



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas

**Caracterización Dendroquímica de *Taxodium Mucronatum*
Ten en el Río Sabinas, Coahuila**

TESIS

Como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES Y MEDIO
AMBIENTE EN ZONAS ÁRIDAS**

PRESENTA:

Biol. FATIMA DEL ROCÍO REYES CAMARILLO



BAJO LA SUPERVISIÓN DE
Dr. URIEL FIGUEROA VIRAMONTES

DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

Bermejillo, Durango, México. Mayo de 2018

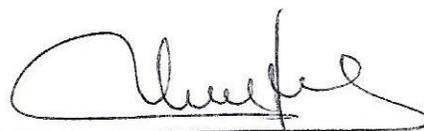


El presente trabajo de tesis titulado “Caracterización Dendroquímica de *Taxodium mucronatum* Ten en el Río Sabinas, fue realizado por Fátima del Rocío Reyes Camarillo y dirigido por el Dr. Uriel Figueroa Viramontes. Ha sido revisado y aprobado por el Comité Asesor como requisito parcial para obtener el Grado de:

**Maestro en Ciencias en Recursos Naturales y
Medio Ambiente en Zonas Áridas**

COMITÉ ASESOR

DIRECTOR:



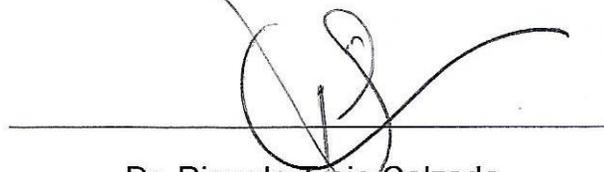
Dr. Uriel Figueroa Viramontes

CO-DIRECTOR:



Dr. José Villanueva Díaz

ASESOR:



Dr. Ricardo Trejo Calzada

ASESOR:



Dra. Alicia Rodríguez Pulido

DEDICATORIA

A mi hija Paula Fernanda.

AGRADECIMIENTOS

La presente investigación se financió a través del proyecto colaborativo INIFAP CENID-RASPA con recursos del fondo sectorial CONACYT-SENER, convocatoria S0019-2014-01, denominado “Creación del Laboratorio de investigación, desarrollo e innovación en sustentabilidad energética del noreste de México, registro 245410.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo brindado para la realización de mis estudios de posgrado y la realización del proyecto de investigación.

A la Universidad Autónoma Chapingo, por darme la oportunidad de seguir adelante en mis estudios de posgrado en su Institución.

A mi Director y Co-director el Dr. Uriel Figueroa Viramontes y Dr. Viillanueva Díaz, por su apoyo y tiempo aportado durante el proceso de realización de esta tesis.

A la Dra. Alicia Rodríguez Pulido por su gran apoyo brindado para la realización de este proyecto.

Al Dr. Ricardo Trejo Calzada por su tiempo en revisiones y consejos brindados.

A el Laboratorio de Centro de Investigación en Sustentabilidad Energética y Ambiental del Noreste (CISEAN) por permitirme utilizar el equipo de microscopia para el analisis dendroquimico.

Al Instituto Nacional de Investigación Forestal, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) por permitirme realizar este proyecto en sus instalaciones y hacer uso del material requerido.

Al Dr. German Calva por la estancia que me permitió realizar en la UNAM FES ZARAGOZA, por toda la asesoría y conocimientos brindados, así mismo como a la Maestra Aida Zapata por permitirme participar en el curso de absorción atómica en el Laboratorio de servicios de la carrera de biología. UNAM. Iztapalapa, Estado de México.

A todos los profesores, con los que tuve oportunidad de tomar clase durante la Maestría, gracias por su ayuda en mi formación académica.

A mis compañeros de maestría, con los que compartí gratos momentos durante este camino, gracias por su compañía y amistad Emilia, Máyela, Carlos Santamaría, Carlos Arnoldo e Iván Molina.

A mis compañeros del Laboratorio Aldo y Antonio, gracias por sus aportaciones para la elaboración de esta tesis.

A mi madre, mi tía y mi esposo que sin su apoyo no hubiera sido posible la culminación de esta etapa.

DATOS BIOGRÁFICOS

Datos personales

Nombre	Fatima del Rocío Reyes Camarillo
Fecha de nacimiento	26 de Noviembre de 1990
Lugar de nacimiento	Torreón, Coahuila.
CURP	RECF901126MCLYMT09
Profesión	Lic. En Biología
Cédula profesional	10800240



Desarrollo académico

La C Fatima del Rocío Reyes Camarillo, originaria del estado de Torreón Coahuila, México, es Licenciada en Biología, de la Facultad de Ciencias Biológicas UJED, egresada en el año 2012. Obtuvo el grado de Licenciada con la tesis “Reconstrucción de precipitación con *Pinus culminicola* en el cerro el Potosí” en mayo del 2014, dirigida por el Dr. Julián Cerano Paredes.

Después de egresar de la licenciatura trabajo en el Laboratorio de Dendrocronología INIFAP CENID-RASPA, trabajo como técnico en el fechado y medición de diferentes especies de Gimnospermas y Latifoliadas.

Su línea de investigación actual se relaciona directamente a la dendroquímica: “Caracterización Dendroquímica de *Taxodium Mucronatum* Ten en el Río Sabinas, Coahuila” por medio del cual logró terminar la presente tesis bajo la supervisión directa de su tutor y asesor el Dr. Uriel Figueroa Viramontes y Co-Director José Villanueva Díaz.

La C Fatima Reyes participó como instructor en el 12 curso taller de Dendrocronología en el INIFAP CENID-RASPA, también participó como ponente de cartel con temas de investigación en la 29a Semana Internacional de Agronomía en la Facultad de Agronomía y Zootecnia, y en el concurso de Carteles de las Jornadas Académico Culturales “Manejo de la Conservación 2017, organizadas por la Facultad de Ciencias Biológicas de la UJED

CONTENIDO

DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
DATOS BIOGRÁFICOS	vi
RESUMEN GENERAL.....	xii
GENERAL ABSTRACT.....	xiii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVOS	4
2.1 General	4
2.2 Específicos.....	4
III. HIPÓTESIS.....	4
IV. REVISION DE LITERATURA	5
4.1 Dendroquímica	5
4.2 Anatomía de la madera en Gimnospermas	6
4.3 Microscopía Electrónica de Escaneo (SEM)	8
4.4 Historia de la minería en Coahuila	10
V. MATERIALES Y MÉTODOS.....	11
5.1 Selección de sitios de estudio.....	11
5.2 Descripción de la especie de estudio	14
5.3 Obtención y preparación de muestras.....	14
5.4 Pre- fechado y medición	16

5.5 Verificación del fechado	17
5.6 Generación de cronologías	18
5.7 Análisis dendroquímico	18
5.8 Diseño Experimental.....	21
5.9 Análisis de Agua y suelo.....	21
VI. RESULTADOS	22
6.1 Resultados de suelo y agua	22
6.2 Resultados dendrocronológicos.....	24
6.3 Resultados dendroquímicos	28
6.3.1 Resultados generales	28
6.3.2 Análisis estadístico	31
6.3.3 Análisis de Elementos.....	33
6.3.3.1 Análisis de Ca	33
6.3.3.2 Análisis de Cromo	35
6.3.4 Comparación entre el IAA y concentraciones de Ca y Cr	37
6.3.4.1 Análisis de Calcio	37
6.3.4.2 Análisis de Cromo	39
6.4 Reconstrucción histórica de metales pesados para la cuenca carbonífera Sabinas Coahuila	42
VII. CONCLUSIONES	46
VIII. LITERATURA CITADA	47

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Localización geográfica de sitios de muestreo en el río sabinas, Coahuila.	12
Cuadro 2. Análisis físico-químico de suelo para los sitios ADJ, STM y RSA en sustrato de los bancales del río Sabinas, Coahuila.	23
Cuadro 3. Análisis de calidad de agua para los sitios ADJ, STM y RSA.	24
Cuadro 4. Periodo considerado para el análisis químico en muestras de Raíz y Tallo	25
Cuadro 5. Parámetros estadísticos de las muestras de incremento radial analizadas por el programa COFECHA.	26
Cuadro 6. Estadísticos descriptivos y de dispersión de contenido de calcio para los sitios ADJ, RSA y STM en raíz y tallo para los sitios RSA y STM.	31

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Fisiología de la madera de Gimnospermas (Giménez et al., 2005).....	7
Figura 2. Diferencia entre madera temprana y madera tardía en los anillos de coníferas..	8
Figura 3. Mina de carbón a cielo abierto cercana el bosque de galería de Sabinos en el sitio ADJ (a). Sabino muerto en el área de desecho de la mina (b).	12
Figura 4. Puntos de muestreo distribuidos en el cauce principal del río Sabinas	13
Figura 5. Ejemplar de <i>Taxodium mucronatum</i> Ten., en un paraje del río Sabinas, Coahuila.	14
Figura 6. Proceso secuencial del muestreo de núcleos de crecimiento en el río Sabinas.	15
Figura 7. Toma de muestras de suelo.....	16
Figura 8. Sistema de medición VELMEX.....	17
Figura 9. Microscopio electrónico de barrido QUANTA FEG 650 para análisis químico de anillos de crecimiento de <i>Taxodium mucronatum</i>	19
Figura 10. Espectro de Dispersión de Energía de la madera de <i>T. mucronatum</i>	20
Figura 11. Análisis puntual de madera tardía y madera temprana.	20
Figura 12. Series de crecimiento de 164 años para el río Sabinas, Coahuila	27
Figura 13. Periodo de sequía detectado en la serie de crecimiento de anillo total de sabino, ocurrido en las décadas de 1990 y 2000.	28
Figura 14. Porcentajes de los elementos encontrados en los anillos de <i>T. mucronatum</i> . ..	29
Figura 15. Porcentaje total por periodo de los elementos encontrados en los Anillos de <i>T. mucronatum</i>	29
Figura 16. Porcentaje de Calcio presente en los sitios STM y RSA en anillo de crecimiento de tallo. La tendencia entre ambos sitios, muestra una correlación moderada para este elemento (0.43, $p < 0.25$).	33

Figura 17. Porcentaje de Calcio presente en los sitios STM, RSA y ADJ, en muestras de raíz.	34
Figura 18. Porcentaje de cromo presente en los sitios STM, RSA y ADJ, en muestras de raíz.	36
Figura 19. Comparación entre el Índice de Ancho de Anillo (IAA) y las concentraciones de Calcio para los sitios STM y RSA en muestras de tallo	38
Figura 20. Concentraciones de Ca en el sitio adjuntas comparado con el índice de ancho de anillo para el periodo de 1976 al 2005.....	39
Figura 21. Comparación entre el IAA y el porcentaje de Cromo para el sitio ADJ para muestras de Raíz y comparación entre el IAA y el porcentaje de Cromo para el sitio RSA en muestras de Raíz.	40
Figura 22. Comparación entre el IAA y el porcentaje de Cr para el sitio STM en muestras de Raíz.	41
Figura 23. Concentraciones totales de los elementos encontrados en los anillos de <i>T. mucronatum</i> del año 1920 al 2015.	43
Figura 24. Línea del tiempo de los principales eventos relacionados al sitio de estudio y la minería del carbón en México.	44

RESUMEN GENERAL

Caracterización Dendroquímica de *Taxodium mucronatum* en el Río Sabinas, Coahuila

La minería del carbón es una de las actividades más importantes para México y especialmente para la región carbonífera de Sabinas, Coahuila. El impacto de contaminación que se genera con esta actividad en el ecosistema ripario del río Sabinas, afecta las aguas superficiales y subterráneas, por ende, también al arbolado cercano a la fuente de contaminación. Algunos árboles como el sabino (*Taxodium mucronatum* Ten.), especie de gran longevidad es capaz de registrar los eventos de contaminación pasados que afectaron su entorno y desarrollo.

El presente trabajo se avocó a generar un registro histórico de la contaminación, particularmente de metales pesados, mediante anillos de crecimiento anual de árboles de sabino. Los sitios muestreados se ubican en la cuenca Don Martín, en tributarios de la corriente principal como es río Santa María (STM), río Sabinas (RSA) y Sitio Adjuntas (ADJ). En algunos especímenes de este sitio, se tomaron muestras de tallo y raíz para análisis dendroquímico. Las concentraciones encontradas de metales pesados fueron mayores para STM ($X = 87.88$, $t = .138$, g.l. = 11, $p < 0.25$) en muestras de raíz y RSA en tallo ($X = 88.14$, $t = .0.00079$, g.l. = 19, $p < 0.25$). En un periodo de 96 años, se identificaron altas concentraciones de calcio (Ca) y cromo (Cr), así como Aluminio (Al), Bromo (Br) y Silicio (Si) en periodos de tiempo específicos. Las correlaciones entre los sitios que presentaron mayor porcentaje de Ca fueron ADJ y STM ($r=0.838$ $p<0.025$), mientras que los mayores porcentajes de Cr se obtuvieron para los sitios ADJ y RSA ($r=.525$ $p<0.025$). Estos resultados reflejan el problema de contaminación generada por las minas e industrias cercanas a los sitios de estudio, probablemente acarreados por las corrientes superficiales hasta las afluentes del río Sabinas.

Palabras clave: Minería del carbón, Sabinas Coahuila, *Taxodium mucronatum*, registro histórico, contaminación, potencial dendroquímico.

Tesis de Maestría en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas
Universidad Autónoma CHAPINGO
Autor: Fatima del Rocío Reyes Camarillo
Director: Uriel Figueroa Viramontes

GENERAL ABSTRACT

Dendrochemical Characterization of *Taxodium mucronatum* in the Sabinas River, Coahuila

Coal mining is one of the most important economic activities in northern Mexico and particularly the Don Martín basin in Sabinas, Coahuila. The impact of pollution generated by this activity on the riparian ecosystem of the Sabinas River affects the surface and groundwater and thus also the woodland near the pollution source. Some species such as the Montezuma bald cypress (*Taxodium mucronatum* Ten.), a species of great longevity, are able to record past pollution events that affected their environment and development. This study focused on developing a historical record of the pollution, particularly by heavy metals, by analyzing the annual growth rings of Montezuma bald cypress. The sampled sites are located in the Don Martín Basin, in main-stream tributaries such as the Santa Maria River (SMR), Sabinas River (SR) and Adjuntas Site (ADJ). Stem and root samples were taken from some specimens in this study area for dendrochemical analysis. The heavy metal concentrations found were higher for SMR ($X = 87.88$, $t = .138$, $df = 11$, $p < 0.25$) in root samples and SR in stem samples ($X = 88.14$, $t = .00079$, $df = 19$, $p < 0.25$). In a 96 year-period, high concentrations of Calcium (Ca) and Chromium (Cr) were found, as well as other elements such as Aluminum (Al), Bromine (Br), and Silicon (Si) in specific time periods. Correlations for sites with a higher percentage of Ca concentrations were ADJ and SMR ($r = 0.838$ $p < 0.025$), whereas the highest Cr concentrations were obtained for the ADJ and SR sites ($r = .525$ $p < 0.025$). These results reflect the pollution effect derived from the coal industry whose contaminants probably reached the streamflow by winds to the Sabinas River main stream.

Keywords: Coal mining, Sabinas Coahuila, *Taxodium mucronatum*, historical record, pollution, dendrochemical potential.

I. INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento de los recursos naturales constituye una práctica coadyuvante en la humanidad, ya que su explotación ha permitido la supervivencia y el desarrollo de las culturas; en contraparte, algunas de esas actividades como la sobreexplotación de los recursos naturales, ha generado un desequilibrio ecológico (Álvarez, 2014).

En México, una de las principales fuentes de desequilibrio ecológico y contaminación es la explotación de carbón mineral, a partir de 1884, se inició con la extracción intensiva de este recurso no renovable en el estado de Coahuila. Actualmente, la región Carbonífera de Coahuila es la más importante del país en términos de producción, situación que trae aparejada una serie de problemas que afectan la estabilidad de los ecosistemas, particularmente de las zonas riparias (Corona, *et al.*, 2006).

Las actividades mineras de la región carbonífera han impactado de forma negativa el ecosistema del Río Sabinas. Los efectos se reflejan en la alteración del comportamiento hidrológico, ya que la actividad genera residuos como desechos sólidos y aguas residuales, que se vierten sin tratamiento alguno a los arroyos tributarios y al cauce principal del río Sabinas. Estos contaminantes, impactan de manera negativa la belleza escénica de la región, e influyen en la dinámica y vigor de las especies riparias dominantes en los sistemas riparios, donde el sabino o ahuehuate (*Taxodium mucronatum* Ten.) es el elemento dominante (Villanueva *et al.*, 2014).

La cuenca del río Sabinas, cuenta con yacimientos de carbón que comprenden una superficie aproximada de 6,900 km². Hasta junio de 1993, se calculaba que las reservas de carbón en toda la cuenca eran del orden de 232.7 millones de

toneladas *in situ*; de estas, el 43.7% eran positivas, 34.9% se consideraban reservas probables y un 21.4% eran reservas posibles (Durán y Chairez, 1993).

El Servicio Geológico Mexicano indica que en la región existen 77 pequeños y medianos productores de carbón, integrados en dos asociaciones mineras y además de un número no determinado de productores independientes. La Unión Nacional de productores de Carbón suministró en 2015, aproximadamente 3.3 millones de toneladas de materia prima de carbón para el consumo de las carboeléctricas, generando el 10% de la energía eléctrica del país (Servicio Geológico Minero, 2016); por lo tanto, esta producción, representa más del 90% de la producción total de carbón a nivel nacional (Consejo de Recursos Minerales, 2003).

El lado negativo de la producción de carbón es la contaminación de las corrientes hídricas del río Sabinas, a lo que se le atribuye un decremento en la población de algunas especies arbóreas, entre ellas el sabino, esta condición, se ha agravado con la presencia de una sequía extrema ocurrida en la última década, El tiempo en que un individuo de sabino muere por efectos de contaminación es variable, sin embargo, los rodales de árboles muertos encontrados en los márgenes del río Sabinas, perecieron aproximadamente hace una década, después de sufrir estrés hídrico por un período consecutivo de cinco años (Villanueva *et al.*, 2014).

La información que ofrece el medio ambiente puede ser muy relevante y por medio de un bioindicador como pueden ser las plantas o animales es posible proveer información de las condiciones del ecosistema. Esto es posible a través de cambios en el organismo, en el comportamiento o concentración de ciertas sustancias del bioindicador (International Atomic Energy Agency, 2000).

El sabino es una especie muy longeva, que ha llegado a registrar hasta 1650 años, además, tiene gran potencial dendrocronológico debido a su alta sensibilidad climática (Villanueva *et al.*, 2007) y a su amplia distribución en México, principalmente en áreas de arroyos y ríos (Martínez 1963). Es por ello, que en la última década, se han llevado a cabo una serie de estudios

dendrocronológicos, de dinámica poblacional y de evaluaciones dendroquímicas, lo que brinda una alternativa para utilizar la especie como un biomonitor de contaminantes en sitios con problemas de contaminación (Martínez, 2016; Morton *et al.*, 2016).

La Dendroquímica, es una herramienta que permite medir en los anillos de los árboles, los componentes de contaminación que se pueden encontrar en el agua subterránea, ríos y suelos cercanos al hábitat del árbol; el contenido se determina a través de diferentes métodos de análisis químico (Balouet *et al.*, 2009). Es importante realizar estudios de identificación y análisis de los metales pesados, en especies arbóreas en zonas cercanas a fuentes de contaminación por metales pesados (Saint-Laurent *et al.*, 2008) y realizar una reconstrucción química de estos elementos en el tiempo, lo cual permite determinar el inicio y la dinámica de contaminación a nivel interanual o estacional (Morton *et al.*, 2016).

El uso de anillos de árboles permite definir patrones en su incremento radial y en ellos, la presencia de contaminantes en suelo y agua. La presencia de metales pesados y otros elementos en los anillos de crecimiento, se determina mediante la generación de series dendrocronológicas y análisis dendroquímicos; procedimiento que constituye una oportunidad inmejorable para determinar el grado de contaminación y el tiempo en que este proceso ha impactado zonas específicas de los sistemas riparios del país (Bondietti *et al.*, 1990).

Estudios de este tipo son de particular interés en el río Sabinas Coahuila, una región hidrológica con altos problemas de contaminación, información que puede contribuir al desarrollo de planes para la conservación de sitios de importancia ecológica. Adicionalmente, los datos generados, también son de utilidad para identificar y evaluar el nivel permitido de metales pesados en cauces principales y tributarios del río Sabinas, acorde a las normas vigentes de SEMARNAT. Finalmente, esta información es también de utilidad para definir las acciones a implementar para el mejoramiento de la calidad de los caudales en función a su grado de contaminación.

II. OBJETIVOS

2.1 General

-Analizar el impacto de la explotación de carbón mineral en la composición química presente en los anillos de crecimiento de *Taxodium mucronatum* distribuido en el cauce principal y tributarios del río Sabinas, Coahuila.

2.2 Específicos

-Determinar los elementos químicos presentes en los anillos anuales de crecimiento de sabino y analizar su relación con información histórica de la minería del carbón, documentada para la región carbonífera.

-Determinar los principales contaminantes que puedan afectar el sitio de estudio y la dinámica de la población de sabino.

-Determinar la viabilidad del método analítico de espectroscopia de escaneo en estudios dendroquímicos.

III. HIPÓTESIS

La composición química presente en los anillos de crecimiento de especies riparias como el sabino, constituye una fuente indirecta para conocer la dinámica de las actividades de explotación de carbón en la región carbonífera de Coahuila.

IV. REVISION DE LITERATURA

4.1 Dendroquímica

La dendroquímica es una rama de la dendrocronología que se utiliza para el análisis químico de elementos presentes en los crecimientos anuales de los árboles, cuyo contenido de los elementos está en función del medio ambiente que rodea al árbol. La dendroquímica se considera como una herramienta capaz de medir la contaminación de los suelos y aguas subterráneas, procedentes de diversas fuentes y diferentes productos químicos (Balouet, 2009).

Para la interpretación correcta del análisis dendroquímico es necesario incluir las características biológicas de los organismos estudiados, la comprensión del proceso de transporte y exclusión de algunos elementos químicos en los árboles; así mismo, es importante considerar otros factores como lesiones o infecciones en el arbolado, los cuales también pueden alterar la composición química de la madera (Smith, 1996).

La entrada de metales pesados en los arboles puede ocurrir mediante tres vías: la primera es a través de intercambio catiónico que se realiza a través de las raíces; la segunda es la captación foliar y la tercera es directamente a través del tallo. Los metales pesados que son absorbidos a través de la raíz, se regulan por factores edáficos como el pH, la cantidad de macronutrientes y la deficiencia de sulfatos; mientras que la absorción foliar, se realiza por medio de la deposición de partículas en el tejido foliar (Leep, 1975), este proceso acontece en dos pasos; en la internalización y absorción a través de la cutícula y el segundo en la penetración vía poros estomáticos (Schreck *et al*, 2011). La captación de metales pesados en el tallo, ocurre de forma directa a través de un movimiento lateral apoplástico. Esta captación podría ser más relevante en especies caducifolias, debido a que, en las superficies expuestas del tallo, se depositan directamente los metales pesados atmosféricos (Leep, 1975).

4.2 Anatomía de la madera en Gimnospermas

Las características estructurales y botánicas de las Gimnospermas y Angiospermas son diferentes, ya que el leño de las Gimnospermas es homogéneo, mientras que el de las Angiospermas es heterogéneo (Giménez *et al.*, 2005).

Las células de coníferas o gimnospermas en donde se encuentra el sabino, presentan una construcción celular y especialización celular más simple. Los tipos de células de las coníferas están divididos en dos tipos, las traqueidas y las células parenquimáticas. La función de las traqueidas es la conducción de agua y sostén (León, 2016). La forma de estas células es alargada orientadas longitudinalmente y presentan forma rectangular, cuadrada y pentagonal. La diferencia entre las traqueidas de madera temprana y madera tardía es la estreches del lumen; la madera temprana presenta lúmenes amplios, mientras que en la madera tardía son lúmenes estrechos. Las células parenquimáticas son células vivas con forma prismática orientada horizontal y verticalmente, tiene funciones de almacenamiento, transporte y conducción en la madera. Estas células están interconectadas con las células vecinas a través de puntuaciones simples. Las células epiteliales, que se encuentran en especies con canales resiníferos, también son células parenquimáticas y tienen la función de desechar la resina. Las células parenquimáticas, se clasifican en parénquima longitudinal por su posición vertical o axial y parénquima radial (Figura 1) (CONAFOR, 2011).

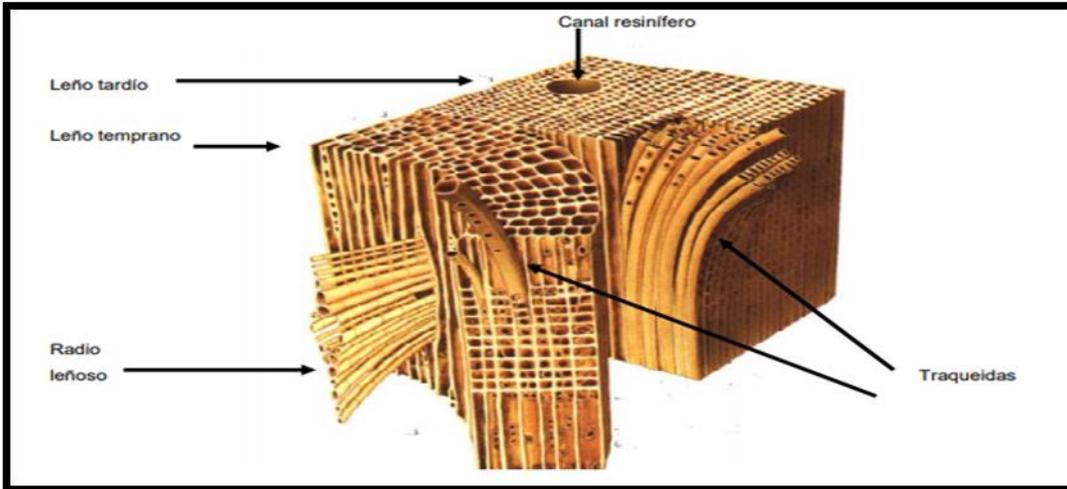


Figura 1. Fisiología de la madera de Gimnospermas (Giménez *et al.*, 2005).

Las capas de crecimiento del xilema o floema secundario es denominado anillo de crecimiento. La capa de crecimiento se genera cuando hay un cambio en el ambiente. Con base en las estaciones, se forma una capa en la estación primavera-verano, conocida como madera temprana, caracterizada por presentar una coloración más clara que la madera tardía y generar traqueidas de mayor tamaño con paredes celulares más delgadas; mientras que la madera tardía, presenta color más oscuro y traqueidas de menor tamaño y paredes más gruesas (Baraño, 2008) (Figura 2).

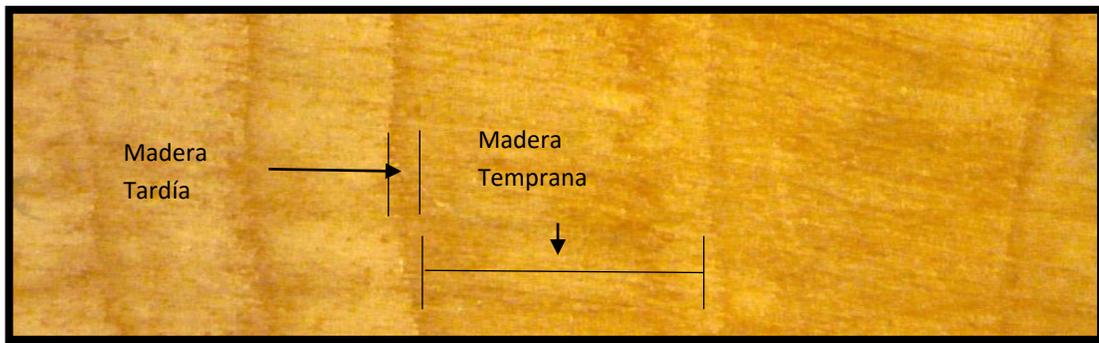


Figura 2. Diferencia entre madera temprana y madera tardía en los anillos de coníferas. La madera temprana es la parte más gruesa del anillo y representa el crecimiento del periodo de primavera-verano, también se caracteriza por tener un color más claro. La madera tardía es la línea delgada que divide a un anillo del otro y tiene una coloración más oscura y representa el crecimiento de la temporada otoño invierno.

Los árboles se caracterizan por tener fisiológicamente dos tipos de madera, las cuales son denominadas albura y duramen. La albura es la parte viva y activa del xilema; se presenta en la parte externa del tallo y se encarga de conducir el agua y minerales de la raíz a las hojas, mientras que el duramen es la parte no viva e inactiva del árbol, cuyas funciones son darle sostén al árbol. Otra de las características fisiológicas del duramen es su característico color oscuro y este se debe al depósito de resinas, taninos, grasas, carbohidratos y otras sustancias derivadas de su actividad fisiológica (Giménez *et al.*, 2005).

4.3 Microscopía Electrónica de Escaneo (SEM)

El microscopio electrónico de barrido es capaz de resolver detalles sobre las estructuras biológicas y no biológicas a niveles micrométricos y nanométricos. Los microscopios electrónicos de barrido emplean muestras muy finas (500 Å o menores), que pasan a través de lentes electromagnéticas y que son atravesadas

por un haz de electrones. La imagen que se genera se visualiza en una pantalla fluorescente, una placa fotográfica o una cámara digital, y alcanzan resoluciones muy altas a través de magnificaciones. De forma complementaria, esta capacidad puede mejorarse mediante un sistema analítico, el cual es capaz de brindar información precisa sobre la composición y estructura de la muestra, como grosor, composición química y elemental, estructura electrónica y niveles de energía, e inclusive puede llegar a determinar la distribución elemental específica de los átomos en la muestra (Sorrivas., *et al.* 2014).

La microscopia electrónica es una herramienta muy importante para realizar estudios de la estructura de las plantas. Se han utilizado dos tipos de microscopios electrónicos para estudiar células vegetales; el de transmisión (TEM) y el de escaneo (SEM). Con el TEM, el haz de electrones penetra en finas láminas de material biológico y permite el estudio de las características internas de las células y sus orgánulos. El haz de electrones SEM escanea la superficie de muestras preparadas y por ende, el SEM es importante para el estudio morfológico externo de las células, tejidos y órganos intactos. La preparación de muestras para el TEM es mucho más complicada y lenta que para el SEM. (Fowke, 1995).

La técnica de espectrometría empleada en el SEM es de energía dispersiva (EDS), es utilizada para estudios dendroquímicos desde los años noventa y resultó ser una técnica más económica, práctica y rápida que otras técnicas como la de Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS), la técnica de fluorescencia de rayos X y la espectrometría de absorción atómica (AAS). Los problemas que se pueden presentar con el método SEM-EDS puede estar relacionado con el nivel de energía adecuado para los materiales. El nivel satisfactorio para análisis de madera que arrojaron resultados confiables es de 20Kev; sin embargo, las ventajas que ofrece este método analítico es mayor, ya que el haz de electrones puede enfocar la superficie de los anillos anuales de los árboles, lo que permite realizar un análisis químico más específico de la estación primavera-verano u otoño-invierno (De Visser, 1992).

4.4 Historia de la minería en Coahuila

El estado de Coahuila tiene una amplia relación con la minería, esta actividad se ha considerado la principal fuente económica desde la época de la Colonia. En 1577 se registró la primera apertura de las minas conocidas como “La Trinidad”, lo cual da origen a la ciudad de Monclova, pero fue hasta 1828 que se inició con la explotación del carbón; más tarde en 1870, se explotó cobre en la mina Pánuco y en 1879, plata, plomo y óxido de zinc en Sierra Mojada. Recientemente, la explotación de minerales como fluorita, sales de sodio-magnesio dolomita, yeso, barita y celestita es una práctica común en diversos sitios de la región (Servicio Geológico Minero, 2016).

La región carbonífera tuvo mayor auge desde la época del “Porfiriato” hasta finales de 1960, con un incremento constante; a partir de entonces, se inició con su declinación, debido a la crisis que tuvo la industria siderúrgica en 1980, lo que provocó un desastre económico y social en la región (Sánchez, 1995).

Los principales destinos de la producción de carbón son la industria siderúrgica en Monclova, Coahuila, producción que es suministrada al Grupo Acerero del Norte y a otras empresas menores. La empresa encargada de abastecer el carbón a las centrales de CFE en el municipio de Nava es Mineros del Norte (MICARE). La producción generada por los pequeños productores es destinada a la generación de energía eléctrica, este es el llamado carbón térmico, los grandes productores de empresas siderúrgicas, además de proveer plantas carboeléctricas, también extraen el mineral para autoconsumo dirigido a procesos metalúrgicos, este carbón es denominado carbón coquizable (Dirección General de Desarrollo Minero, 2014).

V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Selección de sitios de estudio

Los sitios de estudio se localizan en el cauce principal y tributarios del río Sabinas, Coahuila, este río constituye el cauce principal de drenaje de los escurrimientos generados en la cuenca Don Martín, que se ubica en las coordenadas geográficas extremas 27°09'18'' a 28°57'58'' Latitud N. y 100°35'33'' a 102°23'53'' Longitud W. (Villanueva *et al.*, 2014).

Se seleccionaron tres sitios de muestreo dendrocronológico en la región carbonífera de Sabinas, Coahuila. Los sitios se ubicaron aledaños a explotaciones mineras y a un centro de acopio industrial, donde se realiza la limpieza del carbón a través de lavado, cuyos residuos de este proceso son vertidos a la corriente principal, donde se ubica un bosque de galería de sabino (Figura 3). Además, se estableció un sitio adicional, aguas arriba de los puntos problema de contaminación y el cual fungió como testigo (sitio Santa María), se ubica fuera del área de explotación y en el cual no se observa el efecto directo del problema de contaminación derivado de la explotación minera. La ubicación geográfica de los sitios de estudio se describe en el cuadro 1.

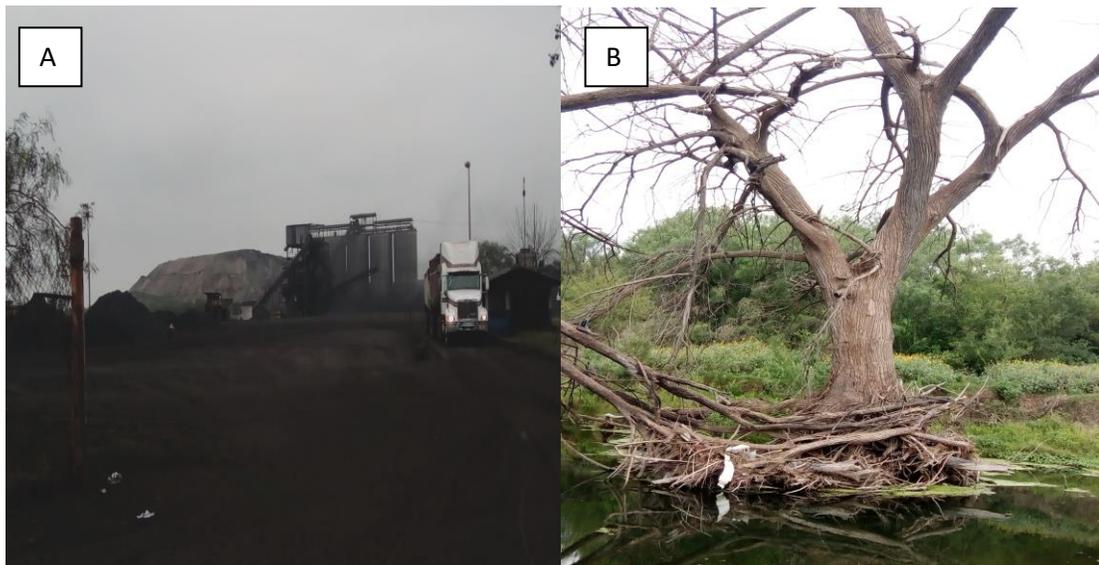


Figura 3. Mina de carbón a cielo abierto cercana el bosque de galería de Sabinos en el sitio ADJ (a). Sabino muerto en el área de desecho de la mina (b).

Cuadro 1. Localización geográfica de sitios de muestreo en el río sabinas, Coahuila.

Sitio	Clave del Sitio	Coordenadas Geográficas		
		Latitud	Longitud	Elevación (m)
Río Santa María	STM	27°58'57.94"	101°26'06.62"	410 msnm
Las Adjuntas	ADJ	27°53'57.3"	101°11'57.05"	353 msnm
Río Sabinas	RSA	27°50'19.48"	101°07'24.04"	340 msnm

La selección de los sitios RSA y ADJ, se basó en su cercanía a los puntos de contaminación. Por ejemplo, en el sitio RSA, se realizan descargas de aguas urbanas, por pasar en la parte externa de la ciudad de Sabinas; mientras que el sitio ADJ, como se mencionaba con anterioridad, se encuentra adyacente a una industria donde se lava el carbón mineral, cuyos desechos en el pasado y ocasionalmente en la actualidad se vierten al cauce principal. El sitio río Santa María muestra en apariencia menor impacto de contaminantes, debido a su ubicación aguas arriba y fuera de la ciudad y se seleccionó como testigo, no obstante que, también pudiera tener influencia de actividades mineras, que se realizan aledañas al sitio (Figura 4).

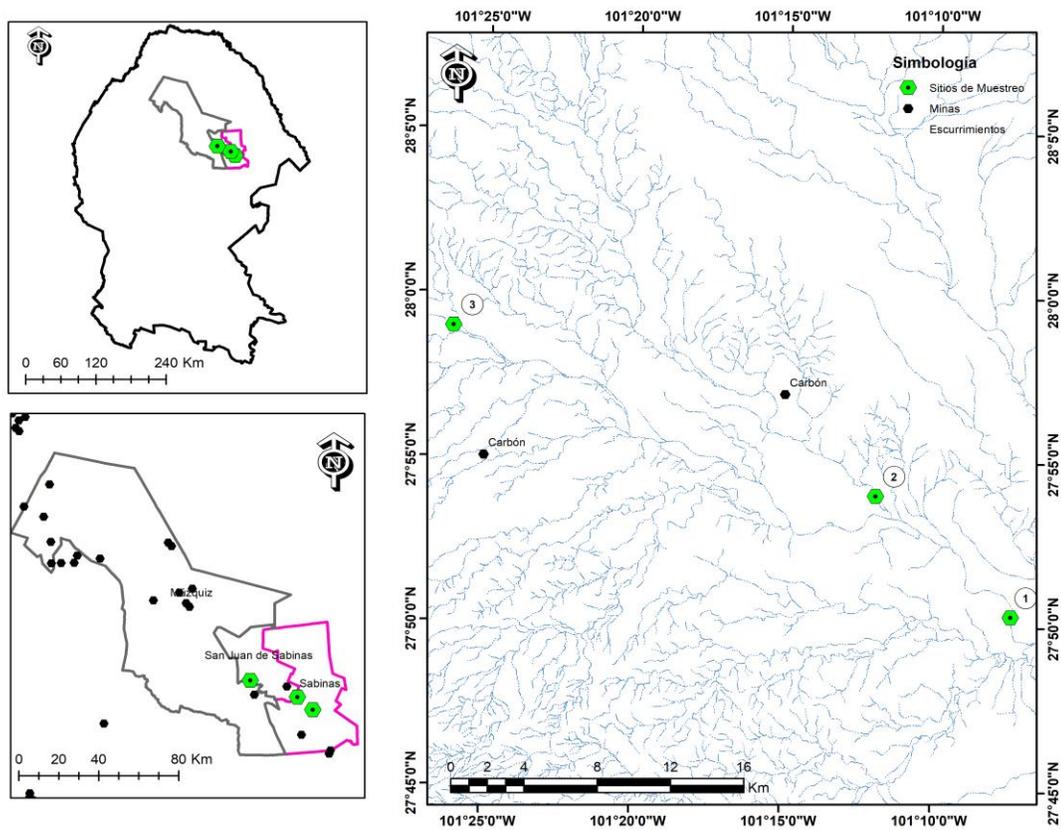


Figura 4. Puntos de muestreo distribuidos en el cauce principal del río Sabinas, en la cuenca Don Martín, Coahuila. 1; Río Sabinas (RSA), 2; Las Adjuntas (ADJ), 3; Santa María (STM).

5.2 Descripción de la especie de estudio

Taxodium mucronatum Ten. Es una especie que forma parte de la vegetación riparia, es un árbol de 20 a 30 m y llega alcanzar hasta 40 m de altura. Presenta un tronco grueso, muchas veces lobulado o con abultamientos irregulares o contrafuertes, con raíces grandes, extendidas y sinuosas; la corteza es suave color rojizo (Martínez, 1963) (Figura 5).



Figura 5. Ejemplar de *Taxodium mucronatum* Ten., en un paraje del río Sabinas, Coahuila.

5.3 Obtención y preparación de muestras

Los núcleos de crecimiento se obtuvieron de árboles ubicados en los márgenes de los parajes río Sabinas, río Santa María y río las Adjuntas, Coahuila. La especie muestreada fue *Taxodium mucronatum*, ya que esta especie forma parte de la vegetación riparia y con potencial dendrocronológico para estudios

dendroclimáticos (Villanueva *et al.*, 2007). Las muestras se obtuvieron con taladro Pressler de la raíz y la parte media del fuste a 150 cm aproximadamente, con fines de generar una cronología más extensa (Figura 6). Extraídas las muestras de cada árbol, se colocaron en popotes de plástico con los datos del sitio, la fecha de colecta, las coordenadas geográficas y el número de muestra. En el caso de muestras de raíces, se obtuvieron dos núcleos por cada ejemplar, seleccionando aquellas raíces en contacto con el caudal (Figura 6), posteriormente. se envolvieron en papel periódico con los datos del sitio y se almacenaron en un porta-muestras para evitar el daño físico en el traslado y manejo.

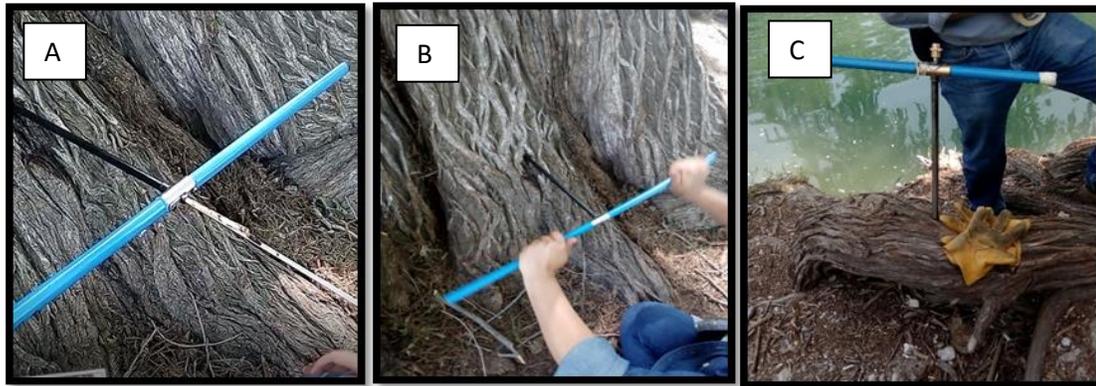


Figura 6. Proceso secuencial del muestreo de núcleos de crecimiento en el río Sabinas. A): extracción de núcleo de crecimiento con taladro tipo Pressler; B) obtención de núcleo de crecimiento en la base del fuste; C) Obtención de núcleo de crecimiento de raíz.

Las muestras de suelo se colectaron del material que se encontró entre las raíces de sabino, una profundidad de 0 a 15 cm y de 15 a 30 cm, se colocaron en bolsas de plástico e identificaron con la clave del sitio (Figura 7). Las muestras de agua se obtuvieron de la corriente de los cauces de los arroyos y río y depositaron en botellas pet, sin dejar vacío en la botella para evitar la alteración de resultados, estas áreas correspondientes a los tres puntos muestreados, con dos repeticiones

por sitio, el agua fue colocada, y se almacenaron en una hielera. Las muestras de suelo y agua se trasladaron al Laboratorio de Suelos del INIFAP CENID RASPARASPA para su análisis posterior.



Figura 7. Toma de muestras de suelo (A). Muestras de suelo embolsadas y etiquetadas según el sitio de origen (B).

El proceso de preparación de muestras de raíz y tallo se llevó a cabo en el laboratorio de Dendrocronología del INIFAP CENID-RASPA, mediante técnicas dendrocronológicas estándar (Stokes y Smiley, 1968)

5.4 Pre- fechado y medición

El fechado y medición de las muestras se realizó en el laboratorio de Dendrocronología del INIFAP CENID-RASPA, acorde a técnicas de fechado bien establecidas (Stokes y Smiley, 1968). Este principio básico de la dendrocronología llamado fechado cruzado, permite determinar la edad del árbol, su primer anillo de crecimiento, fecha en la que se realizó la toma de muestras o año en que murió el árbol. Para el datado correcto de los anillos de crecimiento, se consideraron 27 núcleos de crecimiento previamente obtenidos de arbolado ubicado en sitios cercanos al río Sabinas, así como de ejemplares de las

localidades Múzquiz y Adjuntas; además, de que se incluyeron 16 núcleos obtenidos de las colectas realizadas en el presente estudio.

La medición de muestras se realizó de forma individual, midiendo el crecimiento total anual por anillo a través del sistema de medición VELMEX (Robinson y Evans 1980) (Figura 8).

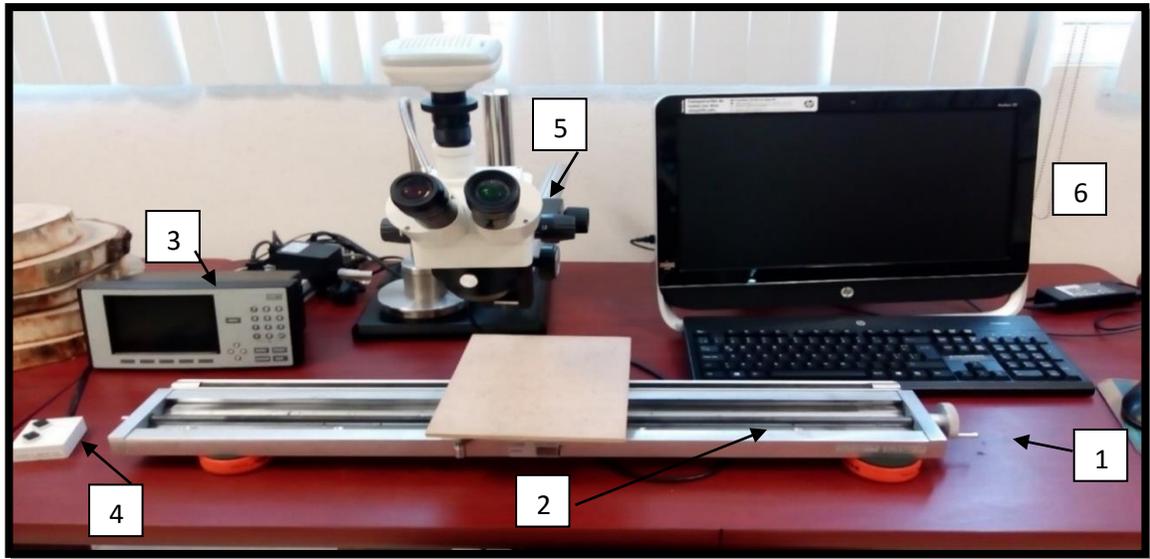


Figura 8. Sistema de medición VELMEX compuesto de una manivela (1), platina deslizable (2), micrómetro (3), botón de reajuste “print” (4), estéreo microscopio (5) y computadora con software MeasureJ2X.

5.5 Verificación del fechado

Después de generada la base de datos de ancho de anillo, se verificó la calidad del fechado y la exactitud de la medición de cada anillo con el programa COFECHA (Holmes, 1983). A través de la medición de cada serie de crecimiento, el programa comparó estadísticamente el fechado de cada muestra, al correlacionar segmentos de 50 años con traslape entre períodos de 25 años (Holmes, 1983).

5.6 Generación de cronologías

La generación de cronologías se refiere a una serie de valores que representa los promedios de los índices de crecimiento anual estandarizados y fechados correctamente (Fritts, 1976). La generación de índices dendrocronológicos se realizó a través del programa ARSTAN (Cook y Holmes, 1984).

ARSTAN realizó la estandarización de las series individuales de cada núcleo de crecimiento al remover tendencias biológicas no relacionadas con el clima. El procedimiento de estandarización aplica una curva exponencial negativa o línea recta a la serie de medición y los índices resultan de dividir el valor anual de medición entre el valor obtenido de la curva; esto produce una serie de índices normalizados (cronologías) con media de 1,0 y varianza homogénea (Cook, 1987). A través de la subrutina FMT, de la Librería de Programas Dendrocronológicos de la Universidad de Arizona (DPL, por sus siglas en inglés), se organizaron los datos en dos columnas y por medio del mismo programa, se generó una línea flexible estandarizada a nivel década (“spline” decenal) para resaltar eventos de baja frecuencia.

Los datos generados por el programa FMT definidos como COLUM y SPLINE se graficaron para generar la cronología de índice de ancho de anillo, y destacar eventos interanuales y multianuales en Excel 2016 de Microsoft.

5.7 Análisis dendroquímico

El análisis químico que se utilizó para determinar los metales pesados que pudieran encontrarse en las muestras de madera, fue por medio de un microscopio electrónico de Escaneo y Transmisión (SEM, por sus siglas en inglés), marca QUANTA FEG 650, que se encuentra en el Laboratorio de Centro de Investigación en Sustentabilidad Energética y Ambiental del Noreste (CISEAN) en instalaciones de la Universidad Autónoma del Noreste (UANE), Matamoros

Tamaulipas. (Figura 9). Se seleccionaron dos muestras de raíz de los sitios RSA, ADJ y STM y dos muestras de tallo; una muestra por cada sitio (ADJ y RSA). Las muestras se cortaron en secciones de 5 anillos y se pulieron con una lija estéril para evitar contaminantes externos. Se colocaron en la cámara de bajo vacío para el análisis por el Espectrómetro de Dispersión de Energía (EDS) y se realizó un mapeo general de madera temprana y tardía, uno del año inicial y otro del año final del quinquenio (1980 y 1985, 1990 y 1995, hasta el 2015.).

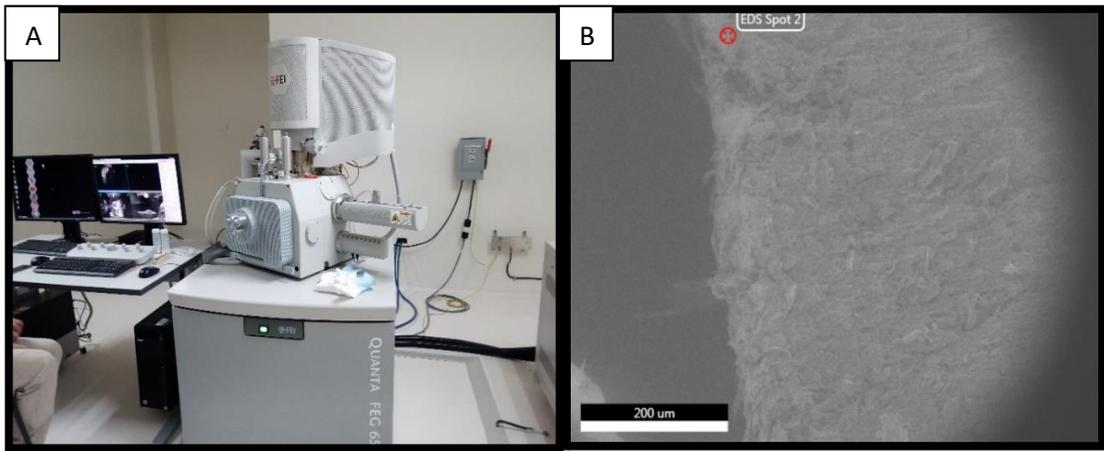


Figura 9. A) Microscopio electrónico de barrido QUANTA FEG 650 para análisis químico de anillos de crecimiento de *Taxodium mucronatum*; B) mapeo general de madera temprana y de madera tardía. La amplificación es de 200 μm .

Mediante el análisis EDS se determinaron los elementos con mayor porcentaje mol en el Ancho de Anillo (Figura 10 y 11) y se comparó con los índices de crecimiento del Ancho de Anillo (IAA), mediante gráficos comparativos en el programa Excel 2016 de Microsoft.

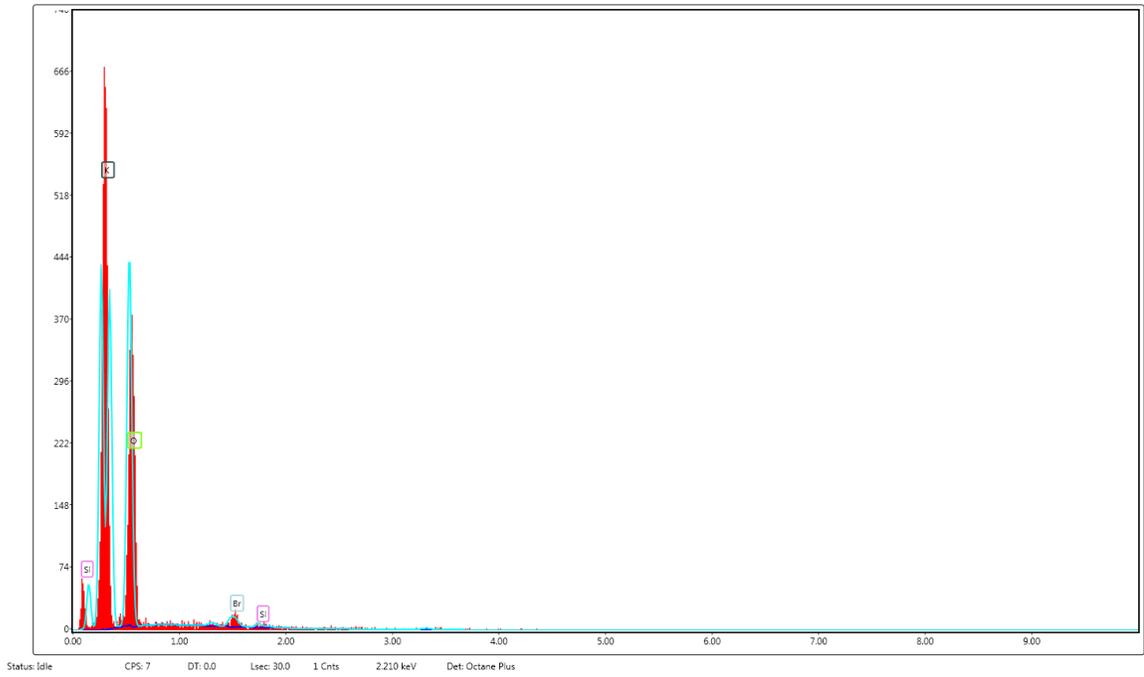


Figura 10. Espectro de Dispersión de Energía de la madera de *T. mucronatum*.

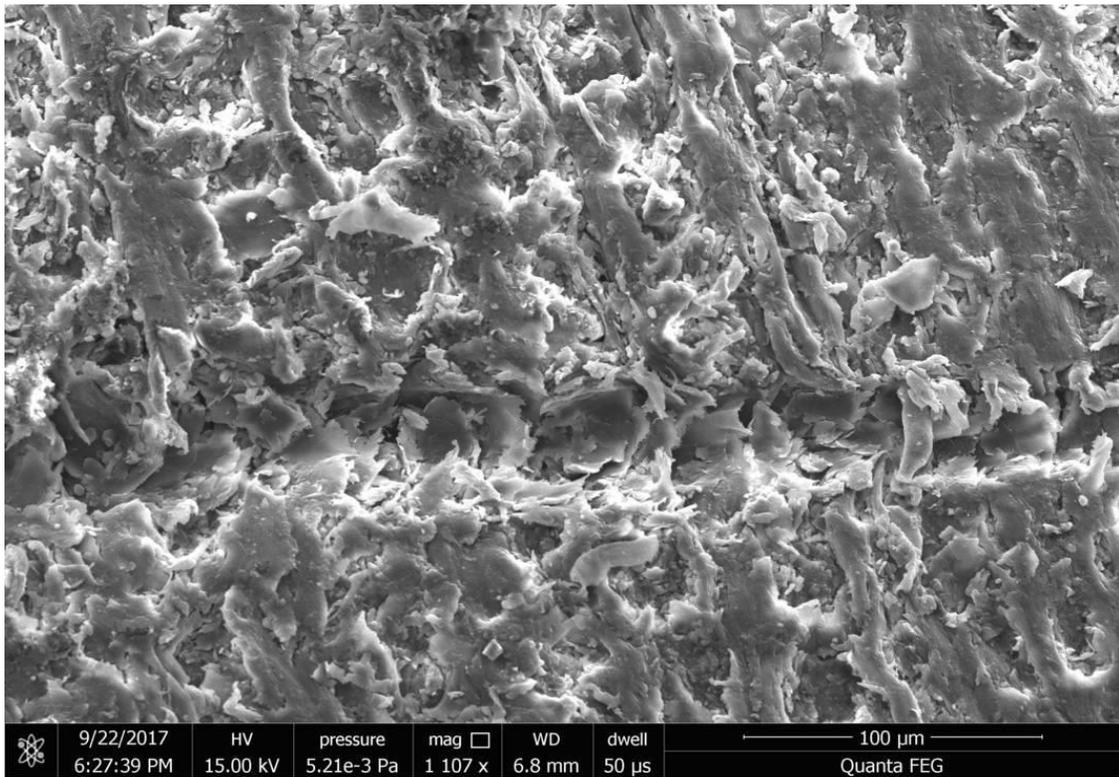


Figura 11. Análisis puntual de madera tardía y madera temprana.

5.8 Diseño Experimental

Se realizó una prueba de “t” para contrastar los resultados de niveles de metales pesados entre los dos sitios y una prueba de correlación de Pearson para observar el nivel de significancia entre las concentraciones de metales pesados y edad del sabino.

5.9 Análisis de Agua y suelo

El análisis de agua y suelo se llevó a cabo en el laboratorio de Suelos INIFAP CENID-RASPA Gómez Palacio. Se analizaron cuatro variables, las cuales fueron: materia orgánica (M.O.), que se analizó a través del método Walkley and Black; pH y conductividad eléctrica con un potenciómetro y conductímetro, respectivamente. Para Ca se realizó mediante espectrometría de Absorción Atómica.

VI. RESULTADOS

6.1 Resultados de suelo y agua

El análisis de suelo para los tres sitios estudiados muestra características muy similares entre ellos, excepto para el sitio ADJ, el cual indica menor fertilidad (4.50%) y mayor concentración de calcio (32.76 meq/L). El sitio RSM presenta valores de fertilidad de 8.43% y de contenido de calcio (Ca) de 14.08 meq/L, mientras que el sitio RSA, presenta mayor porcentaje de fertilidad (9.01%) y menor concentración de Ca (12.85 meq/L) (Cuadro 2).

El tipo de suelo que se encuentra en la región carbonífera de Sabinas, Coahuila es calcáreo (Aguilera, 1979), lo cual explica las altas concentraciones de Ca en los resultados de suelo. La elevada concentración de materia orgánica, tiene como origen el material vegetal de bosque de galería y genera poca movilidad de metales pesados en el suelo, debido a su capacidad de adsorción, aunque la formación de quelatos puede favorecer la movilidad de metales (Martínez, 2016).

Cuadro 2. Análisis físico-químico de suelo para los sitios ADJ, STM y RSA en sustrato de los bancales del río Sabinas, Coahuila.

Sitio	Adjuntas (ADJ)	Río Santa María (STM)	Río Sabinas (RSA)
Análisis Físico			
Arena (%)	54	20	26
Limo (%)	34	34	34
Arcilla (%)	45	24	34
Textura	Franco Arcillo Arenoso	Franco Arcillosa	Franca
Fertilidad			
Materia Orgánica (%)	4.50	8.43	9.01
Salinidad Y Sodicidad			
PH	7.99	8.09	8

Las muestras de agua poseen valores similares en pH y Conductividad Eléctrica, mientras que la concentración de calcio solo varía para el sitio RSA, donde es mayor la concentración con 0.75 ppm (Cuadro 3). Las altas concentraciones de Ca en agua son congruentes con las concentraciones de suelo, situación que influye en consecuencia sobre las concentraciones de calcio presentes en las raíces expuestas, las cuales se encuentran en contacto directo con el suelo y agua.

Cuadro 3. Análisis de calidad de agua para los sitios ADJ, STM y RSA.

Sitio	Adjuntas (ADJ)	Río Santa María (STM)	Río sabinas (RSA)
Calcio total (ppm)	30.15	35.11	35.83
PH	6.9	7.0	6.9
Conductividad Eléctrica (CE, dS/m ²)	0.6	0.6	0.75

6.2 Resultados dendrocronológicos

Las muestras totales fechadas para la generación de la cronología fueron 43 núcleos de crecimiento. La cronología se extiende para el período 1853-2016 (164 años) (Cuadro 4). Por otra parte, las muestras colectadas para el análisis dendroquímico tuvieron una extensión de 137 años (1880-2017).

Cuadro 4. Periodo considerado para el análisis químico en muestras de Raíz y Tallo

Clave de muestra	Parte del árbol	Periodo
ADJ-R	Raíz	1976-2005
STM	Tallo	1940-1995
STM-R	Raíz	1971-2015
RSA	Tallo	1940-2005
RSA-R	Raíz	1976-2015

La calidad del fechado de las muestras fue adecuada, con una intercorrelación entre series de 0.358, $p < 0.001$ y una sensibilidad media de (0.663), que indica una respuesta común de los árboles a la variabilidad climática del área (Cuadro 5). La correlación es baja pero aceptable para esta especie, la cual presenta problemas de crecimiento, y generalmente la correlación fluctúa entre 0.20 y 0.45. (Villanueva 2007).

Cuadro 5. Parámetros estadísticos de las muestras de incremento radial analizadas por el programa COFECHA.

Parámetro	Resultado
Número de series fechadas	43
Serie maestra	(1853-2016)
Total de anillos en toda la serie	3064
Anillos fechados a comprobar	3064
Intercorrelación entre series	0.358
Sensibilidad media	0.663
Segmentos con posibles problemas	49
Longitud media de las series	71.3

6.2.1 Cronología

Con base a los valores del índice de ancho de anillo (IAA), se generó una serie de tiempo de anillos de crecimiento de 164 años, período 1853-2016. Se observa que los valores por debajo de la media (1.0) señalan períodos secos como los ocurridos de 1853 a 1857, 1864 a 1869, 1887 a 1895, 1939 a 1955, 1962 a 1975 y 2000 a 2006, en contraparte, valores mayores a la media indica condiciones húmedas (Figura 11).

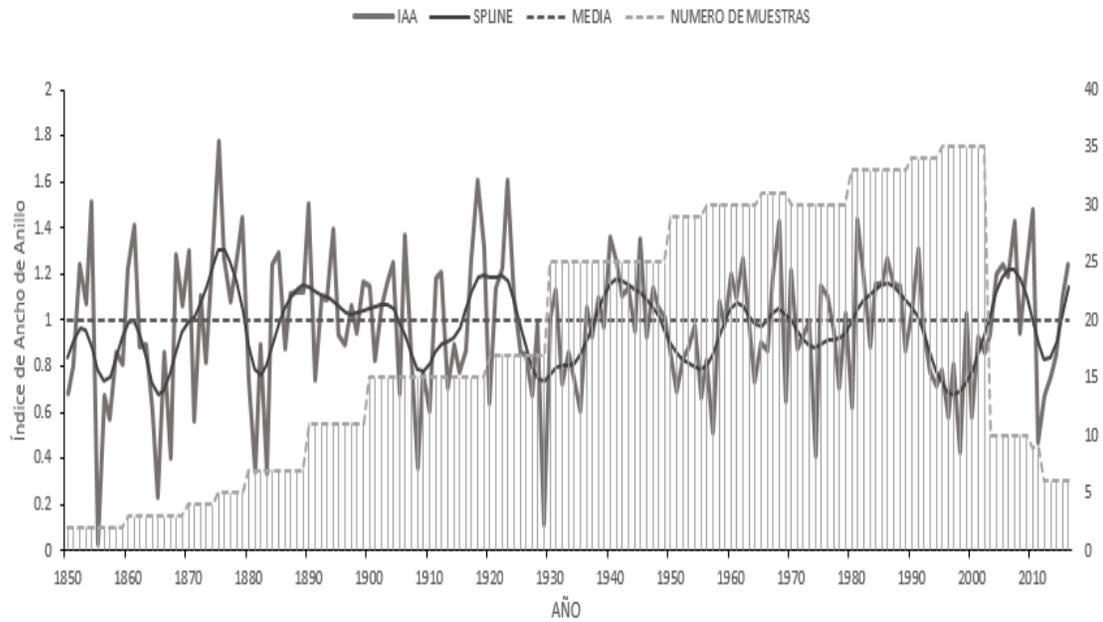


Figura 12. Series de crecimiento de 164 años para el río Sabinas, Coahuila. La línea gris continua es el índice interanual, la línea horizontal punteada es la media de la serie de crecimiento, la línea flexible obscura señala la variabilidad multianual a nivel década y la línea gris punteada indica el número de muestras involucradas en generar los índices anuales.

En estudios dendrocronológicos previos de arbolado muerto ubicado en parajes del río Sabinas, se determinó el crecimiento extraordinario del arbolado ocurrido en 1992, pero a partir de 1993 disminuyó el crecimiento hasta el año 2002 que concuerda con la muerte masiva del arbolado, probablemente originado por una desviación de agua del cauce, asociado a la presencia de la sequía, que se extendió casi por una década (1993-2001) (Villanueva *et al.*, 2014) (Figura 12).

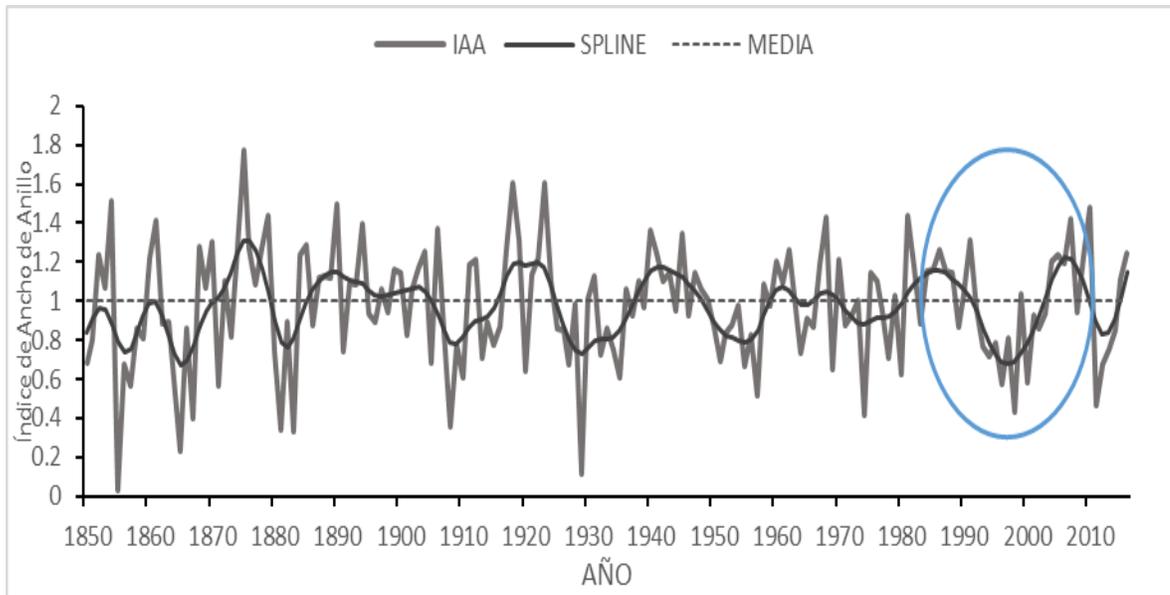


Figura 13. Periodo de sequía detectado en la serie de crecimiento de anillo total de sabino, ocurrido en las décadas de 1990 y 2000.

6.3 Resultados dendroquímicos

6.3.1 Resultados generales

Los elementos encontrados en los anillos de sabino mediante inspección con microscopio electrónico de barrido fueron Ca^{+2} , Cr^{+2} , Al^{+3} , C^{+4} , Mg^{*2} , Si^{+4} y Br^{+3} . Los elementos que tuvieron mayor porcentaje mol fueron Ca y Cr, con un promedio general de Ca en raíz de 84.61% y de 87.99% en tallo, mientras que el Cr mostró un promedio general en raíz de 26.72% y en tallo de 41.8%; otros elementos que se encontraron en menor concentración fueron Al y Br, con un promedio general de 9.58% y 6.68%, respectivamente (Figura 13).

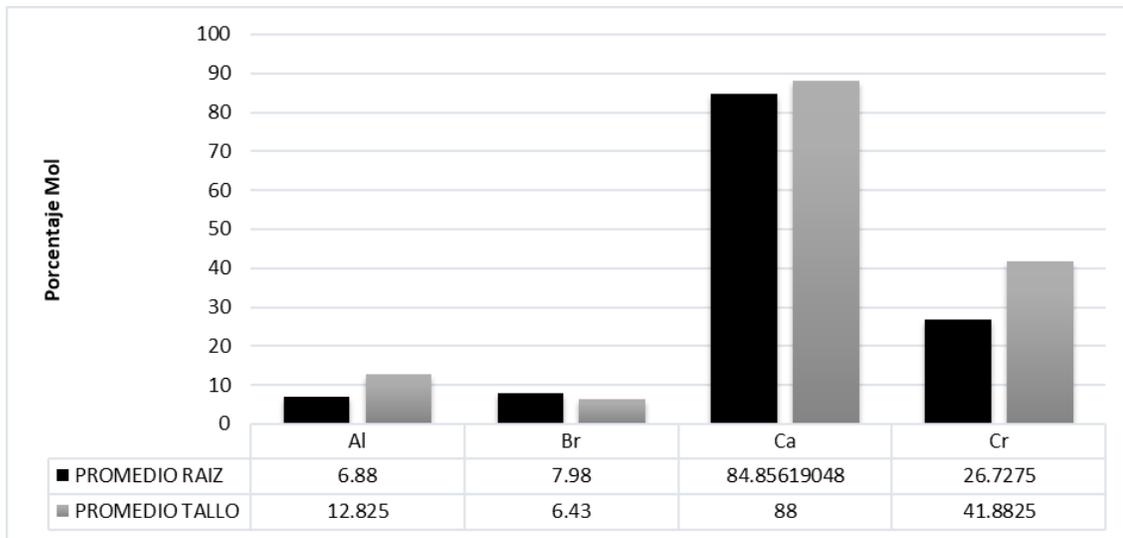


Figura 14. Porcentajes de los elementos encontrados en los anillos de *T. mucronatum* para raíz (barra negra) y tallo (barra gris).

La concentración de los elementos encontrados en el período 1920-2015 fue elevada en calcio y cromo. En el período estudiado se excluyó el sub período 1931 a 1935, donde no se obtuvo información (Figura 14).

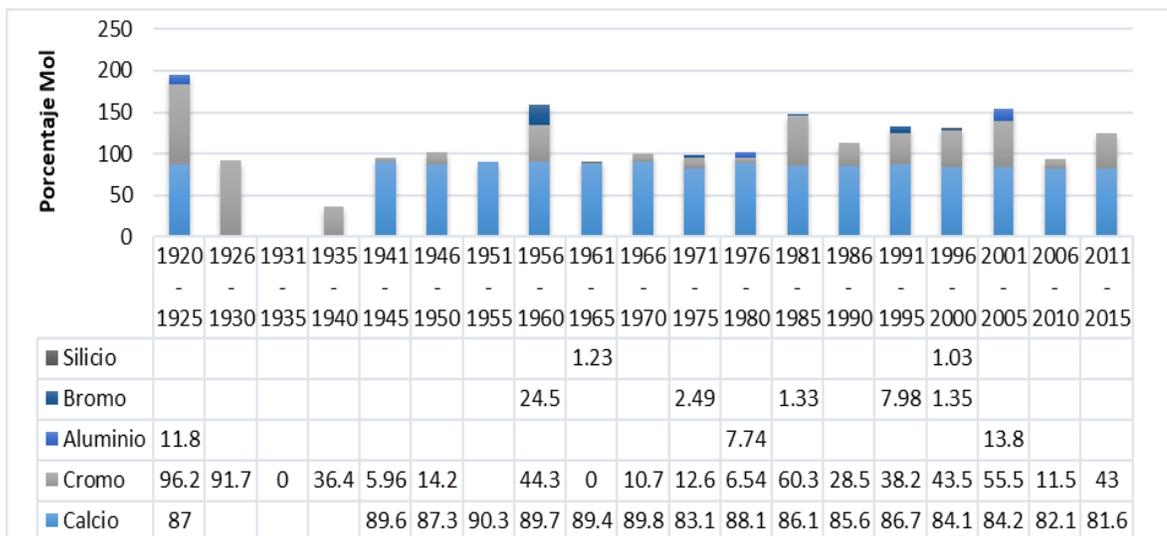


Figura 15. Porcentaje total por periodo de los elementos encontrados en los Anillos de *T. mucronatum*.

Estudios realizados previamente con sabino (Martínez, 2016; Michel, 2016; Morton *et al.*, 2016) demostraron el potencial dendroquímico de la especie para traslocar en sus anillos, diferentes contaminantes del suelo como Cd, Cu, Mo, Ni, Pb Sb y Zn, y otros contaminantes ambientales urbanos pertenecientes al grupo platino como Pb, Pt y Rh. En el presente estudio, se encontraron otros elementos diferentes a los reportados anteriormente, la concentración de Cr, Al, Si, Br; están fuertemente relacionados con los desechos de las minas de carbón y desechos industriales.

Es posible que el SEM solo determinará los elementos con mayor porcentaje en el tejido del anillo escaneado y no posea capacidad para determinar contenidos de elementos que se encuentran en pequeñas cantidades (ppm), las cuales si son detectados con otros métodos analíticos, como es el caso del ICP-MS y de absorción atómica. Los elementos encontrados en la madera de los anillos, frecuentemente se detectan en función a la técnica de análisis utilizada (Cutter, 1993), por lo que es importante tener un conocimiento previo de los contaminantes generados durante los procesos industriales y que puedan estar presentes en los anillos de los árboles.

En un estudio realizado por Nuhoglu (2005), en el cual se utiliza el mismo método analítico, es decir, espectrómetro de dispersión de energía (EDS) para el análisis de metales pesados y oligoelementos generados por las cenizas de una central térmica; determinó, que los elementos encontrados en los crecimientos anuales de pino rojo turco fueron Mg, Si, Al, Nb, Ca, K, S, Fe, Zn y Ti, de los cuales el Ca tuvo un porcentaje mayor a 30 y el Si estuvo presente con valores de 5.69 y 6.56. Aunque en el presente estudio, no se realizó la comparación con el material de desecho de las minas, las concentraciones encontradas en los anillos de sabino indican altos porcentajes de calcio y cromo, este último, con potencial para afectar el crecimiento, desarrollo y procesos fotosintéticos en las plantas; se considera un elemento tóxico en los organismos, cuando se encuentra presente en altas concentraciones (Shanker *et al.*, 2005).

6.3.2 Análisis estadístico

El promedio de porcentaje mol de calcio en base a los promedios de las muestras de raíz, fue mayor para el sitio STM (87.88), seguido por el sitio ADJ (85.28) y finalmente RSA (81.23) (Cuadro 6). El promedio del porcentaje mol de tallo fue mayor para el RSA (88.14) con relación al sitio STM (87.84).

Cuadro 6. Estadísticos descriptivos y de dispersión de contenido de calcio para los sitios ADJ, RSA y STM en raíz y tallo para los sitios RSA y STM.

Datos	ADJ-	RSA_RAIZ	STM_RAIZ	RSA_TALLO	STM_TALLO
Estadísticos	RAIZ				
Promedio	85.28	81.23	87.88	88.14	87.84
Desviación	2.94	3.83	2.60	3.87	2.78
Estándar					
Varianza	8.69	14.71	6.79	14.98	7.75
Mínimo	80.93	77.98	84.36	78.97	82.95
Máximo	87.47	89.97	91.57	92.59	90.59
N	4	8	9	13	12

El promedio del porcentaje mol de Cr en muestras de raíz tuvo mayor valor para el sitio ADJ (61.35), mientras que en los sitios STM Y RSA fue menor, 15.78 y 14.58, respectivamente. En muestras de tallo, el promedio fue mayor en RSA (53.55) en comparación al sitio STM (30.21) (Cuadro 7).

Cuadro 7. Estadísticos descriptivos y de dispersión de contenido de calcio para los sitios ADJ, RSA y STM en raíz y en tallo para los sitios RSA y STM.

Datos	ADJ-Raíz	RSA_Raíz	STM_ Raíz	RSA_Talo	STM_tallo
Estadísticos					
Promedio	61.35	14.58	15.78	53.55	30.21
Desviación Estándar	36.01	11.54	17.58	40.02	37.73
Estándar					
Varianza	1297.38	133.34	309.22	1601.78	1423.72
Mínimo	5.76	5.24	4.95	5.5	5.96
Máximo	93.81	44.61	61.43	98.43	96.82
N	6	9	9	8	8

La prueba de “t” para determinar diferencia estadística entre la concentración de calcio en tallo (fuste) y de raíz del arbolado presente en el sitio RSA indicó diferencia significativa para los valores derivados para la prueba de una cola ($p < 0.000398$) y dos colas ($p < 0.0007968$), lo que indica que las concentraciones son diferentes en ambas partes del arbolado. Esta condición fue diferente para el sitio STM, donde las concentraciones de calcio en raíz y tallo fueron estadísticamente análogas. También demuestran que, las concentraciones entre Ca y Cr tienen una relación significativa entre sitios y entre muestras de raíz y tallo, ($P \leq 0.025$).

6.3.3 Análisis de Elementos

6.3.3.1 Análisis de Ca

La comparación entre porcentaje mol muestra una tendencia moderada para los sitios RSA y STM ($r=0.43$, $p<0.025$). El porcentaje del calcio entre sitios fluctuó de forma similar, particularmente en el periodo 1940-1980 (Figura 15).

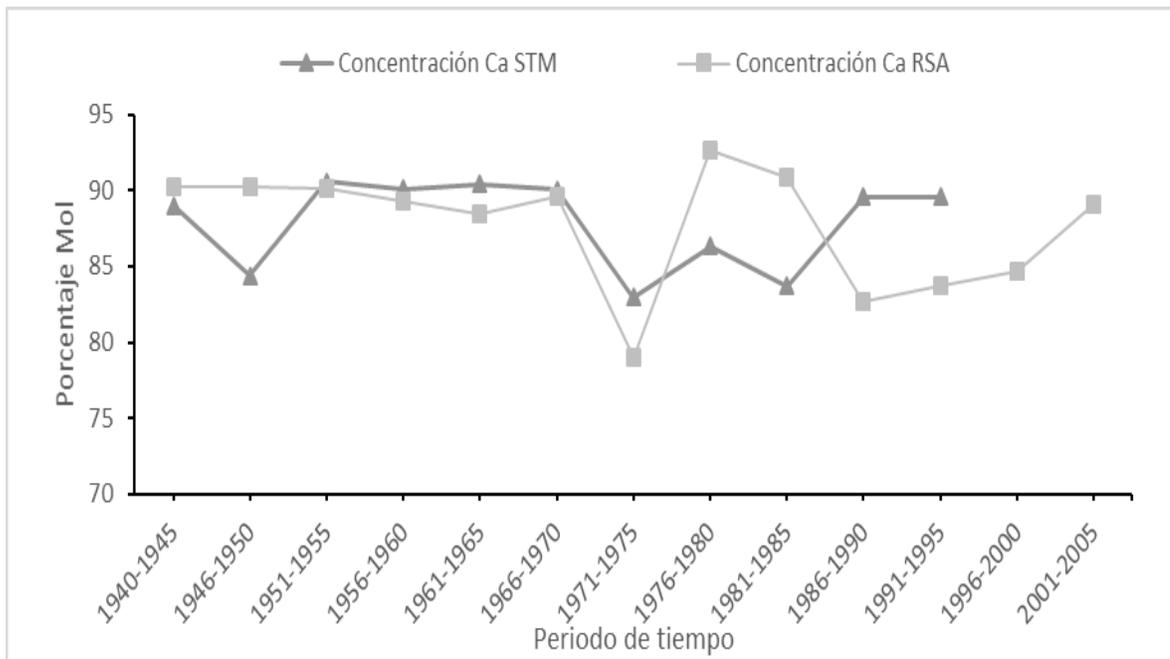


Figura 16. Porcentaje de Calcio presente en los sitios STM y RSA en anillo de crecimiento de tallo. La tendencia entre ambos sitios, muestra una correlación moderada para este elemento (0.43 , $p<0.25$).

La variación de porcentaje mol entre los sitios ADJ, RSA y STM a nivel raíz para el elemento calcio, indican similitud. Las correlaciones obtenidas entre sitios, corroboran la semejanza gráfica con base a las correlaciones positivas entre todos los sitios; los sitios que obtuvieron menor correlación fueron ADJ y RSA ($r=0.188$, $p<0.05$) y los de mayor correlación fueron RSA y STM ($r=0.43$, $p<0.25$) y

ADJ y STM ($r = 0.83$ $p < 0.25$), El periodo que muestra mayor semejanza fue de 1991 al 2010 (Figura. 16).

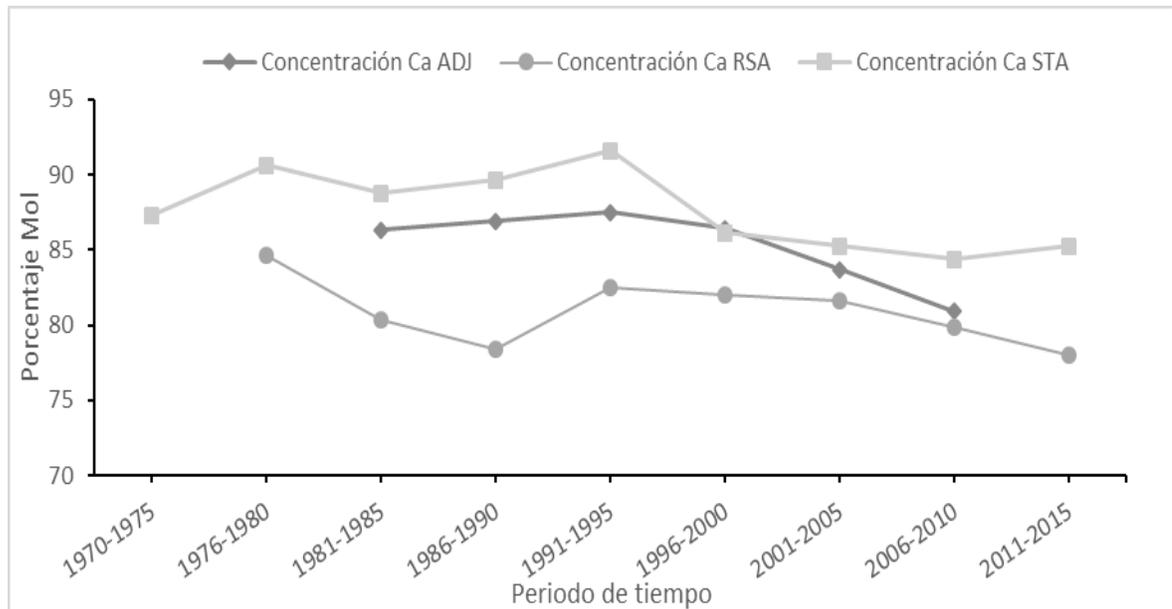


Figura 17. Porcentaje de Calcio presente en los sitios STM, RSA y ADJ, en muestras de raíz.

Las comparaciones dendroquímicas de los diferentes sitios y muestras, comprueban que la variabilidad de porcentaje de Ca y el índice de crecimiento indican tendencias muy similares en gran parte del periodo analizado. Estos datos concuerdan con los valores obtenidos por De Visser (1992), que señala que la relación entre los elementos presentes de la albura al duramen pueden estar influenciados por su movilidad, destacando que, en las muestras de duramen, la concentración de Ca disminuyó con la edad.

Aunque las concentraciones de metales pesados y presencia de sequias para ciertos periodos de tiempo pudieron haber causado la muerte de gran parte de la población de sabino, el arbolado que permanece en los diferentes sitios aledaños al río Sabinas, probablemente asimiló altas concentraciones de metales pesados.

Las modificaciones fisiológicas que pueden ser adjudicadas a las concentraciones de Ca, presente en su forma divalente en el árbol; actúa como medio para reticular los materiales de la pared celular y mantener la permeabilidad selectiva de las membranas celulares (McLaughlin,1999). Esta selectividad puede explicar el bajo contenido de otros elementos encontradas en los anillos del sabino, ya que la concentración de Ca es superior a las de otros elementos encontrados. Estos datos pueden ser corroborados con el estudio realizado por Österås (2004), en un bosque de coníferas en Suecia, donde utilizó algunas especies como *Picea abies* para analizar el efecto de productos de desecho de la industria forestal, con el objetivo de contrarrestar la disminución de nutrientes y obtener mayor producción de madera. Donde los resultados indican que, los cambios en la biodisponibilidad de metales pesados influyen en la acumulación de Ca, además de que, se altera el crecimiento de los árboles y por ende la formación de madera. Los resultados de ese estudio demostraron que cuando hay mayor acumulación de metales pesados como Zn y Cu, la concentración de Ca disminuyó; mientras que la alta concentración de la asociación de los metales Cu y Cd redujo el diámetro del tallo y su efecto tóxico se relacionó a las bajas concentraciones de Ca.

6.3.3.2 Análisis de Cromo

La variabilidad del porcentaje de Cr en la raíz entre sitios, mostró una tendencia poco similar del periodo de 1980 a 1995, y del periodo del 2001-2015 se observa similitud entre los sitios de estudio (Figura 17).

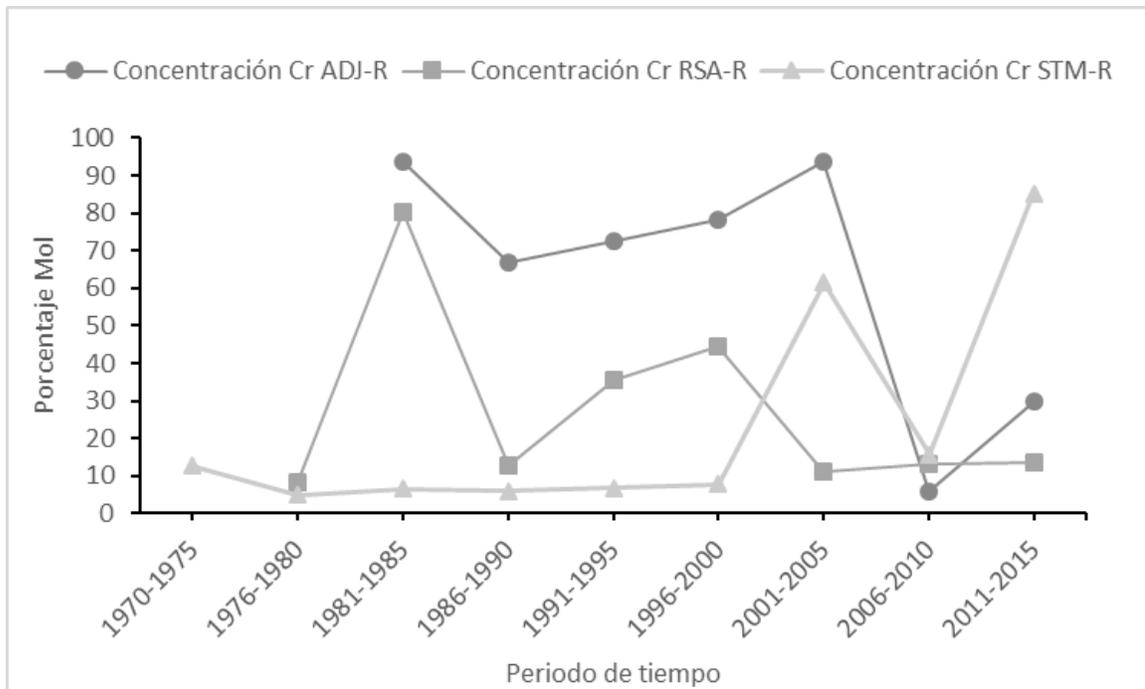


Figura 18. Porcentaje de cromo presente en los sitios STM, RSA y ADJ, en muestras de raíz.

La concentración de cromo en la raíz del arbolado presente en los sitios ADJ y RSA fue significativa ($r=.525$, $p<0.025$). Por otra parte, esta relación fue negativa entre los sitios ADJ-STM y RSA-STM ($r=-0.217$, -0.372 , $p<0.025$), lo que indica, que la concentración de Cromo difirió entre sitios.

En una revisión realizada por J. Barcelo (1987), determinó que el Cr es acumulado fundamentalmente en las paredes celulares de las células corticales de la raíz y en las vacuolas, sólo una proporción muy pequeña del Cr alcanza los vasos del xilema. Acorde a los resultados de este estudio, estos datos podrían justificar las bajas concentraciones de Cr en las muestras de tallo, ya que solo se logró generar una reconstrucción dendroquímica para un periodo de tiempo continuo en la raíz; En el período de 1996 al 2005 se determinó un incremento en el porcentaje de Cromo para los tres sitios analizados y este periodo, coincide con el decremento poblacional de sabino para el periodo en común de 1992 al 2002,

donde se presentó la muerte de algunos de sus ejemplares (Villanueva *et al.*, 2014).

6.3.4 Comparación entre el IAA y concentraciones de Ca y Cr

6.3.4.1 Análisis de Calcio

Los resultados obtenidos al comparar el IAA y el porcentaje mol de Ca en muestras de raíz y tallo, muestran una relación entre ambas variables para todos los sitios analizados, ya que como se puede observar en la Figura 19, existe una similitud entre el comportamiento de ambas variables; sin embargo, para el sitio ADJ en muestras de raíz, no indica similitud entre las variables porcentaje mol de Ca e IAA; por lo tanto, el grafico señala que a mayor concentración o porcentaje de Ca, menor es el incremento del IAA en el árbol, lo cual probablemente se deba a efectos de dilución, cuya concentración en el agua es mayor cuando el caudal es menor . La correlación entre sitios fue significativa, ya que todas muestran una correlación positiva, siendo el sitio STM en raíz, la que tiene menor correlación con una $r=0.161$, mientras que para el análisis de raíz en el sitio ADJ, indica una correlación mayor $r=0.610$.

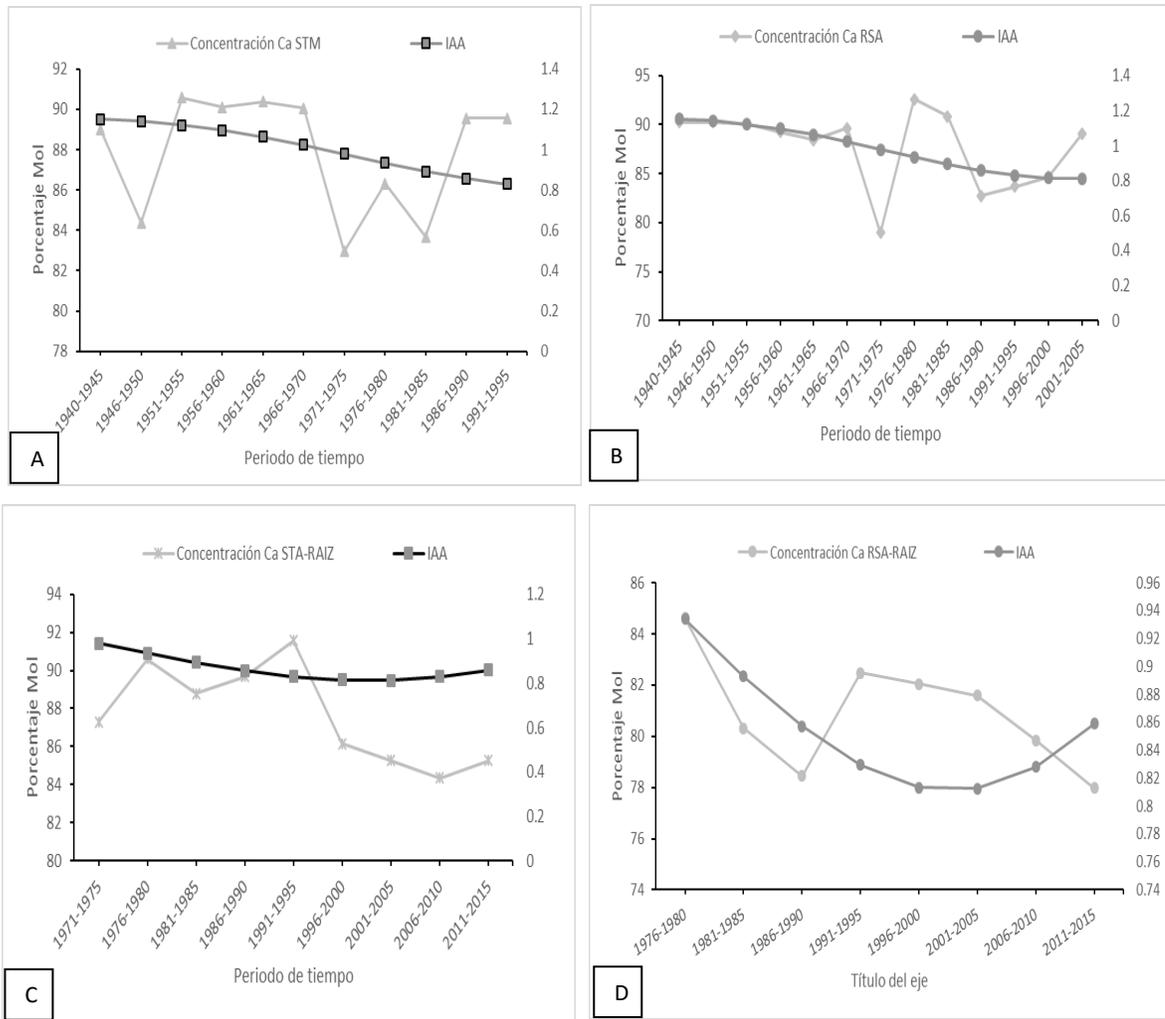


Figura 19. Comparación entre el Índice de Ancho de Anillo (IAA) y las concentraciones de Calcio para los sitios STM y RSA en muestras de tallo (A, B). Comparación entre el índice de ancho de anillo y la concentración de Calcio par los sitios STM y RSA en muestras de raíz (C, D).

La respuesta del porcentaje de Ca es mayor al incremento del IAA (Figura 20), y la correlación entre ambas variables fue significativa ($r= 0.61$).

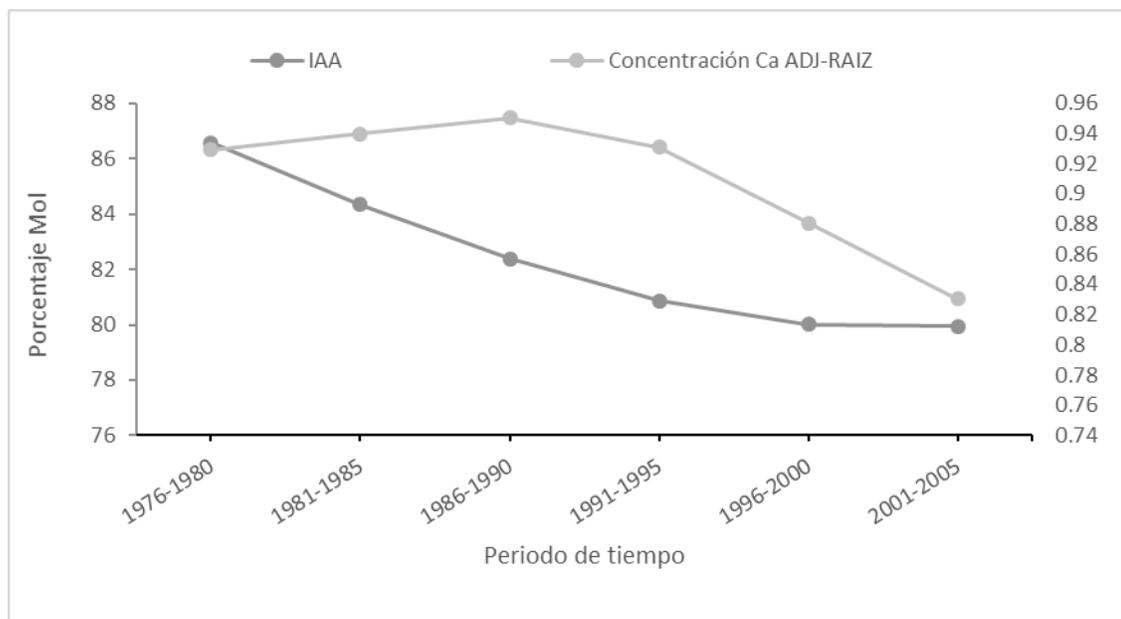


Figura 20. Concentraciones de Ca en el sitio adjuntas comparado con el índice de ancho de anillo para el periodo de 1976 al 2005.

6.3.4.2 Análisis de Cromo

La comparación entre el porcentaje de Cromo y el IAA muestra similitud en el patrón de comportamiento de los sitios ADJ ($r=.513$, $p<0.025$) y RSA ($r=.274$, $p<0.025$), excepto para el período 2006- 2015 en el sitio ADJ y 2001-2015 para el sitio RSA (Figura 21).

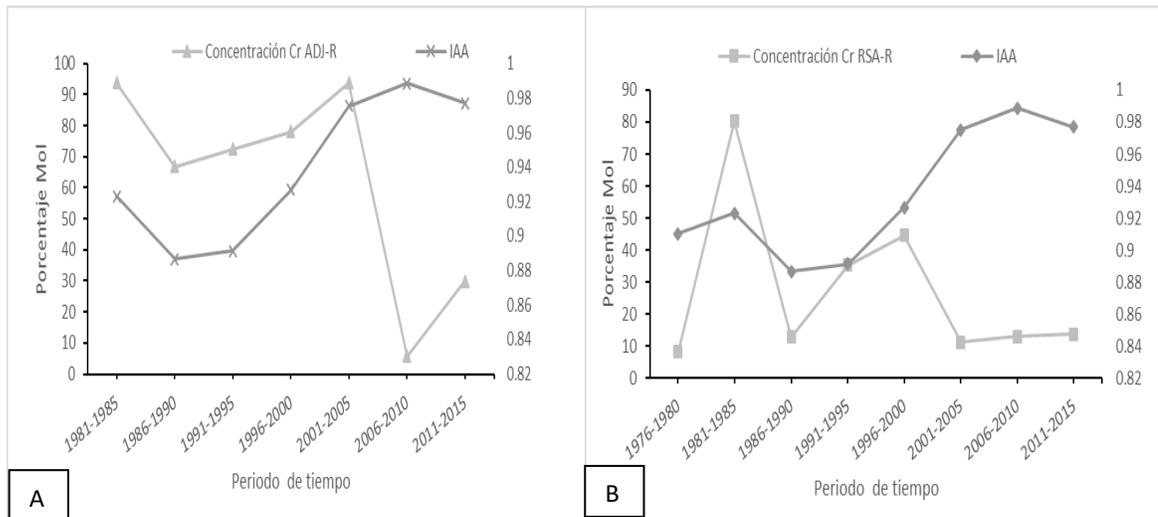


Figura 21. Comparación entre el IAA y el porcentaje de Cromo para el sitio ADJ para muestras de Raíz (a) y comparación entre el IAA y el porcentaje de Cromo para el sitio RSA en muestras de Raíz (b).

Los resultados obtenidos de la comparación de IAA y concentración de Cr en raíz, indican un comportamiento similar para los tres sitios. En años donde la variabilidad en el IAA es mayor, también se observa un incremento en la concentración de Cr para el mismo periodo, caso concreto 2001-2005 para el sitio ADJ, 1981-1985 para el sitio RSA y 2001-2005, 2011-2015 para el sitio STM (Figura 22). Sin embargo, hay un periodo en común para los tres sitios, que muestra diferencia entre el comportamiento del IAA y porcentaje mol; este periodo se extiende de 2006 a 2010 para el sitio RSA y STM; mientras que en sitio ADJ se observa a partir de 2011.

Aunque los gráficos muestran una similitud entre las variables IAA y porcentaje mol de Cr, las correlaciones para el sitio ADJ y RSA es moderadamente significativa y negativa (0.513 y $r = -0.274$, $p < 0.025$), respectivamente; donde el único sitio que tuvo una correlación significativa fue STM con una $r = 0.693$ ($p < 0.025$).

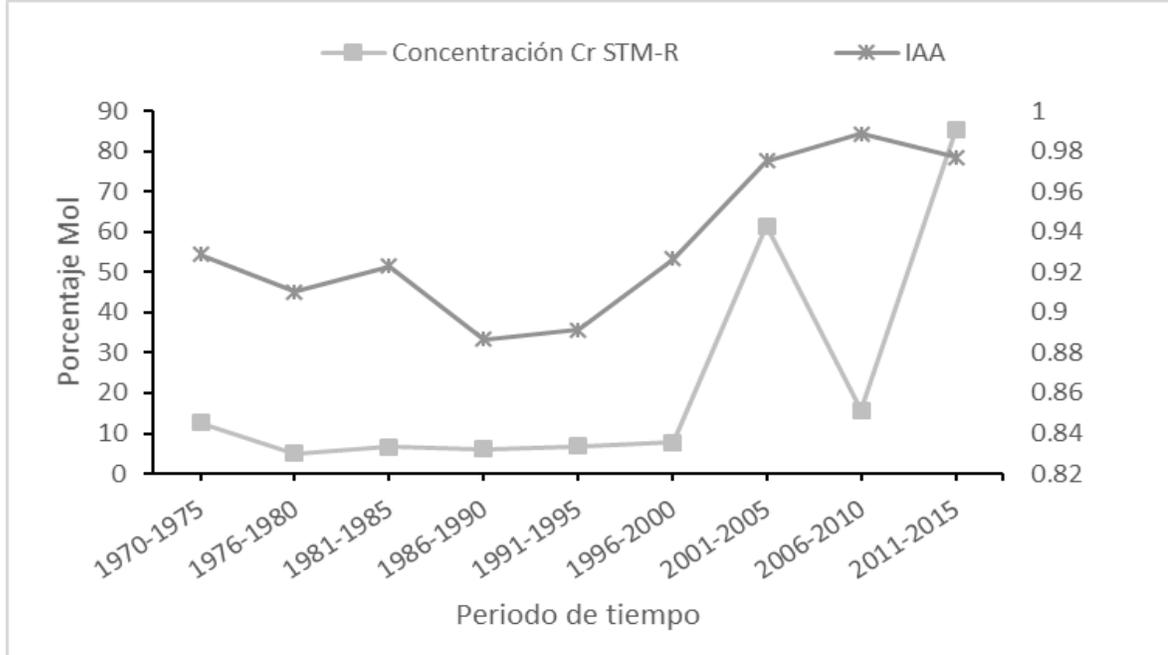


Figura 22. Comparación entre el IAA y el porcentaje de Cr para el sitio STM en muestras de Raíz.

La relación de la influencia climática del IAA y los porcentajes de cromo pueden estar estrechamente relacionados por la turgencia o movilidad de este ion, ya que la velocidad de la corriente a través de los vasos xilémicos influye en la cantidad de captación de metales a través de las raíces. Por lo tanto, si la velocidad de la transpiración es rápida, hay mayor captación de metales pesados, esta acumulación se da con mayor regularidad al inicio de primavera, cuando se desarrolla la madera temprana (Lepp, 1975). Aunque para el presente estudio, no se realizó un análisis de madera temprana y madera tardía, es posible determinar que la variabilidad en el IAA tiene influencia del clima, que a la vez determina la captación de metales pesados como es el caso de Cr, el cual como se discutió, indica correspondencia con el ancho de anillo; es decir, mayor crecimiento, mayor concentración de cromo.

6.4 Reconstrucción histórica de metales pesados para la cuenca carbonífera Sabinas Coahuila

La comparación entre los datos históricos en la zona carbonífera de Sabinas Coahuila, de México y el mundo, parecen tener relación con las concentraciones de metales pesados, como lo indica también la reconstrucción de estos contaminantes en los anillos de crecimiento de sabino (Figura 23), donde se observa, que algunos periodos significativos con altos porcentajes de metales pesados, también coinciden con algunos eventos históricos relevantes, como el periodo 1935-1940, el cual se destaca por la alta demanda de metales industriales a consecuencia de la Segunda Guerra Mundial (Sariego, *et al.*, 1988). También es importante mencionar, que en 1940 se fundó la industria Acerera más grande de México “Altos Hornos de México S.A (AHMSA)”, que fue potencial proveedor de acero durante el conflicto señalado (Sánchez, 1995); así mismo, en el periodo 1956-1960, se incrementó la producción de carbón y coque, debido a la modernización de maquinaria en la industria del carbón (Sariego, *et al.*, 1988); pero fue el período 2001-2005 cuando la producción de carbón se incrementó substancialmente en México (Gobierno del Estado de Coahuila, 2005) (Figura 23).

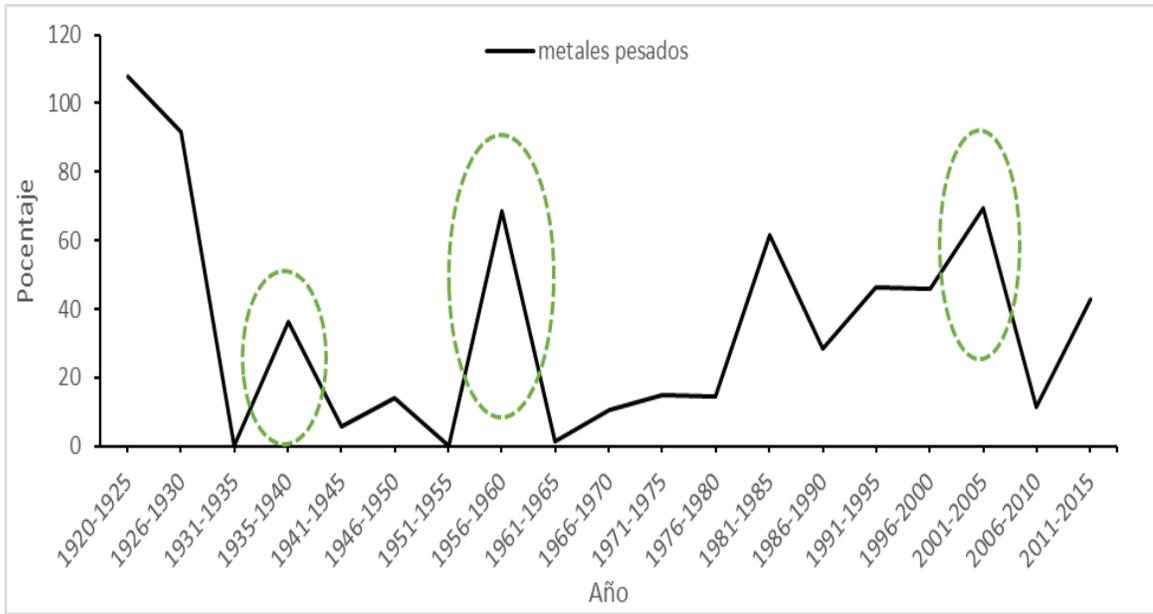


Figura 23. Concentraciones totales de los elementos encontrados en los anillos de *T. mucronatum* del año 1920 al 2015.

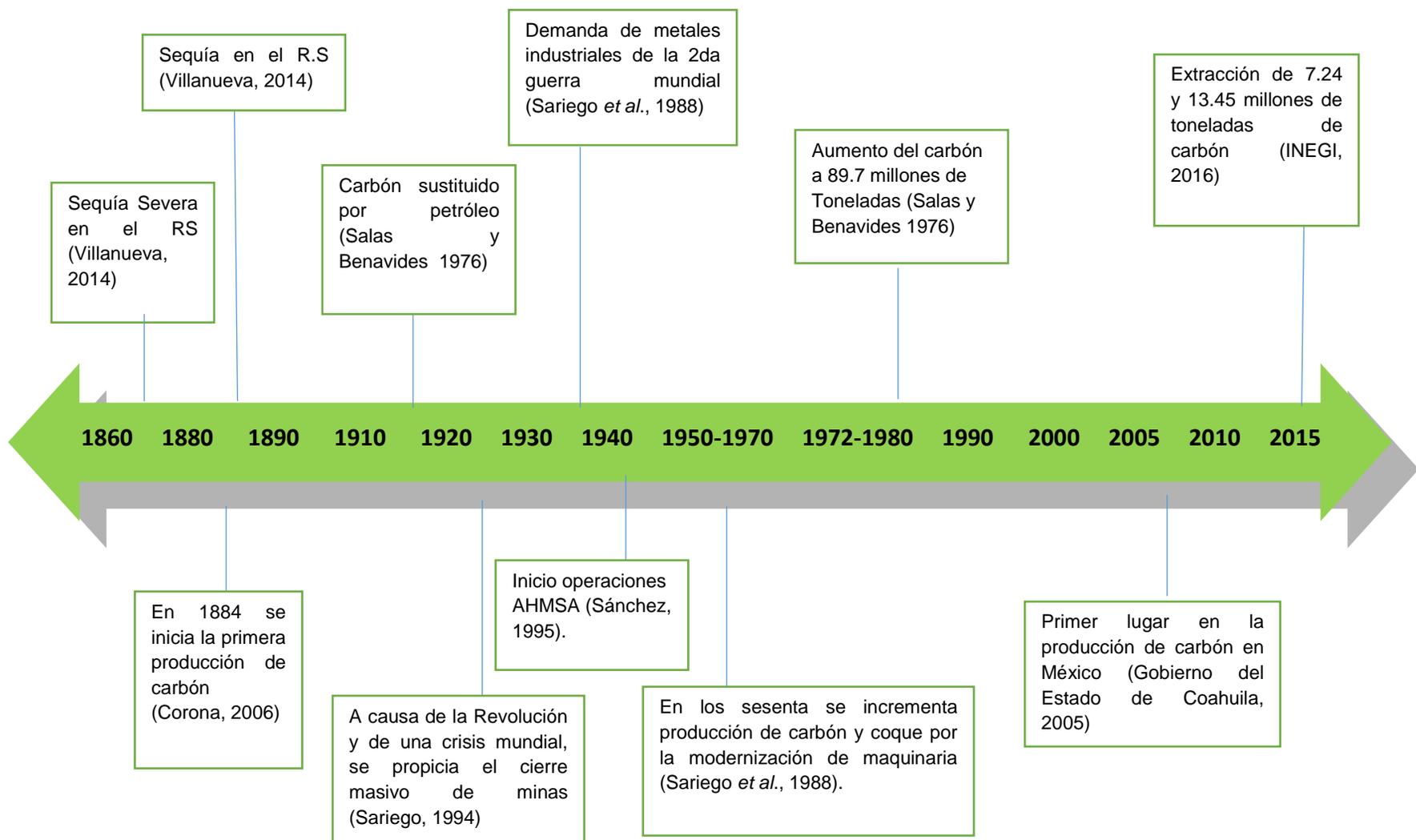


Figura 24. Línea del tiempo de los principales eventos relacionados al sitio de estudio y la minería del carbón en México.

Dentro de las concentraciones totales de Ca, Cr, Al, Br y Si, que se encuentran presentes en toda la extensión de la serie de crecimiento del arbolado en el río Sabinas, destaca el periodo de 1930 a 1935 por la ausencia de elementos; este periodo, coincide con la sustitución del carbón por el petróleo, mientras que la concentración más elevada, se encuentra en el periodo de 1920 a 1925. No obstante, que en el soporte documental se menciona una baja en la producción de carbón durante la “Revolución Mexicana” también se menciona, que la producción de carbón del período 1920-1940 fue de 3.9 millones de toneladas, lo que puede explicar las altas concentraciones de Cr en ese período, ya que el Cr es utilizado en la siderúrgica para la aleación de acero y hierro y las partículas que se emanan del proceso de aceración o refinación del fierro, son aquellas que son movilizadas a través de las corrientes de México y su dirección es Norte Oeste. Incrementando los contaminantes en los anillos de sabino desde ese período; en particular a partir de 1956, cuando se inicia con la alta explotación de carbón que continúa hasta 2004, donde su uso principal es con fines industriales (Corona *et al.*, 2006).

La región carbonífera es la primera a nivel nacional en la producción de carbón, donde los procesos industriales para su refinamiento y el lavado del mineral derivan en concentraciones de metales pesados, que se reflejan en la concentración de elementos en los anillos de los árboles, particularmente, en el período 2001-2005, donde las concentraciones de Al, Cr y Ca, son elevadas. El período 2006-2015, se caracteriza por una disminución en la producción, en especial el año 2015 con 7,245,472.00 toneladas, de las 13,453,540.00 que se produjeron en el 2014.

VII. CONCLUSIONES

La especie *T. mucronatum* Ten. tiene alto potencial para estudios dendroquímicos, ya que se logró generar una cronología de presencia de metales pesados y de otros elementos en la longitud de la serie para la región carbonífera de Sabinas Coahuila.

Los elementos encontrados en los anillos de sabino derivan de los residuos de procesos de la industria siderúrgica, relacionada con la explotación y refinamiento del carbón mineral en el río Sabinas, Coahuila y sub-cuencas relacionadas.

Todos los sitios estudiados presentan altas concentraciones de metales pesados en los anillos de crecimiento de tallo y raíz, principalmente Cr. Donde, la variabilidad climática reflejada en los IAA parecen jugar un papel importante en los procesos de absorción y translocación de Ca y Cr.

La caracterización analítica con el método SEM-EDS, es un método viable para realizar estudios dendroquímicos, ya que determina cualitativa y cuantitativamente algunos de los elementos trastocados en los anillos de los árboles. Esta técnica de análisis permite determinar de manera puntual a nivel celular, los elementos que se encuentran y su concentración (porcentaje) por elemento; además, es posible determinar los elementos que se encuentran en madera temprana y tardía en los anillos de los árboles, lo cual no es posible determinar con otros métodos utilizados comúnmente para estudios dendroquímicos, por lo cual, se recomienda esta tecnología para el análisis analítico en posteriores estudios dendroquímicos.

VIII. LITERATURA CITADA

- Aguilera-Herrera N., Hernández S. G., Vallejo G. E. (1979). Estudio Edafológico de Coahuila y Nuevo León. Universidad Nacional Autónoma de México. 3:58-80
- Álvarez P. y Longoria I. P. (2014). El uso y la conservación de la biodiversidad en propiedades colectivas. Una propuesta de tipología sobre los niveles de gobernanza. *Revista Mexicana de Sociología*. 76: 199-226
- Balouet, J., Smith K., Vroblesky D. Oudijk G., (2009). Use of Dendrochronology and Dendrochemistry in Environmental Forensics: Does It Meet the Dauert Criteria?. *Environmental Forensics* 10:268–276.
- Barañaño J.J., Penón E. A., Craig E., Cucciufo E., De Falco P. (2008). Manual para la Identificación de Maderas. Universidad Nacional de Lujan. Pp. 10.
- Biondiotti, E.A., Momoshima, N., Shortle, W. C., and Smith K. T., (1990). A historical perspective on divalent cation trends in red spruce stemwood and the hypothetical relationship to acidic deposition. *Canadian Journal of Forest* 20: 1850-1858.
- Comisión Nacional Forestal. (2011). Consideraciones tecnológicas en la protección de la madera. Folleto técnico. Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo. Pp. 10-12.
- Consejo de Recursos Minerales. (2003). Monografía Geológico- Minera del Estado de Coahuila. México D.F.
- Cook, E.R. and R.H. Holmes. (1984). Program ARSTAN and user's manual Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona. Tucson, AZ. 15p.
- Cook, R.E. (1987). The decomposition of tree-ring series for environmental studies. *Tree-Ring Bulletin*, 47, 37-59.
- Corona-Esquivel. R., Tritlla J., Benavides M. M., Piedad S. N., Ferruauquía V. I. (2006). Geología, estructura y composición de los principales

- yacimientos de carbón mineral en México. Boletín de la Sociedad Mexicana. Tomo LVIII. Núm. 1. P. 141-160
- Corona, C.S., and D.F. Grigal. (1995). Use of calcium/aluminum ratios as indicators of stress in forest ecosystems. *Journal of Environmental Quality* 24:209-226.
- Cutter B. E y Guyette R. P. (1993). Anatomical, Chemical, and Ecological Factors Affecting Tree Species Choice in Dendrochemistry Studies. *Journal of Environmental Quality* 22:611-619.
- De Visser, P.H.B. (1992). The relations between chemical composition of oak tree rings, leaf, bark, and soil solution in a partly mixed stand. *Canadian Journal of Forest Research* 22:1824.
- Durán M. H. y Chairez B. J. (1993). Exploración e inventario minero por carbón en la región carbonífera de Coahuila., Memorias de la XX Convención de la AIMMG, Acapulco Guerrero, México.
- Environmental Protection Agency (USEPA) (2002). Office of Research and development. *Persistan Organic Pollutants*, EE.UU.
- Fowke L.C., (1995). *Transmission and Scanning Electron Microscopy for Plant Protoplasts, Cultured Cell and Tissues*. Plant Cell, Tissue and Organ Culture. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Fritts, H.C. (1976). *Tree-rings and Climate*. Academic Press, London New York. San Francisco.
- Giménez A.M., Moglia J. G., Hernández P., (2005). *Anatomía de la Madera*. Universidad Nacional de Santiago Estero. Facultad de Ciencias Forestales.
- Gobierno del Estado de Coahuila, (2005). *Prontuario de indicadores socioeconómicos*, Secretaría de Desarrollo. Pp 14.16.
- Holmes, R.L. (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin* 43: 69-78.

- Información Geológica y Minera de México, (2014). Panorama Minero del estado de Coahuila.
- International Atomic Energy Agency, (2000). Biomonitoring of atmospheric pollution (with emphasis on trace elements) BioMAP. Viena Austria.
- Lepp N. W., (1975). The potential of Tree-Ring Analysis for Monitoring Heavy Metal Pollution Patterns. *Environ Pollut* 9:49-61.
- Leon Hernandez W. J., Espinoza N. (2001). Anatomía de la madera. Venezuela : ciencias de la tierra.
- Martínez Reyes. A., (2016). Evaluación de Anillos de Crecimiento de Árbol como Indicadores Históricos de Impacto Antropogénico en Zonas Urbanas. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geología y Ecología.
- Martínez, M. (1963). Las pináceas mexicanas, Universidad Autónoma de México. México, D.F. México. 345 p
- McLaughlin, S.B. (1999). Forest health in North America: Some perspectives on actual and potential roles of climate and air pollution. *Water, Air, and Soil Pollution* 116:151-197.
- Michel-Herrera A. (2016). Evaluación del Potencial Dendroquímico de la especie *Taxodium mucronatum* Ten. Como registro de Contaminación en Querétaro. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma De México Posgrado en Ciencias de la Tierra Centro de Geociencias.
- Morton-Bermea. O., Beramendi O. L., Hernandez G., (2015). Increase in platinum group elements in Mexico City as revealed from growth rings of *Taxodium mucronatum* Ten. *Environmental Geochemistry and Health* 38:195–202.
- Nuhoglu Y. (2006). A New Approach to Air Pollution Determination Using Annual Rings: Dendro-Chemical Elemental Analysis of Annual Rings by SEM-EDS. *Polish Journal of Environmental Studies* 15:111-119.

- Österås A. H., (2004). Interactions between calcium and heavy metals in Norway spruce. Tesis de Doctorado, Universidad de Stockholm, Sweden.
- Robinson, W. J. and R. Evans. (1980). A microcomputer-based tree-ring measuring system. *Tree-ring bulletin*. 40: 59 – 64
- Saint-Laurent, D., Lavoie, L., St-Laurent, J., Ghaleb, B., (2008). Use geopedological approach for the evaluation of sedimentation rates on river floodplains, southern Québec, Canada. *Catena* 73, 321–337.
- Salas, G., Benavides, L., (1976). La exploración y las reservas mexicanas de carbón. Instituto Latinoamericano del Fierro y el Acero (LAFIA) en Congreso: Usos del carbón en siderurgia: abastecimiento y tecnologías: México DF.
- Sariego, J.L. (1988). Enclaves y minerales en el norte de México. Historia social de los mineros de Cananea y Nueva Rosita. 1900-1970, México, Ediciones de la Casa Chata-ciESAS.
- Sariego R. J. (1994). Minería y Territorio en México: tres Modelos Históricos de implantación socio-espacial. *Estudios Demográficos y Urbanos*. 9-327-337.
- Servicio Geológico Mexicano. (2016). Panorama Minero del Estado de Coahuila. Pp. 2-17.
- Shanker A.K., Cervantes C., Loza T.H., Avudainayagam S., (2005). Chromium toxicity in plants. *Environment International* 31:739-753.
- Smith K. T., and Shortle W. C., (1996). *Tree Biology and Dendrochemistry. Tree Rings, Environment and Humanity*. pp 629-635.
- Sorrivas de Lozano V., Morales A., Yañez M. J., (2014), *Microscopios y Práctica de la Microscopía Electrónica, Manual*.
- Stokes, M.A. and T.L. Smiley. (1968). *An Introduction to Tree-Ring Dating*. University of Chicago Press, Chicago.

Villanueva D., J., Stahle D. W., Luckman B. H, Cerano P.J., Therrell, R M., y M. Cleaveland k. (2007). Potencial dendrocronológico de *Taxodium mucronatum* Ten. y acciones para su conservación en México.

Villanueva-Díaz, Vicenta C. G., Julián C. P., Aldo, M. S. (2014). La cuenca san Martín y situación del ahuehuete (*Taxodium mucronatum* ten.) En el río sabinas, Coahuila. Folleto Técnico. Centro Nacional de Investigación Disciplinaria Relación Agua-Suelo-Planta –Atmósfera., Gómez Palacio, Durango.