Ausentes	Ausentes
Ramas	Ramas finas presentes	Ramas largas presentes, sistema de ramas entero	Ramas grandes presentes	Ramas grandes presentes, pero muy reducidas	Separada o se remueven fácilmente del tronco
Integridad estructural	Dura	Dura	La mayor parte dura, pero comienza a podrirse	La mayor parte podrida, el centro con frecuencia se mantiene duro	Completamente podrido, puede tener algunas pequeñas secciones duras
Forma	Circular	Circular	Circular	Circular tendiendo a oval	Oval - no definida

Tomado de: Comisión Nacional Forestal, 2014.

La información obtenida del INFyS de los conglomerados que tuvieron mediciones para material leñoso caído (**MLC**), correspondió solo a 199 conglomerados, como observamos en la Figura 8, sin embargo, el universo de remediación anual para las zonas de templadas de México corresponde a 2,253 conglomerados (Figura 9).



**Figura 8. Distribución de conglomerados en bosques templados, con evaluación de material leñoso caído (MLC). INFyS 2014.**



**Figura 9. Universo de Conglomerados correspondientes a la remediación 2014, del INFyS.**

## 6.1. Cama de material muerto caído

Los principales parámetros que conforman la cama de combustibles son: a) material leñoso caído, b) distribución en tamaños, c) compactación y d) continuidad. El término compactación se refiere a la cercanía entre las partículas. Albini y Brown (1978), consideran que la compactación puede ser estimada en función de la profundidad y la carga de material muerto caído. Sin embargo, debido a que la información que se utilizó corresponde a la remediación del Inventario Nacional Forestal y de Suelos 2014, los datos solo están referidos a la cuantificación del material leñoso caído, por lo que los parámetros de distribución de tamaño, compactación y continuidad no son considerados en la evaluación del presente estudio.

## 6.2. Material leñoso caído

Con objeto de obtener los valores en toneladas por hectáreas para cada uno de los conglomerados, donde se llevó a cabo la medición del material leñoso caído, se implementa la metodología de intersecciones lineales desarrollada por Warren y Olsen (1964).

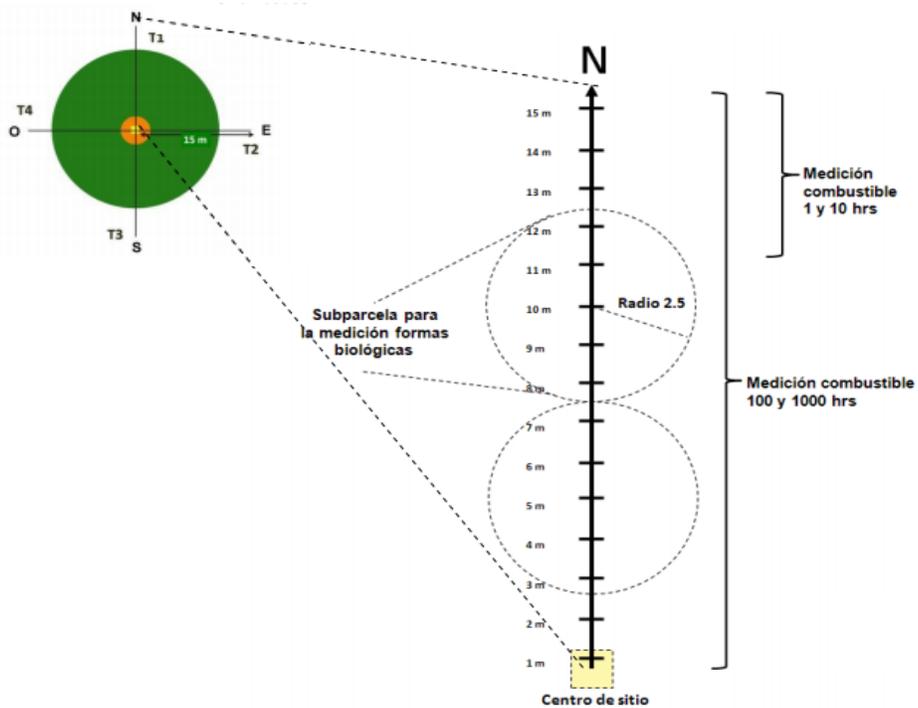
Varios autores (e.g. Anderson, 1982; Alvarado-Rosales, 1986) clasificaron a los combustibles leñosos en cuatro categorías de tiempo de respuesta: **1, 10, 100 y 1000 horas**, con base en el tiempo respuesta que tienen éstos a la fluctuación de la humedad ambiental (Cuadro 8). **El tiempo de respuesta** es el lapso en el que el combustible pierde dos tercios (63.2%) de la diferencia, entre su contenido de humedad inicial y su contenido de humedad de equilibrio con la humedad ambiental.

La **estimación de la carga** está en función del número de intersecciones de partículas en una línea, el diámetro cuadrático promedio, la horizontalidad de las partículas, la pendiente del terreno, el número de líneas muestreadas y su longitud (Figura 10). La carga está referida al peso por unidad de área. El material leñoso caído es evaluado *in situ*.

**Cuadro 8. Relación entre el tamaño del material leñoso y tiempo de respuesta.**

Clase (h)	Tiempo Promedio de Respuesta (h)	Diámetro (cm)	Categoría
1	0 a 2	0 a 0.5	Material leñoso fino
10	2 a 20	> 0.51 a 2.5	
100	20 a 200	> 2.51 a 7.6	
1000	200 a 2000	> 7.61	Material leñoso grueso

Tomado de: Anderson, H.E., 1982.



Tomado de: Comisión Nacional Forestal, 2014

**Figura 10. Esquema de medición del material leñoso caído en la remediación 2014, del INFyS.**

### 6.2.1. Cálculo de la carga del material leñoso caído.

Brown en 1974 establece la metodología para cuantificar, con base en la técnica de intersecciones lineares, la carga de materiales leñosos. Sin embargo, para el presente trabajo utilizamos las fórmulas de Sánchez y Zerecero (1983), que determinan la

cantidad de combustibles en toneladas por hectárea. Las ecuaciones utilizadas por clase son:

$$P_{clase\ 1} = \frac{0.484 * f * c}{n * l}$$

$$P_{clase\ 10} = \frac{3.369 * f * c}{n * l}$$

$$P_{clase\ 100} = \frac{36.808 * f * c}{n * l}$$

$$P_{clase\ 1000_{s/p}} = \frac{1.46 * d^2 * c}{n * l}$$

$$P_{clase\ 1000_{c/p}} = \frac{1.21 * d^2 * c}{n * l}$$

Donde:

$P$  = Carga de material leñoso, ton/ha.

$f$  = Frecuencia o número de intercepciones.

$c$  = Factor de corrección por pendiente.

$d^2$  = Suma de cuadrados de los diámetros del material leñoso.

$n$  = Número de líneas.

$l$  = Longitud de la línea de muestreo.

$nl$  = Suma de las longitudes de las líneas.

$s/p$  = Sin pudrición.

$c/p$  = Con pudrición.

El factor de corrección por pendiente (Cuadro 9), se calculó con la siguiente ecuación:

$$c = \sqrt{\frac{1 + [pendiente\ (%)]^2}{100}}$$

**Cuadro 9. Factor de corrección por pendiente para el cálculo de la carga de material leñoso caído.**

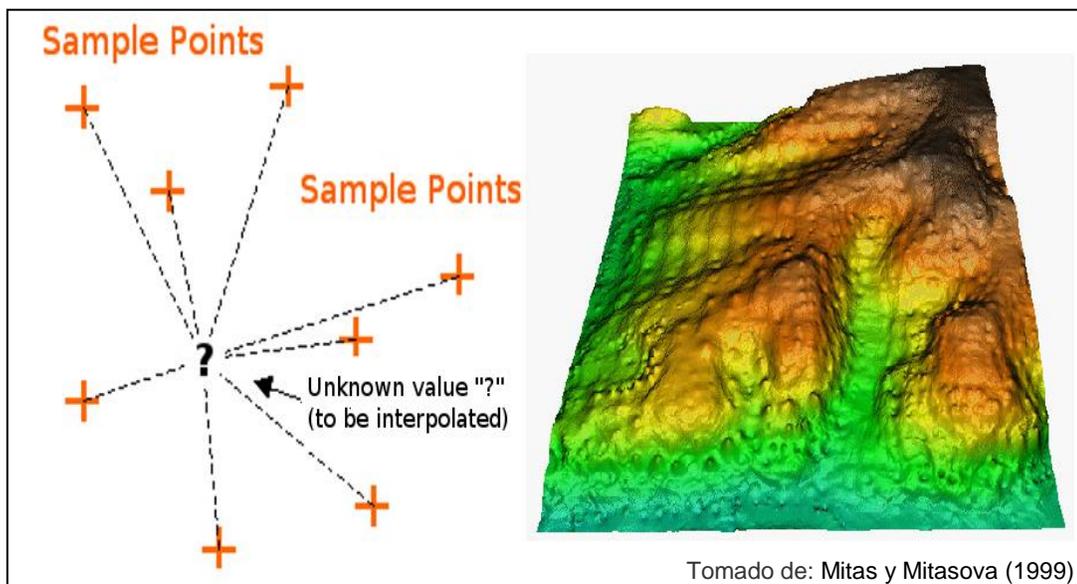
<b>Pendiente (%)</b>	<b>Factor de corrección C</b>	<b>Pendiente (%)</b>	<b>Factor de corrección C</b>
0	1.00	60	1.17
10	1.00	70	1.22
20	1.02	80	1.28
30	1.04	90	1.35
40	1.08	100	1.41
50	1.12	110	1.49

### **6.3 Interpolación *IDW* (Inverse Distance Weighting).**

Con los datos obtenidos en la remediación del INFyS 2014, del material leñoso por conglomerado, se llevó a cabo el proceso de interpolación mediante el procedimiento ***IDW* (Distancia Inversa Ponderada)** en ArcMap 10.3.1. El ***IDW*** es un proceso de interpolación que determina el valor de la celda por medio de una combinación lineal ponderada entre puntos de muestreo. El peso (weight) es una función del inverso de la distancia, por lo tanto, la superficie interpolada será una variable dependiente de la ubicación. En este método se asume que el valor de la variable irá en decremento dependiendo la distancia de ubicación del punto de muestreo. Por ejemplo, si tenemos puntos muestreados que indican áreas afectadas, conforme se aleje el dato respecto al valor original, su valor no será tan certero, debido a que en distancia se encuentra más lejos del valor de entrada. Con este concepto es posible manipular la influencia del parámetro “potencia” (Power).

El parámetro permite controlar la importancia de los puntos conocidos en los valores interpolados, en función de su distancia desde el punto de salida. Se trata de un número positivo, real, y su valor predeterminado es 2. Definiendo la “potencia” con un valor más alto que 2, un mayor énfasis será puesto en los puntos más cercanos. Por lo tanto, la información más cercana tendrá mayor influencia y la superficie tendrá más detalle (Figura 11). Es por ello que al ser un algoritmo que da peso a las distancias, se eligió para el modelado de las variables dasométricas del inventario.

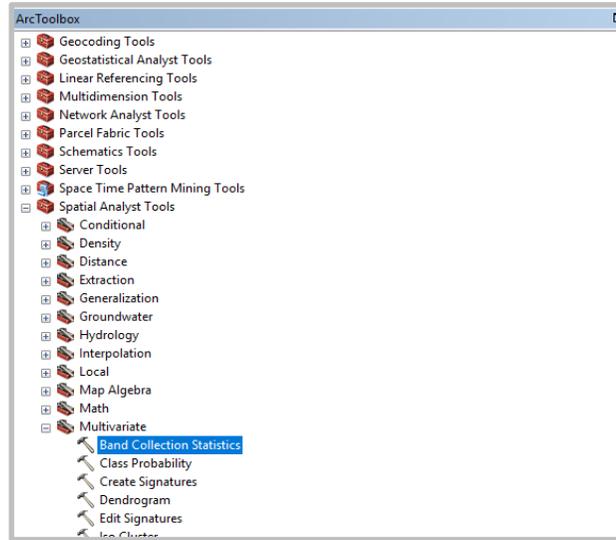
El **IDW** no es un proceso que esté relacionado con ningún proceso físico o biológico real, por lo que no hay forma de determinar el valor de potencia adecuado. Sin embargo, se tomaron dos valores bajo la consideración de utilizar el parámetro establecido por el software como predeterminado (potencia 2) y, el valor de potencia 3, utilizado en un proyecto anterior, en la obtención de áreas de riesgo para descortezadores en México, siendo este parámetro recomendado por el Servicio Forestal de Estados Unidos, en el proceso de interpolación.



**Figura 11. Esquema del proceso de Interpolación ponderada entre puntos de muestreo, establecida en el *Inverse Distance Weighting*.**

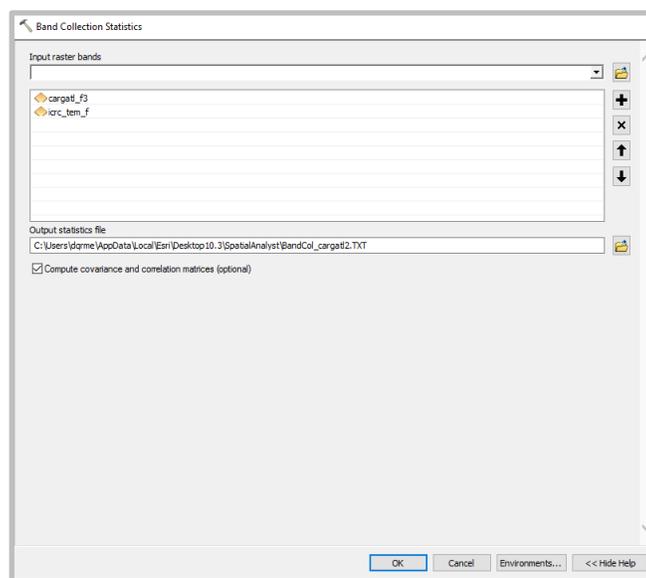
#### **6.4. Análisis del material leñoso caído.**

Con las coberturas raster para carga del combustible leñoso caído, obtenidas del proceso de interpolación de 199 conglomerados (Cuadro 10), en las regiones de bosque templado en México (Figura 1), se realizó el proceso “Band Collection Statistics”, ubicado en la subcarpeta Multivariate de Spatial Analyst Tools, como se señala en la Figura 12.



**Figura 12. Multivariate de Spatial Analyst Tools “Band Collection Statistics”.**

Después de ingresar, el programa solicita la definición de los valores de entrada “Input raster bands”, es decir, las coberturas que se pretende correlacionar y, la dirección donde se guardarán los resultados. Es importante señalar que se debe activar la casilla “Compute covariance and correlation matrices” (Figura 13), para que se genere la información en un formato de matriz.



**Figura 13. Ventana de ingreso de coberturas ráster.**

**Cuadro 10. Resultados del cálculo de la carga del material leñoso caído.**

No.	IdConglomerado	cargamy_t/ha	cargamn_t/ha	cargatl_t/ha	X	Y
1	17522	5.61	1.02	6.63	-108.0738882	28.01647222
2	37998	6.70	0.30	7.00	-105.7194716	24.22980489
3	25339	5.76	5.31	11.06	-107.70675	26.57727711
4	25581	9.32	1.84	11.16	-106.7468886	26.56219444
5	35340	10.07	1.80	11.87	-106.2795549	24.76497222
6	72411	12.86	1.41	14.27	-100.0791382	17.32588822
7	18760	10.47	4.20	14.67	-108.6213882	27.76774933
8	26447	5.08	9.91	14.99	-107.5421386	26.35836111
9	41079	11.62	3.64	15.26	-104.66625	23.57374933
10	71564	6.87	8.99	15.86	-99.88752744	17.50797222
11	62608	14.15	2.76	16.92	-99.48199933	19.084833
12	41454	7.87	9.38	17.25	-105.4024167	23.46880489
13	69975	8.41	9.08	17.49	-101.2984441	17.83738856
14	75139	6.11	11.60	17.70	-97.74641633	16.69441633
15	51113	15.06	2.78	17.84	-99.68397189	21.21888822
16	26926	6.00	14.26	20.27	-105.8296104	26.31808267
17	44338	13.68	8.69	22.37	-103.8668049	22.76824933
18	35111	18.46	4.22	22.68	-105.9843608	24.81708267
19	74442	11.60	11.29	22.90	-92.78183267	16.65022222
20	20575	18.88	4.47	23.35	-107.1346663	27.50497222
21	25121	12.74	10.64	23.38	-107.3487774	26.63722189
22	74940	5.70	19.82	25.53	-97.69805522	16.73827744
23	44328	18.47	8.41	26.88	-104.3548611	22.76191667
24	53922	25.49	1.56	27.05	-99.11502778	20.665
25	13349	18.27	8.84	27.11	-108.7202493	28.75977778
26	73086	24.38	3.65	28.03	-98.29586078	17.16047222
27	39451	20.54	8.62	29.16	-106.1543333	23.90458333
28	36480	23.49	7.06	30.55	-105.9763049	24.54480522
29	8916	22.69	10.15	32.83	-108.0016389	29.73599967
30	23512	14.12	18.92	33.04	-107.1130833	26.962
31	75146	15.49	17.97	33.46	-97.41511111	16.68355522
32	66329	16.82	17.22	34.04	-101.6745549	18.47180489
33	11506	31.92	2.50	34.42	-109.0522222	29.10686111
34	41257	29.22	5.34	34.56	-105.5478886	23.51230556
35	73260	6.20	28.73	34.93	-100.0339163	17.14855522
36	8901	28.92	8.79	37.71	-108.7731382	29.70427778
37	33171	30.49	7.81	38.29	-105.696583	25.18702744
38	68803	32.27	7.48	39.75	-101.2973052	18.0635
39	45883	12.37	28.00	40.38	-99.46919378	22.35022222
40	75750	39.67	2.75	42.43	-95.74161078	16.48830522
41	25333	29.43	13.14	42.57	-108.0076111	26.57136044
42	36693	39.81	3.06	42.87	-106.272416	24.49177744
43	77023	11.99	31.16	43.15	-92.594583	15.96083333
44	7852	8.94	34.63	43.57	-108.8936108	29.97155489
45	46538	32.47	12.35	44.82	-99.42394378	22.16797156
46	71555	34.13	11.43	45.56	-100.3081944	17.51583333
47	41477	6.31	39.50	45.81	-104.2707216	23.48938856
48	27106	13.64	32.46	46.10	-108.188833	26.19836078
49	42790	32.79	13.53	46.33	-104.5097222	23.16894378
50	76862	7.43	41.50	48.93	-95.98899967	16.18124933

Σ

194	34873	1464.38	90.75	1555.13	-106.0355274	24.86119444
195	74543	736.12	823.70	1559.82	-97.41444444	16.81994378
196	36699	1717.53	4.25	1721.78	-105.9720271	24.49647189
197	77539	666.10	1495.05	2161.15	-92.75183333	15.69997189
198	76833	1352.68	911.76	2264.44	-97.34052744	16.23108267
199	72782	2063.55	1504.76	3568.31	-92.61738822	17.00161111

Nota. carga\_my = carga de MLC mayores; carga\_mn = carga de MLC menores y carga\_tl = carga total

## 6.5. Correlación entre *MLC* vs *IPTC*, *ICRC* e *ISD*

Con base en el procedimiento señalado en la sección anterior, se llevó a cabo la correlación entre las coberturas ráster de las entidades señaladas en los recuadros, como se muestra en la siguiente figura:

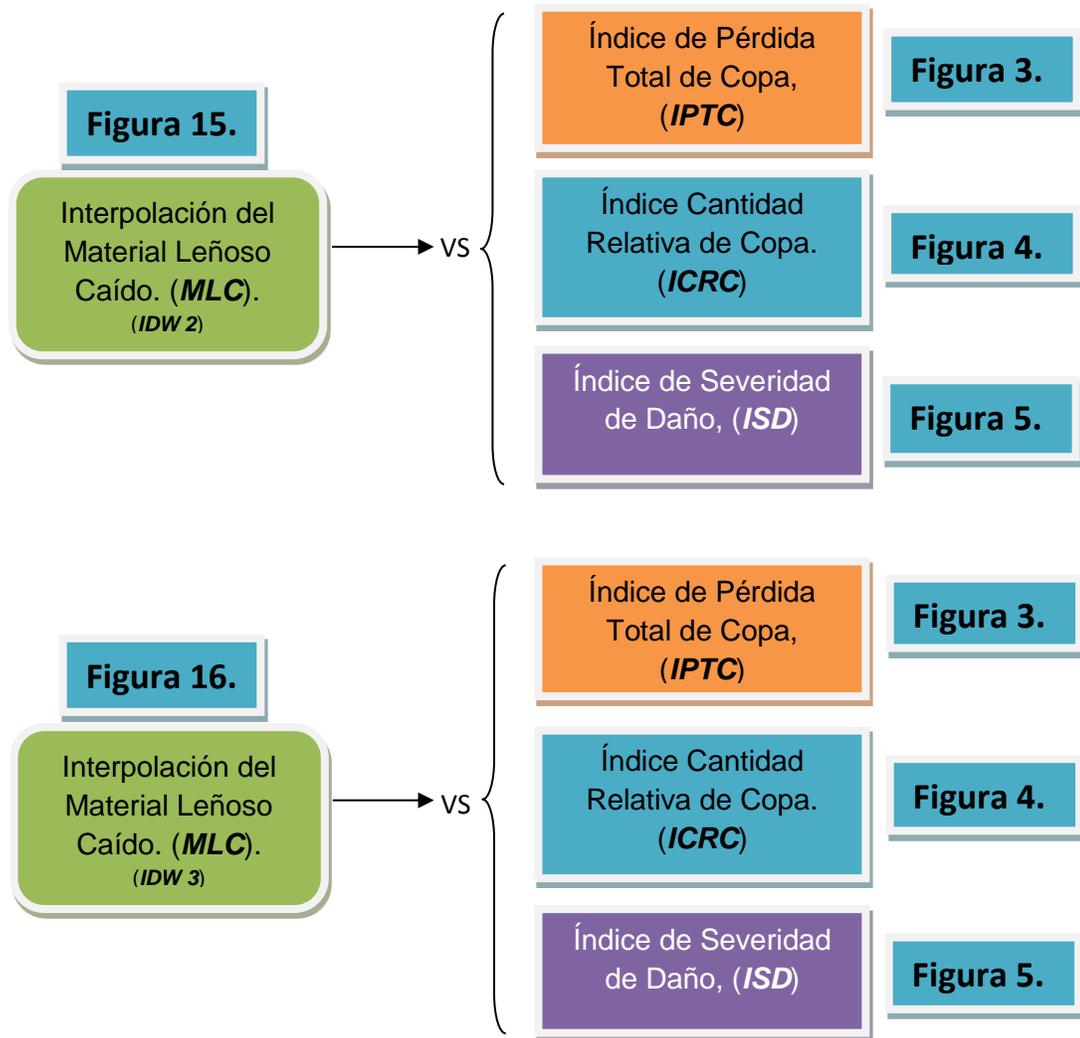


Figura 14. Diagrama de correlación entre material leñoso caído vs índices *IPTC*, *ICRC* e *ISD*.

El procedimiento se realizó para las coberturas raster obtenidas de la carga total de material leñoso caídos, tanto para el proceso de interpolación Distancia Inversa Ponderada (*IDW*) “potencia 2” como “potencia 3”. Figuras 15 y 16.

# Interpolación $IDW_2$ , Material Leñoso Caído, MLC.

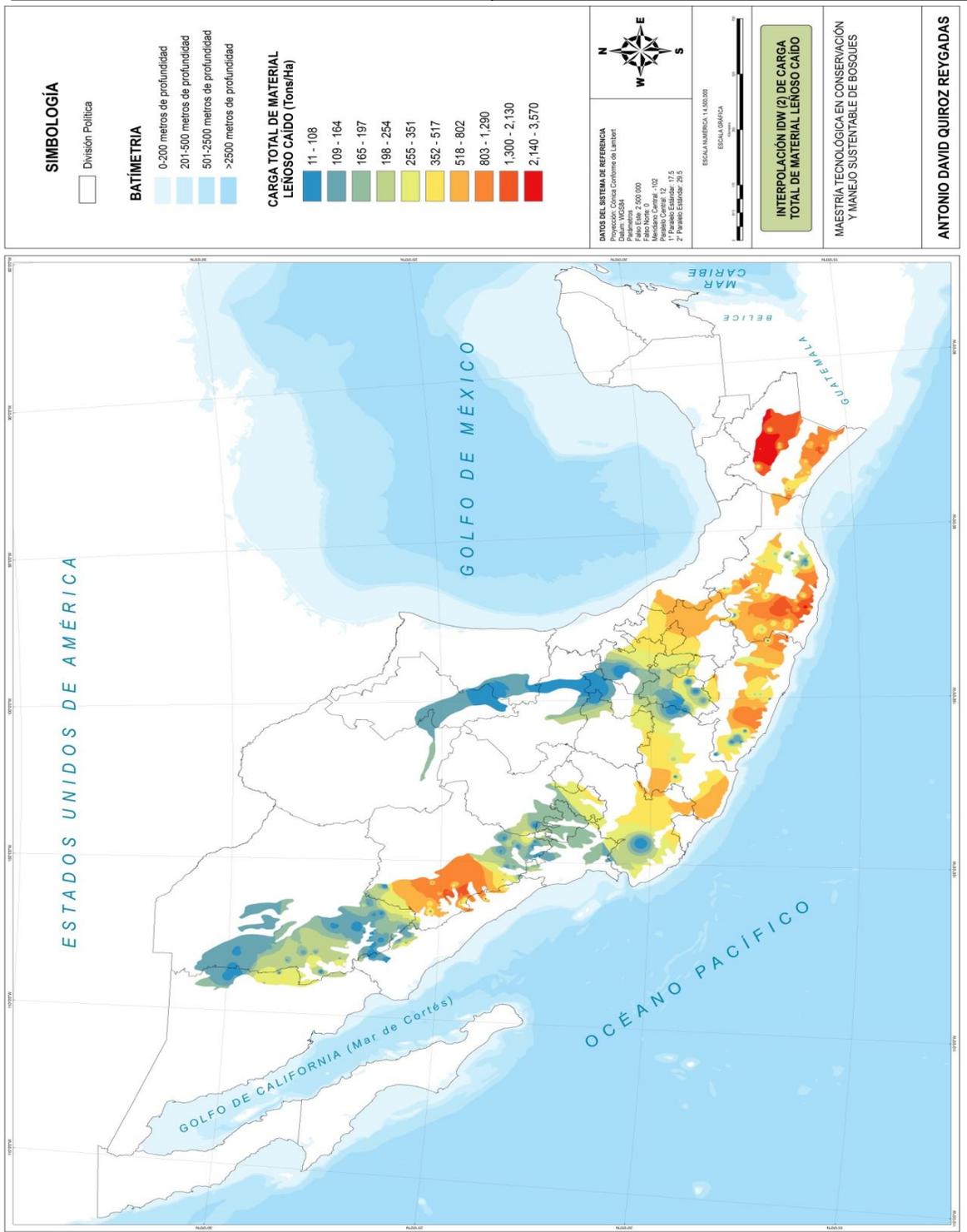


Figura 15. Interpolación  $IDW_2$ , Distribución de la carga total del Material Leñoso Caído.

# Interpolación $IDW_3$ , Material Leñoso Caído, MLC.

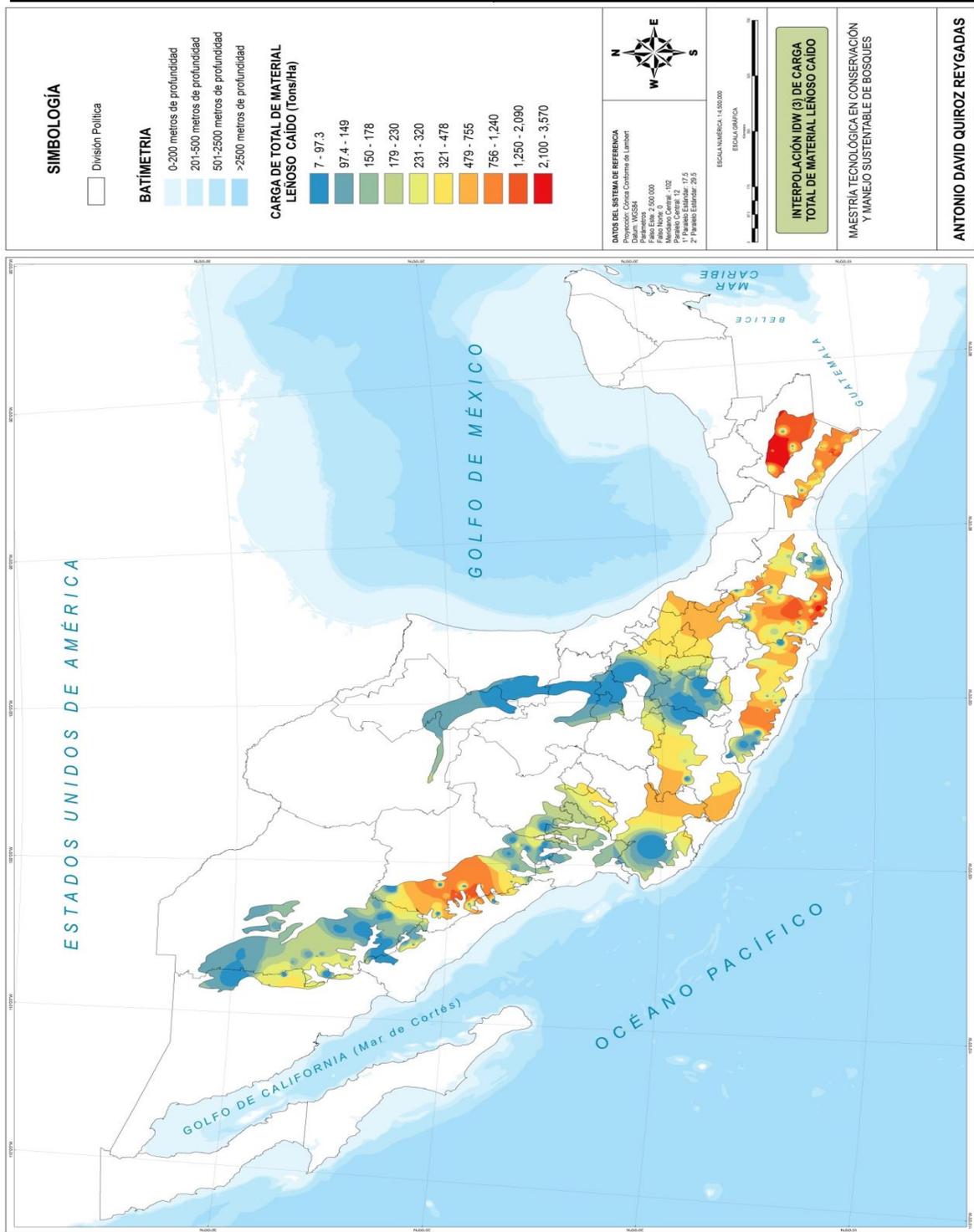


Figura 16. Interpolación  $IDW_3$ , Distribución de la carga total del Material Leñoso Caído.

## 6.6. Correlación entre índices vs agentes causales bióticos y abióticos

Continuando con los procedimientos de análisis anteriormente definidos, se exploró las posibles correlaciones y nivel de significancia entre los índices, Pérdida Total de Copa, Cantidad Relativa de Copa y Severidad de Daño, así como Material Leñoso Caído, versus la agrupación de diversos agentes causales establecida en dos grupos: **Bióticos y Abióticos** (Cuadro 11). Lo anterior, al considerar que esta agrupación permitiría visualizar correlaciones distintas, derivado del origen y características intrínsecas de cada grupo, enriqueciendo la descripción respecto al tipo de agente causal y su nivel de afectación, la cual se estableció sobre la cantidad de árboles afectados por cada uno de estos.

**Cuadro 11. Agrupación de los principales agentes de daño en bosques templados.**

<b>BIÓTICOS (BIOT)</b>	<b>ABIÓTICOS (ABIO)</b>
<i>Arceuthobium</i> spp.	Sequia
<i>Cancros (no royas)</i>	Viento
<i>Cronartium quercuum</i>	
<i>Epífitas</i>	
<i>Ganoderma</i> spp.	
<i>Hongos pudridores de árboles vivos</i>	
<i>Insectos barrenadores</i>	
<i>Insectos en general</i>	
<i>Phellinus</i> spp.	
<i>Phoradendron</i> spp.	
<i>Plantas parásitas y epífitas</i>	
<i>Psittacanthus</i> spp.	
<i>Royas de tronco y ramas</i>	
<i>Struthanthus</i> spp.	
<i>Tillandsia</i> spp.	

Es importante señalar que no se consideraron dentro de este análisis los siguientes agentes causales: Actividades humanas, afectación por animales, desconocido, enfermedades de follaje, insectos defoliadores, ocotéo, pastoreo y rayos. Lo anterior, debido a que se considera que no inciden en el incremento significativo del material leñoso. Los incendios tienen un papel preponderante sobre el material leñoso caído, ya que estos son los elementos de combustión en un incendio forestal y determinan su comportamiento e intensidad, teniendo como resultado la disminución de material leñoso en menor o mayor grado.

La correlación de los Índices (*IPTC*, *ICRC*, *ISD*) y *MLC* versus el grupo de agentes causales (*BIOT* y *ABIO*) (Figura 17), se realizó solo con la distribución de afectación obtenida de la interpolación *IDW* potencia 3, para ambos grupos. Figura 18 y 19.

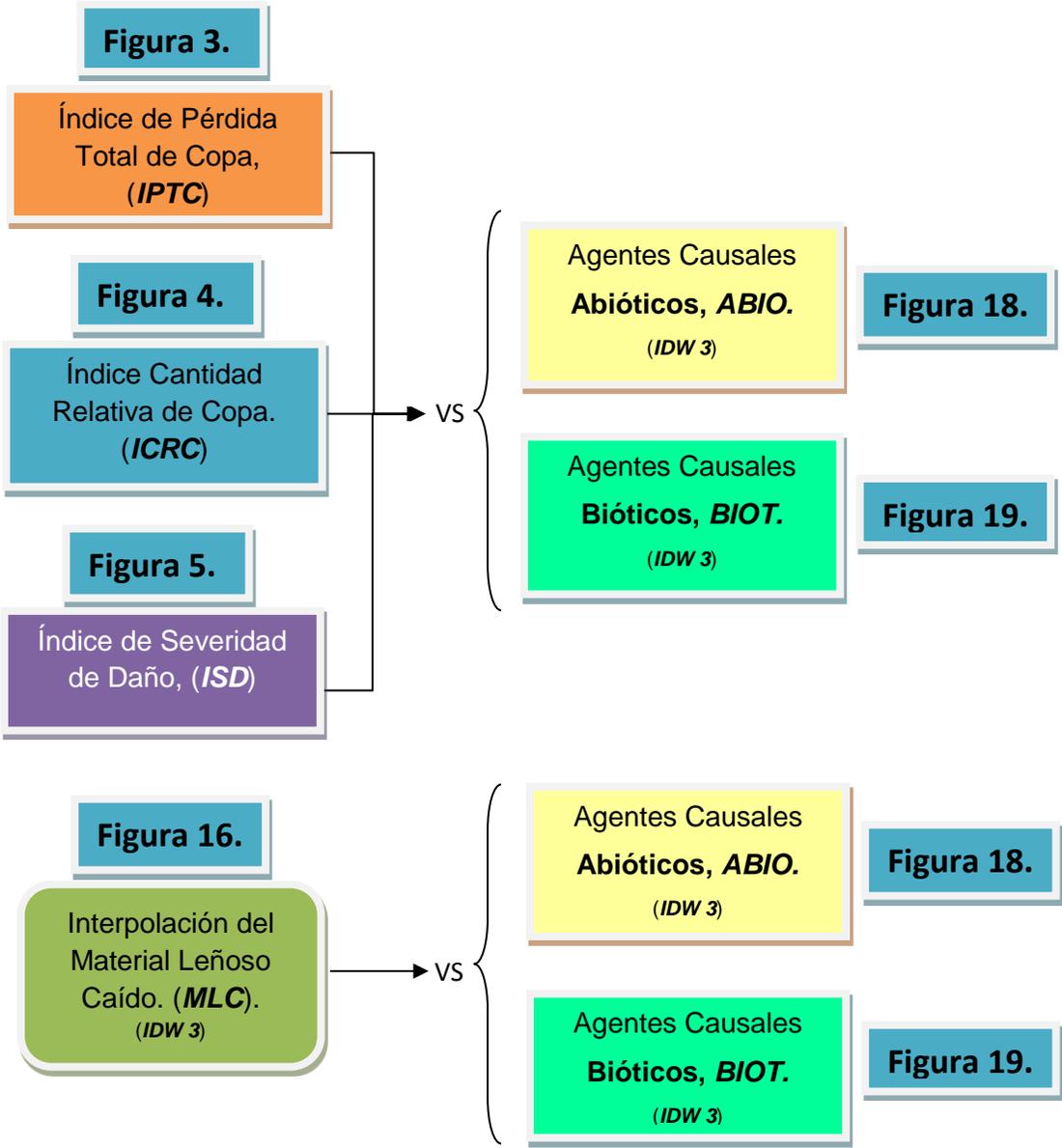


Figura 17. Diagrama de correlación entre índices y material leñoso caído vs agentes bióticos y abióticos (*IDW*<sub>3</sub>)<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Solo se presenta la interpolación *IDW*<sub>3</sub>, debido a que, al dar más peso a los puntos cercanos, presentó valores de correlación mayores con los índices y el material leñoso caído.

# Distribución de afectación por agentes abióticos

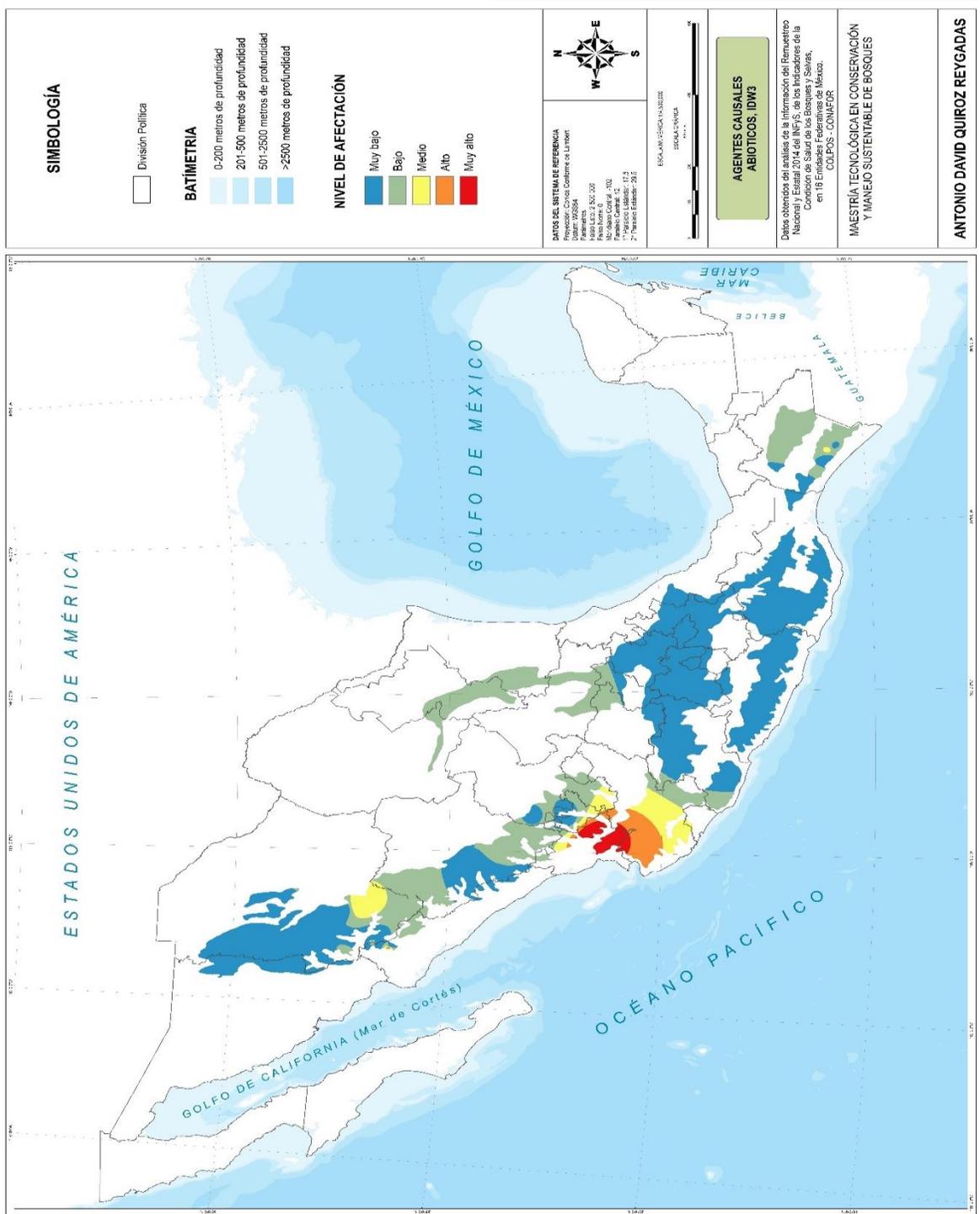


Figura 18. Distribución de afectación por agentes abióticos, con base en los datos obtenidos de la remediación 2014 del INFyS.

# Distribución de afectación por agentes bióticos

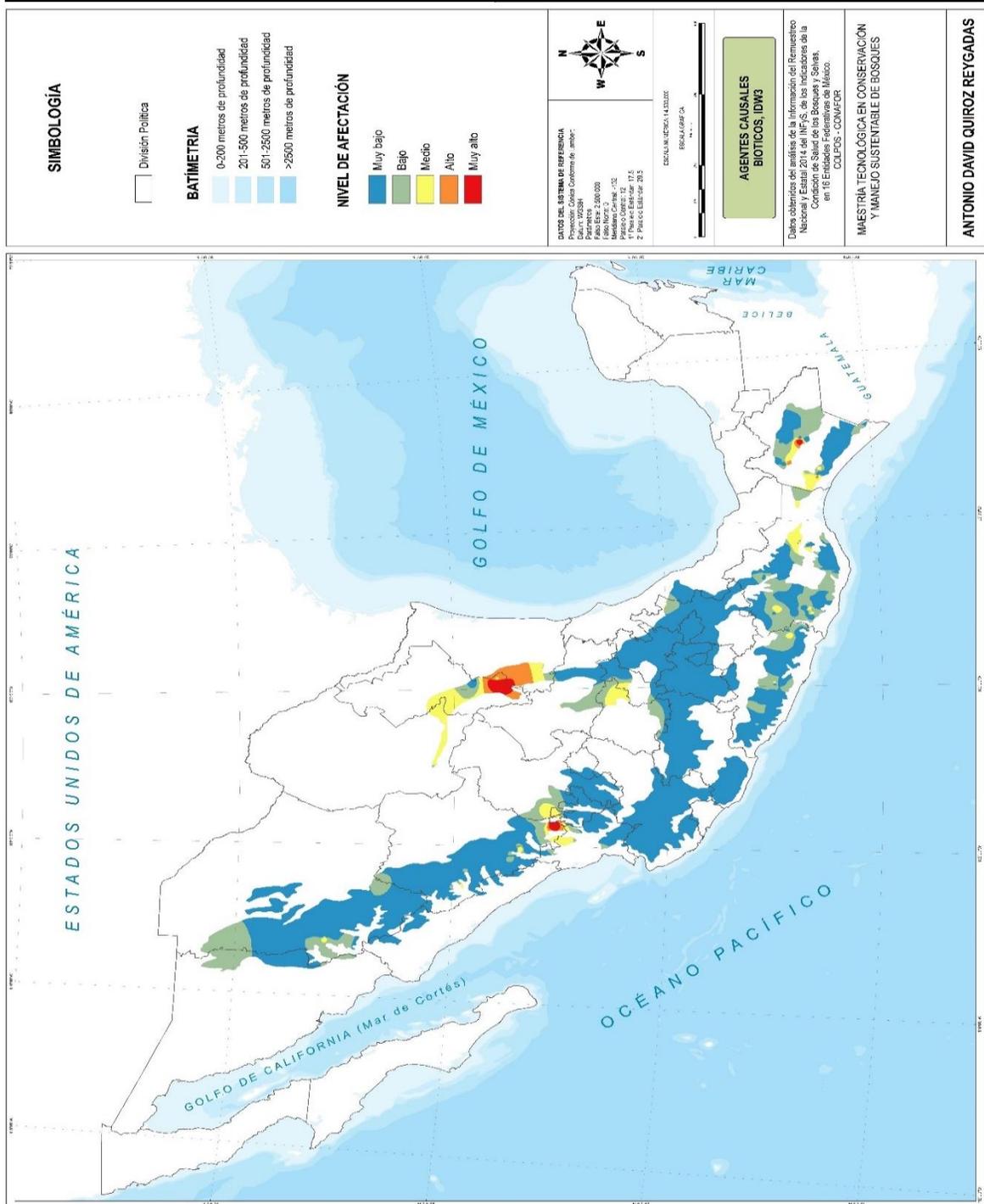


Figura 19. Distribución de afectación por agentes bióticos, con base en los datos obtenidos de la remediación 2014 del INFYS.

## 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Derivado del proceso de interpolación de la carga de combustibles (Figuras 15 y 16) y la correlación entre los valores de los pixeles de las coberturas raster, para los índices compuestos (***IPTC***, ***ICRC*** e ***ISD***) y la carga de material leñoso caído (***MLC***), se obtuvieron los valores estadísticos: valor mínimo (MIN), máximo (MAX), promedio (PROM) y desviación estándar (DES\_STD), para cada cobertura, correspondiente a las interpolaciones ***IDW<sub>2</sub>*** e ***IDW<sub>3</sub>*** (Cuadro 12 y 13), así como los valores del proceso de correlación entre estas coberturas raster (Cuadro 14 y 15).

**Cuadro 12. Valores estadísticos de los índices y *MLC* (*IDW<sub>2</sub>*).**

COBERTURA <sup>o</sup>	MIN	MAX	PROM	DES_STD
<b>MLC</b>	11	3568	441.3949	441.9352
<b>ICRC</b>	1	70	11.7381	5.4151
<b>IPTC</b>	-14	93	40.8157	14.7405
<b>ISD</b>	1	9	2.9016	0.9453

<sup>o</sup>Nota: MLC = Carga total de material leñoso caído; ICRC = índice de Cantidad Relativa de Copa; IPTC = Índice de Pérdida Total de Copa; ISD = Índice de Severidad de Daño

**Cuadro 13. Valores estadísticos de los índices y *MLC* (*IDW<sub>3</sub>*).**

COBERTURA <sup>s</sup>	MIN	MAX	PROM	DES_STD
<b>MLC</b>	7	3568	389.3349	425.3400
<b>ICRC</b>	1	70	11.7381	5.4151
<b>IPTC</b>	-14	93	40.8157	14.7405
<b>ISD</b>	1	9	2.9016	0.9453

<sup>s</sup>Nota: MLC = Carga total de material leñoso caído; ICRC = índice de Cantidad Relativa de Copa; IPTC = Índice de Pérdida Total de Copa; ISD = Índice de Severidad de Daño.

En este punto es importante señalar que los valores estadísticos del coeficiente de correlación van del rango de -1 a 1, donde el valor de “0” significa una “***NO correlación entre los valores de las variables***”. En el caso de obtener correlaciones con valores positivos, determina que los valores de una variable “A” aumentan o disminuyen con respecto a los incrementos o decrementos de la variable “B”, por otro lado, la

correlación con valores negativos, nos indica que el valor de “A” aumenta cuando el valor de “B” disminuye y viceversa, en ambos casos, conforme el valor de correlación se acerca a -1 o 1, se establece una relación de valor más fuerte.

Con base en lo anterior y analizando la matriz de correlación correspondiente a *IDW<sub>2</sub>* (Cuadro 14), podemos observar que el material leñoso caído (*MLC*), tiene el mayor valor de correlación con el Índice de Severidad de Daño (**-0.19647**), sin embargo, este es negativo. Este tipo de correlación nos permite establecer que, ante un incremento en la afectación por plagas o enfermedades, conlleva una disminución en la producción de biomasa y por ende en la cantidad de material leñoso que se incorpora al suelo, lo que altera la tasa de descomposición de materia orgánica y, en consecuencia, el empobrecimiento del suelo forestal.

**Cuadro 14. Matriz de correlación, Índices vs *MLC* (*IDW<sub>2</sub>*).**

COBERTURA <sup>▲</sup>	MLC	ICRC	IPTC	ISD
MLC	1	-0.00539	0.06462	<b>-0.19647</b>
ICRC	-0.00539	1	<b>-0.60549</b>	-0.11286
IPTC	0.06462	-0.60549	1	<b>0.34102</b>
ISD	-0.19647	-0.11286	0.34102	1

▲Nota: MLC = Carga total de material leñoso caído; ICRC = índice de Cantidad Relativa de Copa; IPTC = Índice de Pérdida Total de Copa; ISD = Índice de Severidad de Daño.

Otros valores que llaman la atención son los correspondientes a la correlación *ICRC* vs *IPTC* e *IPTC* vs *ISD*, en el primero de los casos el valor de correlación es de **-0.60549**, lo que indica que una disminución en el valor de cantidad relativa de copa (*ICRC*), le corresponde un incremento en la pérdida total de copa (*IPTC*). En el segundo caso el valor de correlación es de **0.34102**, estableciendo que el incremento en los valores de afectación por plagas o enfermedades (*ISD*), deriva en un incremento en el índice de pérdida total de copa (*IPTC*).

Se considera que las correlaciones descritas en el párrafo anterior se enmarcan en una lógica de sentido común, por lo tanto, se esperaban valores cercanos a los coeficientes máximos de correlación (-1 o 1). Sin embargo, los valores de correlación obtenidos, para material leñoso caído (*MLC*) versus, los índices compuestos de copa

**ICRC** e **IPTC**, que corresponden a **-0.00539**, **0.06462** respectivamente, así como para el índice de severidad de daño (**ISD**), cuyo valor es de **-0.19647**, en los tres casos, los valores son considerados bajos e inesperados y tienden más a una **no correlación**.

Analizando la matriz de correlación correspondiente a **IDW<sub>3</sub>** (Cuadro 15) y comparando los valores de correlación entre el material leñoso caído (**MLC**) y el Índice de Severidad de Daño (**ISD**), para **IDW<sub>2</sub>** (Cuadro 14), se puede observar que existe una diferencia en los valores de correlación, **-0.17793** (**IDW<sub>3</sub>**) y **-0.19647** (**IDW<sub>2</sub>**), el haber obtenido un valor inferior con el **IDW<sub>3</sub>** resulta inesperado, debido a que se les asignó un mayor peso a los puntos más cercanos, como se explicó en el apartado de Método (6.3 Interpolación **IDW**). No obstante, la diferencia se considera no significativa, entre ambos procesos de interpolación, manteniendo en ambos casos, valores de correlación inferiores a los obtenidos, para las correlaciones **ICRC** vs **IPTC** e **IPTC** vs **ISD**.

**Cuadro 15. Matriz de correlación, Índices vs MLC (IDW<sub>3</sub>).**

COBERTURA <sup>#</sup>	MLC	ICRC	IPTC	ISD
<b>MLC</b>	1	0.00625	0.05072	<b>-0.17793</b>
<b>ICRC</b>	0.00625	1	<b>-0.60549</b>	-0.11286
<b>IPTC</b>	0.05072	-0.60549	1	<b>0.34102</b>
<b>ISD</b>	-0.17793	-0.11286	0.34102	1

<sup>#</sup>Nota: MLC = Carga total de material leñoso caído; ICRC = índice de Cantidad Relativa de Copa; IPTC = Índice de Pérdida Total de Copa; ISD = Índice de Severidad de Daño.

En relación a los resultados descriptivos obtenidos del proceso de correlación entre los índices **ICRC**, **IPTC** e **ISD** vs Agentes Causales Bióticos (**BIOT**), se muestran a continuación.

**Cuadro 16. Matriz de correlación, (IDW<sub>3</sub>). Índices vs Agentes Causales Bióticos, BIOT.**

COBERTURA <sup>&amp;</sup>	ICRC	IPTC	ISD	BIOT
<b>ICRC</b>	1	-0.60548	-0.11286	0.05745
<b>IPTC</b>	-0.60548	1	0.34102	-0.27485
<b>ISD</b>	-0.11286	0.34102	1	-0.13015
<b>BIOT</b>	0.05745	<b>-0.27485</b>	-0.13015	1

<sup>&</sup>Nota: ICRC = índice de Cantidad Relativa de Copa; IPTC = Índice de Pérdida Total de Copa; ISD = Índice de Severidad de Daño; BIOT = Agentes Causales Bióticos

Analizando los valores de correlación entre Índices vs Agentes causales Bióticos (Cuadro 16), el valor más alto le corresponde a ***IPTC vs BIOT (-0.27485)***, estableciendo una inesperada correlación negativa. Lo anterior determina que, a un incremento en la afectación los factores ***BIOT***, disminuye el ***IPTC***. Es importante señalar que se esperaba una correlación negativa, establecida entre los ***BIOT*** y el ***ICRC***, es decir, a un incremento en la afectación de los agentes causales bióticos (***BIOT***) correspondería una disminución de ***ICRC***.

En tanto que los valores correspondientes a las correlaciones para ***ICRC, IPTC e ISD*** vs ***ACA***, son integrados en el Cuadro 17.

**Cuadro 17. Matriz de correlación, (*IDW*<sub>3</sub>). Índices vs Agentes Causales Abióticos, *ABIO*.**

COBERTURA <sup>§</sup>	ICRC	IPTC	ISD	ABIO
ICRC	1	-0.60548	-0.11286	-0.27949
IPTC	-0.60548	1	0.34102	0.18839
ISD	-0.11286	0.34102	1	0.24526
ABIO	<b>-0.27949</b>	0.18839	<b>0.24526</b>	1

<sup>§</sup>Nota: ICRC = índice de Cantidad Relativa de Copa; IPTC = Índice de Pérdida Total de Copa; ISD = Índice de Severidad de Daño; ABIO = Agentes Causales Abióticos

Los valores de correlación obtenidos entre Índices vs Agentes Causales Abióticos (Cuadro 17), el valor más alto le corresponde a ***ICRC vs ABIO (-0.27949)***, estableciendo una correlación negativa. Lo anterior determina que, a un incremento en la afectación de los ***ABIO***, disminuye el ***ICRC***.

Un aspecto que llama la atención es el valor de correlación de ***0.24526*** entre ***ABIO*** vs ***ISD***, lo que podría determinar un papel más preponderante de los agentes causales abióticos en el Índice de severidad de daño (***ISD***), que los agentes causales bióticos, en los ecosistemas templados.

Por último, los valores de correlación de ambos grupos de agentes causales versus el material leñoso caído (***MLC***), establecen una **no correlación** entre estos, al presentar valores muy cercanos a **0** (cero), como se puede observar en la siguiente tabla.

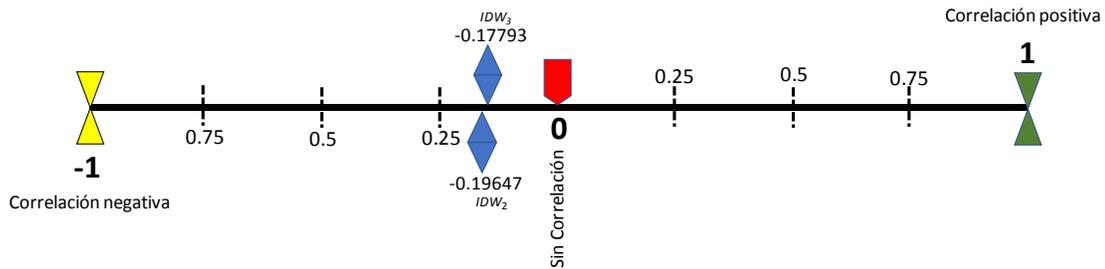
**Cuadro 18. Matriz de correlación, *MLC* (*IDW*<sub>2y3</sub>) vs *BIOT* y *ABIO*.**

COBERTURA <sup>β</sup>	ABIO	BIOT	MCL <sub>2</sub>	MCL <sub>3</sub>
ABIO	1	-0.09910	<b>-0.12254</b>	<b>-0.11947</b>
BIOT	-0.09910	1	<b>-0.06861</b>	<b>-0.07003</b>
MCL <sub>2</sub>	-0.12254	-0.06861	1	0.97617
MCL <sub>3</sub>	-0.11947	-0.07003	0.97617	1

<sup>β</sup>Nota: ABIO = A.C. Abióticos; BIOT= A.C. Bióticos; MLC = Material Leñoso Caído (*IDW*<sub>2y3</sub>)

Considerando que los valores máximos de correlación son aquellos cercanos al -1 o 1, los valores obtenidos de **-0.17793** y **-0.19647** son bajos<sup>2</sup>, entre las variables de material leñoso caído (*MLC*) y el Índice de Severidad de Daño (*ISD*), en cuanto a los índices *ICRC* e *IPTC*, podremos establecer que **No** hay correlación con el *MLC*.

Valores de correlación entre *MLC* vs *ISD*

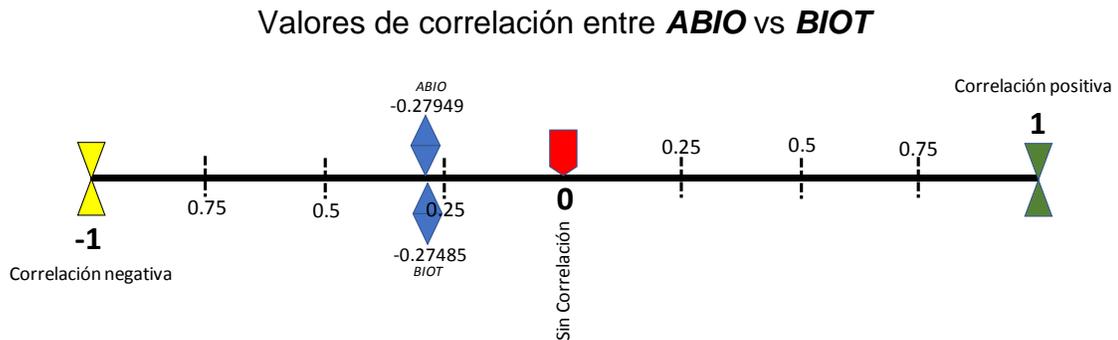


Durante el desarrollo del presente estudio, se consideró que existía una correlación entre los índices *ICRC* e *IPTC* y el *MLC*, basado en la consideración que, en los ecosistemas forestales no hay eventos o procesos aislados, existe una correlación en menor o mayor grado, no obstante, en este caso no es tan fuerte o lineal como se esperaba.

En lo que respecta a las correlaciones obtenidas entre los indicadores y los agentes causales abióticos y bióticos, los valores más altos de correlación fueron entre el *ICRC*

<sup>2</sup> Rangos de Correlación: **Muy alto** 1 a 0.91; **Alto** 0.90 a 0.64; **Moderado** 0.63 a 0.38; **Bajo** 0.37 a 0.11; **Muy bajo** 0.1 a >0.

vs **ABIO (-0.27949)**, así como para **IPTC vs BIOT (-0.27485)**. En ambos casos presentan una correlación negativa, que establece que al incremento de un parámetro el otro decrece.



Analizando la correlación **ICRC vs ABIO (-0.27949)** conlleva una lógica al determinar que, si la afectación por Agentes Causales Abióticos aumenta, el Índice de Cantidad Relativa de Copa disminuye, es decir, el árbol tendrá una pérdida de copa. Lo anterior, resulta razonable si consideramos que los agentes causales abióticos estuvieron conformados por sequía y viento (Cuadro 11).

Uno de los principales elementos que atraen a la investigación, es la de desconocer el resultado final, que si bien, en la mayoría de los estudios tienen resultados lógicos y esperados, en otros no es así. Son estos resultados inesperados los que abren nuevas líneas de investigación, como es para este estudio, la correlación entre **IPTC vs BIOT (-0.27485)**, cuya lectura establece que, a un incremento en la afectación por Agentes Causales Bióticos, implica una disminución del Índice de Pérdida Total de Copa.

Si se considera que las estructuras foliares y ramillas pequeñas que conforman la copa son **finitas**, en caso de pérdida, la reposición de estas estructuras demanda al organismo recursos, energía y tiempo, que ante la afectación por un agente causal biótico el árbol reubica los elementos necesarios, para enfrentar la afectación de la plaga o enfermedad. Es por lo anterior que, en situaciones limitantes de recursos (e.g, sequía), la pérdida de tejidos o estructuras derivada por la afectación de agentes bióticos es mucho más crítica que cuando los recursos abundan (Zas y Sampedro, 2015). Defender eficazmente los tejidos puede ser la principal estrategia viable en

situaciones de fuerte estrés, pues en caso contrario, los daños causados por los agentes podrían ser letales (Stamp, 2003). No obstante, los mecanismos de resistencia requieren una gran cantidad de recursos, y la adjudicación de recursos a la resistencia puede comprometer otras funciones vitales de la planta, como el crecimiento, la reproducción (Koricheva, 2002) o como se mencionó, reposición de estructuras foliares.

En el marco de lo expuesto en el párrafo anterior, cuando la afectación inicia, la estrategia de pérdida de copa es significativa, lo que permite traslocar recursos y energía para activar los mecanismos de defensa, manteniendo las estructuras foliares suficientes para continuar los procesos fisiológicos que dan soporte a las estrategias de defensa y viabilidad al individuo, sin embargo, al incrementarse la afectación del agente biótico, el árbol tiene que destinar más recursos y por ende continúa la defoliación, pero a tasas menores, debido a que al perder superficie foliar, compromete su funcionalidad como organismo, es decir, es un balance entre costo-beneficio, que pretende mantener al árbol con las estructuras mínimas, para sobrevivir. Es por lo anterior que se podría entender que la correlación entre ***IPTC vs BIOT sea negativa (-0.27485)***.

A pesar de los bajos valores de correlación obtenidos para todas las correlaciones, se considera que deben de existir valores de correlación más altos entre los índices ***IPTC*** e ***ICRC vs MLC, ABIO*** y ***BIOT***, basados en las observaciones de campo realizadas durante los talleres de capacitación. Sin embargo, debido a factores adversos en la obtención de las variables absolutas, como son: Cancelación de los talleres de capacitación a las brigadas del INFyS, alta rotación del personal contratado para la remediación, personal con perfil profesional no afín al ámbito forestal o biológico y carencia de un programa de supervisión de campo, incidieron fuertemente y derivan en un incremento significativo de inconsistencias de los valores y, por lo tanto, en su calidad y cantidad.

Durante el desarrollo del presente trabajo, se observaron algunos factores importantes y que pudieron incidir, en los bajos valores de correlación, debiendo considerarse en futuros estudios, los cuales se describen a continuación.

La información obtenida del INFyS de los conglomerados que tuvieron mediciones para material leñoso caído (**MLC**), correspondió solo a 199 conglomerados (Figura 8), sin embargo, el universo de remediación anual para las zonas de templadas de México corresponde a 2,253 conglomerados (Figura 9).

Se considera que, en los procesos de interpolación bajo cualquier método, el tener la mayor cantidad de puntos con valores conocidos, es de suma importancia en la obtención y visualización de los valores que se desconocen. Lo anterior debido a que, al existir una menor distancia entre el punto de valor desconocido respecto a los puntos muestreados, el valor se acerca más a la media ponderada de los valores considerados (Mitas y Mitasova, 1999). En el presente estudio se trabajó solo con el 8% de los conglomerados, lo cual se considera debe ser superior.

Otro aspecto interesante de señalar, es la distribución de los conglomerados donde se evaluó el **MLC** en el año 2014, el cual fue muy heterogéneo (Figura 8), por lo tanto, existen amplias zonas forestales, donde no fue evaluado el material leñoso caído. Como lo señala Mitas y Mitasova (1999), este elemento afecta sensiblemente a los métodos de interpolación, principalmente al *IDW*.

## 8. CONCLUSIONES.

El valor de correlación más alto obtenido, fue entre el **MLC** y el **ISD**, en su variante negativa (**IDW<sub>2</sub>**: -0.19647; **IDW<sub>3</sub>**: -0.17793), considerando que **SI** hay una correlación como se estableció en la hipótesis. Sin embargo, para los índices compuestos **IPTC** e **ICRC**, los valores son muy cercanos a **0** (cero), por lo tanto, **NO** se encontró correlación de estos índices con el material leñoso caído, por ende, la hipótesis nula es válida en este caso.

Al considerar los agentes de daño de forma separada, los agentes abióticos (**ABIO**) presentan los valores de correlación más altos con los índices **ICRC (-0.27949)** y **IPTC (-0.24526)**, en tanto que los agentes bióticos (**BIOT**), lo establecen con el **IPTC (0.27485)**.

Los agentes de daño **ABIO** y **BIOT vs MLC**, establecen una correlación de bajo a muy bajo respectivamente, por lo que se considera una **NO** correlación entre estas variables.

Si bien no se encontró una correlación directa entre el **MLC** y los índices compuestos **IPTC** e **ICRC**, se considera que es a través del proceso de acumulación, descomposición e incorporación al ciclo de nutrientes, donde se podrían establecer las correlaciones de estos índices con los indicadores de la salud forestal.

Es importante señalar que no se encontró literatura específica que permitiera comparar la metodología utilizada y los resultados obtenidos en el presente estudio, sin embargo, permitirá incrementar el conocimiento sobre el tema y, eventualmente, responder a los compromisos adquiridos ante de diversos acuerdos internacionales en pro de la conservación ambiental, como es el Proceso de Montreal, así como la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio Climático y las COP's (Conference of the Parties) del Protocolo de Kyoto.

## 9. RECOMENDACIONES

Derivado del presente estudio se desprenden recomendaciones y diversas líneas de investigación que incrementen el conocimiento de los factores que inciden en la salud forestal, incorporando variables absolutas y/o índices compuestos, que permitan el análisis multitemporal y de correlación respecto a factores bióticos, abióticos y antropogénicos.

Es indispensable mejorar los protocolos de revisión de la información obtenida mediante las remediciones anuales que lleva a cabo el INFyS, de forma tal, que garantice el realizar futuros estudios de investigación, basados en datos con el mínimo de incertidumbre.

Considerando los procesos y metodologías, tanto de campo como de análisis, descritas en diversos estudios y citados en la literatura, se propone las siguientes acciones tendientes a incrementar la calidad en el registro de las variables absolutas e incorporación de nuevos índices que permitan conocer la correlación con factores ambientales como lo establecen Yang *et. al.* (2015).

- ❑ Incremento en la calidad del registro de las variables absolutas, en la remediación.
  - Establecimiento de brigadas altamente capacitadas, para la obtención de variables absolutas,
  - Evitar la rotación del personal capacitado,
  - Incorporar personal con perfil profesional afín al ámbito forestal,
  - Independencia de las brigadas especializadas del programa operativo del INFyS,
  - Establecer un programa de certificación de especialidad, para los integrantes de las brigadas,
  - Establecimiento de sitios permanentes con distribución homogénea y en cantidad suficiente para ser estadísticamente representativos de los ecosistemas forestales en el país,

- Programa de remediciones anuales, bianuales o quinquenales, acorde a las necesidades de los índices y capacidad de análisis por las entidades responsables, en un contexto de perpetuidad,
- Establecimiento de metodologías integrales multipropósito, que permita la incorporación de objetivos inherentes a las Redes de Investigación Forestal, de reciente creación en México y,
- Utilizar, en futuras investigaciones, otros tipos de interpolación como el SPLINE, que es menos sensible a la heterogeneidad espacial de los datos.

❑ Incorporación de nuevos índices que describan.

- Biodiversidad
- Dividir el **ISD** en: **ISD** abióticos e **ISD** bióticos,
- Sequía,
- Bio-indicadores de O<sub>3</sub> o de otros contaminantes y,
- Propiedades físicas y químicas del suelo forestal.

Lo anterior, en el marco de los objetivos establecidos en las trece redes de investigación forestal, lo que permitirá incrementar el conocimiento científico en el tema de salud forestal, además el establecer una base central de datos, cuyo acceso sea irrestricto, para estudiantes, investigadores y profesionales del sector ambiental, así como los resultados de los diversos análisis y estudios que permitan a generaciones futuras, contar con bases de datos de calidad, para la realización de análisis multitemporales y conocer tendencias de respuestas de los ecosistemas forestales, los factores de alteración y con ello, establecer políticas en conservación y manejo sostenible de los ecosistemas forestales de México.

En cuanto a las líneas de investigación es indispensable el establecimiento de una red de parcelas de investigación, en bosques templados conservados y con diferentes grados de alteración, que permita conocer las tasas de acumulación y descomposición de **MLC**, debido a que son un componente muy importante de almacenamiento de carbono en los ecosistemas forestales, aproximadamente el 20% del total de “C”

(Harmon *et al.*, 1990), sin embargo, poco estudiado como lo señala Eichenberg *et al.* (2017), así como el tiempo que tarda estos en incorporarse al ciclo de nutrientes, que bajo una perspectiva de estudio multitemporal y su análisis correspondiente, se podría cuantificar el efecto que tendría el cambio climático en los procesos de acumulación, descomposición e incorporación al ciclo de nutrientes, a través del estudio de las comunidades de especies degradadoras de madera muerta como son: Hongos, bacterias, macro y microinvertebrados, pudiendo establecer índices y correlaciones entre procesos inherentes al suelo y la salud forestal.

Diversos autores señalan que estas comunidades degradadoras, son fuertemente dependientes de las condiciones del microclima y que una variación en éste conlleva alteraciones en sus poblaciones. Si establecemos esto como un indicador junto con la fluctuación de las poblaciones liquénicas, aunado al establecimiento de indicadores de biodiversidad, bioindicadores, incendios, propiedades del suelo, etc., así como las correlaciones, estaríamos en la posibilidad de conocer factores que inciden en la salud de nuestros ecosistemas forestales.

Es importante puntualizar que esta visión deberá ser considerada como una política gubernamental de largo plazo, en la conservación, protección y gestión de los recursos forestales.

## 10. LITERATURA CITADA

- Anderson, H. E. 1982. Aids to determining fuel models for estimating fire behavior. U.S.D.A. Forest Service. Intermountain Forest and Range Experiment Station Ogden, Utah. General Technical Report. INT-122. 22 p.
- Albini, F. A. and J. K. Brown. 1978. Predicting slash depth for fire modeling. U.S.D.A. Forest Service. Intermountain Forest and Range Experiment Station Ogden, Utah. Research Paper. INT-206. 22 p.
- Alvarado-Rosales, C. E. 1986. Comportamiento del fuego en rodales poco perturbados de *Pinus montezumae* Lamb. Tesis M.C. Programa Forestal. Colegio de Postgraduados. Montecillos, México. 113 p.
- Alvarado-Rosales, D. y Saavedra R.L. 2011. Indicador: Daños al Arbolado. Colegio de Postgraduados. Manual de Campo. 8 p.
- Alvarado-Rosales, D. y Saavedra R.L. 2012. Indicador: Condición de Copa. Colegio de Postgraduados. Manual de Campo. 19 p.
- Alvarado-Rosales, D., Saavedra R.L. y Quiroz, R.D. 2013. Metodología para el análisis de la información de la salud forestal en los bosques y selvas de México, mediante la utilización de indicadores compuestos. 12 p.
- Alvarado-Rosales, D., Saavedra R.L. y Franco I.Y. 2014. Análisis de la Información obtenida en el remuestreo Nacional 2013 y Estatal 2013 del INFyS, de los indicadores de la condición de la salud de los bosques y selvas, en 14 Entidades Federativas de México. Colegio de Postgraduados; Comisión Nacional Forestal. Reporte 259 p.
- Alvarado-Rosales, D., Saavedra R.L. y Franco I.Y. 2016. Análisis de la Información obtenida en el remuestreo Nacional y Estatal 2014 del INFyS, de los indicadores de la condición de la salud de los bosques y selvas, en 16 Entidades Federativas de México. Colegio de Postgraduados; Comisión Nacional Forestal. Reporte 153 p.
- Brown, A. A. 1974. Handbook for inventorying downed woody material. U.S.D.A. Forest Service. Intermountain Forest and Range Experiment Station Ogden, Utah. General Technical Report. INT-16. 24p.
- Comisión Nacional Forestal. 2014. Inventario Nacional Forestal y de Suelos. Procedimientos de muestreo. Guadalajara, Jal., México: CONAFOR. 160 p.

Comisión Nacional Forestal. 2015. Estadística Final 2014.

Consultado:

<http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/ver.aspx?grupo=10&articulo=5842>

Douglas, C. Allen. 1994 Forest Health - An Elusive Concept. The New York Forest Owner Association (NYFOA). Forest Insects Articles. 1 p.

Consultado:

<http://www.dec.ny.gov/animals/31301.html>

Eichenberg, D., Pietsch, K., Meister, C., Ding, W., Yu, M., Wirth, C. 2017. The effect of microclimate on woody decay is indirectly altered by tree species diversity in litterbag study. *Journal of Plant Ecology*. Volumen 10, Number 1, pages 170-178.

Eichhorn, J., Roskams, P., Ferretti, M., Mues, V., Szepesi, A., Durrant, D., Öck, H-W., Nevalainen, S., Bussotti, F., García, P., Wulff, S. 2016. Part IV: Visual Assessment of Crown Condition and Damaging Agents. In: UNECE ICP Forests Programme Coordinating Centre (ed.): *Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests*. Thünen Institute of Forest Ecosystems, Eberswalde, Germany, 54 p.

Consultado:

<http://www.icp-forests.org/Manual.htm>

Finley K. and Chhin S. 2016. *Forest Health Management and Detection of Invasive Forest Insects*. Department of Forestry, Michigan State University, 126 Natural Resources Building, East Lansing, MI 48824-1222, USA

INEGI, 2015. Anuario estadístico y geográfico.

Jaramillo C. M, and Botero B. L. 2010. Comunidades líquénicas como bioindicadores de calidad del aire del Valle de Aburrá. *Gestión y Ambiente*, vol. 13, núm. 1, pp. 97-110. Universidad Nacional de Colombia Medellín, Colombia.

Juknys, R. and Augustaitis, A. 1998. Forest health monitoring indicators and their interpretability: A Lithuanian case study. U.S.D.A. Forest Service. General Technical. PSW-GTR-166: 313-320.

Kolb, E.T., Wagner, R. M. and Covington, W.W. 1994. Concepts of Forest Health. Utilitarian and Ecosystem Perspectives. *Journal of Forestry*. 92 (7): 10-15.

Consultado:

[https://www.researchgate.net/publication/45622400\\_Concepts\\_of\\_forest\\_health\\_utilitarian\\_and\\_ecosystem\\_perspectives](https://www.researchgate.net/publication/45622400_Concepts_of_forest_health_utilitarian_and_ecosystem_perspectives)

Koricheva, J. 2002. Meta-analysis of sources of variation in fitness costs of plant antiherbivore defenses. *Ecology* 83(1): 176-190.

Haskell, B.D., Norton, B.G. and Costanza, R. 1992. What is ecosystem health and why should we worry about it?. In *Ecosystem Health*, Island Press, Washington, D.C. 3-20 p.

Harmon, M. E., Ferrell, W. K., and Franklin, J. F. 1990. Effects on carbon storage of conversion of old-growth forests to young forests, *Science*, 247, 699–702.

Hawksworth, F. G. and Wiens, D. 1996. Dwarf mistletoes: Biology, pathology, and systematics. *Agricultural Handbook 709*. Washington, D.C.: U.S.D.A., Forest Service. 410 p.

McCune, Bruce. 2000. Lichen Communities as Indicators of Forest Health. the American Bryological and Lichenological Society, Inc. *The Bryologist* 103(2), 353-356.

Mitas, L. and Mitsova, H. 1999. Spatial Interpolation. In: P.Longley, P., Goodchild, M.F., Maguire, D.J., Rhind, D.W. (Eds.), *Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications*, GeoInformation International, Wiley. 481-492.

Monning, G. and Byler, J. 1992. Forest health and ecological integrity in the Northern Rockies. USDA, Forest Service, Northern Region, FPM Rep. 92-7. 7p

Naciones Unidas. 1992. “Cumbre para la Tierra” o Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (CNUMAD). Rio de Janeiro, Brasil.

Consultado:

<http://www.un.org/spanish/conferences/wssd/unced.html>

Montréalprocess.org. 1994. The Montréal Process Criteria and Indicators for the Conservation and Sustainable Management of Temperate and Boreal Forests. Fifth Edition, September 2015.

Consultado:

[http://www.montrealprocess.org/Resources/Criteria\\_and\\_Indicators/index.shtml](http://www.montrealprocess.org/Resources/Criteria_and_Indicators/index.shtml)  
/

Russell, B. M., Woodall, W. C., D'Amato, W. A., Fraver, S., and Bradford, B. J. 2014. Technical Note: Linking climate change and downed woody debris decomposition across forest of the Eastern United States. *Biogeosciences*. 11, 6417-6425.

Saavedra-Romero, L. de L., Alvarado-Rosales, D., Hernández de la Rosa, P. Martínez-Trinidad, T., Mora-Aguilera, G. y J. Villa-Castillo. 2016. Condición de copa, indicador de salud en árboles urbanos del Bosque San Juan de Aragón, Ciudad de México. *Madera y bosques*, 22(2):15-27.

Consultado:

<https://dx.doi.org/10.21829/myb.2016.2221321>

Saavedra-Romero, L. de L. 2015. Indicadores de Salud Forestal y su Aplicación en Áreas Verdes Urbanas. Tesis Doctoral. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Edo. de México. 173 p.

Sánchez, C.J., Zerecero, L.G. 1983. Método practico para calcular la cantidad de combustibles leñosos y hojarasca. Nota Divulgativa No 9 CIFONOR – INIF. México. 11 p.

Schomaker, E.M., Zarnoch, J.S., Bechtold, W.A., Latelle, J. D., Burkman, G.W., and Cox, M.S. 2007. Crown-Condition Classification: A Guide to Data Collection and Analysis. U.S.D.A. Forest Service. Southern Research Station. General Technical Report SRS–102. 78 p.

Shawn F., Milo, M. A., Bradford, B. J., D'Amato, W. A., Kenefic, L., Palik, J. B., Woodall, W. C., and Brissette, J. 2013. Woody Debris Volume Depletion Through Decay: Implications for Biomass and Carbon Accounting. *Ecosystems* 16: 1262-1272.

Stamp, N. 2003. Out of the quagmire of plant defense hypotheses. *The Quarterly Review of Biology* 78(1): 23-55.

Tattar, T.A. 1989. Disease of shade trees. Academic Press. USA. 391 p.

Ukonmaanaho, L., Pitman, R., Bastrup-Birk, A., Breda, N., Rautio, P. 2016: Part XIII: Sampling and Analysis of Litterfall. In: UNECE ICP Forests Programme Coordinating Centre (ed.): Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. Thünen Institute for Forests Ecosystems, Eberswalde, Germany, 15 p.

Consultado:

<http://www.icpforests.org/Manual.htm>

Warren, G. W. and Olsen, P. F. 1964. A line intersect technique for assessing logging waste. *For. Sci.* 10: 267-276.

Woodall, C. and Williams, S. M. 2005. Sampling Protocol, Estimation, and Analysis Procedures for the Down Woody Material Indicator of the FIA Program. USDA-FS, North Central Research Station. General Technical Report NC-256.

Yang, J., Dai, G., and Wang S. 2015. China's National Monitoring Program on Ecological Functions of Forests: An Analysis of the Protocol and Initial Results. *Forests*, 6, 809-826 pp. ISSN 1999-4907.

Consultado:

<http://www.mdpi.com/journal/forests>

Zarnoch, S.J., Bechtold, W.A., and Stolte, K.W. 2004. Using crown condition variables as indicators of forest health. *Canadian Journal of Forest Research*. 34:1057-1070.

Zas, R., Sampedro, L. 2015. Resistencia de los pinos a plagas y enfermedades: nuevas oportunidades de control fitosanitario. *Sociedad Española de Ciencias Forestales* 39: 259-273.