



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA**  
**CENTRO DE GEOCIENCIAS**

**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DENDROQUÍMICO DE LA ESPECIE  
*TAXODIUM MUCRONATUM* TEN. COMO REGISTRO DE CONTAMINACIÓN EN  
QUERÉTARO**

**TESIS**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRA EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

PRESENTA:

**ANA ARLETTE ALEJANDRA MICHEL HERRERA**

TUTOR:

**DR. GILLES PIERRE RENÉ LEVRESSE**

CENTRO DE GEOCIENCIAS

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTORIAL

DR. JOSÉ JAIME ALEJANDRO CARRILLO CHÁVEZ Centro de Geociencias, UNAM.	PRESIDENTE
DR. GILLES PIERRE RENÉ LEVRESSE Centro de Geociencias, UNAM	SECRETARIO
DRA. LAURA EUGENIA BERAMENDI OROSCO Instituto de Geología, UNAM	VOCAL
DRA MARICELA GONZÁLEZ LEAL Facultad de Química, UAQ	SUPLENTE
DR. JOSÉ VILLANUEVA DÍAZ Laboratorio de Dendroquímica, INIFAP-CENID-RASPA	SUPLENTE

QUERÉTARO, MÉXICO. JULIO 2016



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## Declaratoria ética

***"Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría. Todas las citas de, o referencias a, la obra de otros autores aparecen debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante los recursos editoriales convencionales."***

## **Dedicatorias**

**A mi hermano, Mario**

**A mi mamá**

**A mi mejor amigo, compañero y esposo**

**A los seres que amo**

## **Agradecimientos**

Al Centro de Geociencias y a la UNAM por haberme permitido ser parte de la institución y al CONACYT por el apoyo económico brindado durante este periodo.

Al Dr. Gilles Levresse, la Dra. Lucia Capra, la Dra. Teresa Orozco, el Dr. Mariano Cerca y Dr. Alejandro Carrillo por brindarme la oportunidad de ingresar en aquella primera entrevista. Y principalmente al Dr. Gilles por haberme aceptado como estudiante.

A los miembros de mi comité por todo su apoyo y tiempo para la revisión de la tesis, así como sus valiosas aportaciones, la Dra. Maricela González, Dr. José Villanueva, Dra. Laura Beramendi y nuevamente al Dr. Alejandro Carrillo y a mi tutor.

Al Dr. Mariano Cerca y a Marta Pereda por su gran apoyo para los trámites del posgrado. Así como al personal administrativo Ing. Emilio Nava, Ing. Juan Manuel López, Ing. Guadarrama, Asucena Ortega, Armando y Alejandro.

A la Dra. Marina Vega por su tiempo para revisión de muestras en SEM y su apoyo para la materia de Química de Superficies.

Al laboratorio de Geoquímica Ambiental del Centro de Geociencias, a la M. en C. Carolina Muñoz por sus enseñanzas y paciencia en el uso de equipos ICP-OES y HPLC así como a Fabían González por su disposición para el apoyo del proyecto.

A todos los doctores y maestros que tuvieron gran influencia en mi formación: Dra. Dora Celia Carreón, Dr. Adrián Ortega, Dr. Mario Villalobos, M. en C. Sara Solís, Dr. Juan Pablo Bernal, Dr. Luigi Solari, Dr. Harald Böhnell, Dra. Gerardo Carrasco, Dr. Marco Guzmán y aquellos mencionados anteriormente.

A los profesores de la Facultad de Química que siguieron influyendo en mí: Dra. Maricela González, Dr. Miguel Rea López y el M. en C. Gustavo Pedraza Aboytes.

A todo el apoyo laboratorio de dendrocronología del INIFAP-CENID-RASPA por su amabilidad, al Dr. José Villanueva por su gran apoyo disposición, a la M. en C.

Rosalinda Cervantes por sus enseñanzas en dendrocronología, el Dr. Julian Cerano por su apoyo y el Ing. Fernando Dorantes por su compañerismo.

A todos mis compañeros del centro de Geociencias: Adolfo Pacheco, Diego Gracia, Rosario Vazquez, Paulina Patiño, Vani Ferrer, Pilar Aliaga, Eric Medina, Francisco Ruíz, Rodrigo Martínez, Berlaine Ortega, Myrna Lorena, Violeta Nava, Antonio, Melisa Ramos, Paola Catalina, Gonzalo Villegas, Minerva González, Iisel Durán, Paola Botero, Isabel Sierra, Carolina Latorre, Enrique, Tatiana, Ivan Suñé, Nasser Ahmed, Gloria M. y a todos los demás.

A todos los amigos que conocí en esta etapa: Aurora Fabían, Cynthia Córdova, Erick Juárez, David Yáñez, Lorena de León, Jorge López, Ángeles Caballero, Gabriela Hernández, Eliseo Hernández y Daniela Martínez.

A mi familia por estar siempre ahí.

## Índice General

**Dedicatoria**

**Agradecimientos**

**Índice General** **i**

**Índice de Figuras** **iii**

**Índice de Tablas** **vii**

**Resumen** **viii**

**Abstract** **x**

Capítulo 1 ..... 1

INTRODUCCIÓN ..... 1

    Objetivos..... 5

    Justificación..... 6

CAPÍTULO 2..... 7

FUNDAMENTOS TEÓRICOS ..... 7

    2.1 Dendrología ..... 7

    2.2 Dendrocronología ..... 13

    2.3 Dendroclimatología ..... 15

    2.4 Dendroquímica ..... 19

Capítulo 3 ..... 27

DESCRIPCIÓN DEL MARCO GEOLÓGICO LOCAL ..... 27

Capítulo 4 ..... 32

METODOLOGÍA ..... 32

    4.1 Selección del sitio y especie de estudio ..... 32

    4.2 Muestreo..... 33

        4.2.1. Muestras de agua ..... 33

        4.2.2. Muestras de suelo ..... 38

        4.2.3. Muestras de series de anillos crecimiento de árboles ..... 40

    4.3 Análisis de muestras..... 43

4.3.1 Análisis de muestras de agua .....	43
4.3.2 Análisis de suelos .....	46
4.3.4 Análisis de anillos de crecimiento de árboles .....	49
Capítulo 5 .....	62
RESULTADOS.....	62
5.1 Caracterización físico-química de los suelos en Calesa y Barranca de Amealco.....	62
5.2 Caracterización físico-química del agua en Calesa y Barranca de Amealco .....	66
5.3. Dendrocronología de núcleos .....	73
5.4 Dendroquímica de núcleos .....	78
5.4.1 Dendroquímica de núcleos de <i>Taxodium mucronatum</i> Ten. de Barranca de Amealco .....	78
5.4.2 Dendroquímica de núcleos de <i>Taxodium mucronatum</i> Ten. de Calesa .....	86
5.4.3 Índices de acumulación suelo/árbol, y agua/árbol en Barranca de Amealco y Calesa.....	94
Capítulo 6 .....	97
DISCUSIÓN .....	97
6.1 Dendrocronología y climatología.....	97
6.2 Dendroquímica .....	104
Capítulo 7 .....	109
CONCLUSIONES .....	109
Bibliografía .....	112
ANEXOS.....	125

## Índice de Figuras

Figura 2.1 (a) Diagrama del cambium compuesto por el xilema y (b) el floema y corte transversal de un tronco de pino. (Ernst, s.f.) .....	8
Figura 2.2 Vista macroscópica de la sección transversal del tronco <i>Quercus alba</i> , la primera capa de afuera hacia dentro es la corteza externa (ob), posteriormente la corteza interna (ib), seguida por el cambium vascular (vc). El punto (p) es la médula, el cual es el centro del tronco (Wiedenhoft, 2010). .....	12
Figura 3.1 Características geológicas del Valle de Querétaro (Carreón-Freyre et al, 2016).....	28
Figura 3.2. Estratigrafía representativa del Valle de Querétaro (Carreón-Freyre et al, 2016).....	28
Figura 3.3 Climograma de estación de monitoreo de la CEA ubicada en Querétaro para el periodo de 1995 – 2013 (INEGI-CONAGUA, 2015).....	30
Figura 3.4 Climograma de estación de monitoreo de la CEA ubicada en San Juan del Río para el periodo de 1995 – 2013 (INEGI, 2015).....	30
Figura 4.1 Mapa del Estado de Querétaro de los puntos de muestreo. ....	34
Figura 4.2 Sitio de muestreo en la colonia Calesa .....	35
Figura 4.3 Sitio de muestreo en Barranca de Amealco. ....	36
Figura 4.4 Muestreo de agua y acidificación de muestras de cationes en Barranca de Amealco. ....	37
Figura 4.5 Muestras de suelo de los dos sitios. En a) suelo STAX1M1G, b) STAX2M1G y c) STAX3M1C. ....	40
Figura 4.6 TAX1MG: Árbol del que se tomaron los testigos del sitio 1, ubicado en Barranca de Amealco, San Juan del Río, Qro. ....	41
Figura 4.7 TAX3MC: Árbol del que se tomaron los testigos del sitio 2, ubicado en la colonia Calesa, Del. Cayetano Rubio, Qro. ....	42
Figura 4.8. Equipo ICP-OES Thermo Scientific iCap 6000 utilizado para el análisis de muestras de cationes de agua. ....	44
Figura 4.9. Cromatógrafo de Intercambio Iónico utilizado para el análisis de muestras de aniones de agua. ....	45
Figura 4.10 Adición de HNO <sub>3</sub> a las muestras de suelo para el método de digestión por el método EPA3651a .....	47
Figura 4.11 a) Microondas MarsXpress utilizado para la digestión de muestras, b) Carrusel y chaquetas para colocar las muestras. ....	49
Figura 4.12 a) Lijado de muestras semimanual, b) y c) Muestras lijadas del árbol del sitio uno y dos respectivamente. ....	50
Figura 4.13 Prefechado de muestra en microscopio y elaboración de un gráfico de esqueleto por cada muestra.....	51
Figura 4.14 a) Microscopio Olympus SZX12 utilizado para tomar fotografías de las series cuyos elementos se analizarían por ICP-OES, b) Serie de TAX1M2G, c) serie de TAX3M7C.....	52

Figura 4.15 Equipo Velmex utilizado para la medición de anillos totales de las seis muestras .....	53
Figura 4.16 Proceso de obtención de muestra antes de la digestión.....	55
Figura 4.17 a) Vasos de teflón con muestra ya digerida; b) Filtrado de muestra con embudos y filtros; c) Frascos previamente etiquetados y pesados con muestra. .	57
Figura 5.1 Concentración en mg/kg de los elementos analizados en los suelos de Barranca de Amealco y Calesa .....	65
Figura 5.2 Concentración en mg/kg de muestras de suelos de ambos sitios de estudio comparada con la Norma Oficial Mexicana (NOM-047). .....	65
Figura 5.3 Concentraciones en mg/L con eje vertical en escala logarítmica de elementos mayores y trazas obtenidas de las muestras de agua de los ríos de ambos sitios en temporada seca y de lluvias en ambos sitios de estudios.....	69
Figura 5.4. Concentraciones en mg/L con el eje vertical en escala logarítmica de aniones antes y durante la temporada de lluvias en ambos sitios. ....	71
Figura 5.5. Norma Oficial Mexicana y muestras de agua de ambos sitios de estudio, antes y después de la temporada de lluvias. ....	72
Figura 5.6. ÍAA para el sitio de Barranca de Amealco. Este índice corresponde a las muestras TAX1M1G, TAX1M3G, TAX1M4G analizadas. Spline de 10 años utilizado para resaltar eventos de baja frecuencia como periodos secos y húmedos así como para suavizar eventos de alta frecuencia. ....	74
Figura 5.7 Figura comparativa del IAA del sitio 1 y la cronología estándar de anillos de crecimiento de árboles del sitio de Barranca de Amealco de Stahle et al. (2011) .....	75
Figura 5.8. ÍAA para el sitio de Calesa, spline de 10 años. Esta cronología corresponde a las muestras TAX3M3C, TAX3M5C y TAX3M6C.....	76
Figura 5.9 Índice de ancho de anillo del sitio de Barranca de Amealco (Azul) y Calesa (Rojo). En A) se tiene la cronología de Barranca de Amealco completa, mientras que en B) se observa la cronología a partir de 1920.....	77
Figura 5.10. Concentraciones de los elementos en el núcleo tomado en Barranca de Amealco ordenado por media de concentración máxima. ....	79
Figura 5.11 Comparativo de las tendencias elementales de bario con el índice de ancho de anillo (IAA) en el sitio de Barranca de Amealco. ....	82
Figura 5.12 Comparativo de las tendencias elementales de cromo con el índice de ancho de anillo (IAA) en el sitio de Barranca de Amealco. ....	83
Figura 5.13 Comparativo de las tendencias elementales de hierro con el índice de ancho de anillo (IAA) en el sitio de Barranca de Amealco. ....	83
Figura 5.14 Comparativo de las tendencias elementales de boro con el índice de ancho de anillo (IAA) en el sitio de Barranca de Amealco. ....	84
Figura 5.15 Comparativo de las tendencias elementales de silicio con el índice de ancho de anillo (IAA) en el sitio de Barranca de Amealco. ....	85
Figura 5.16. Comparativo entre la variación de Ba, Ca, Mg, Na y V en Barranca de Amealco.....	85

Figura 5.17. Concentraciones de los elementos del núcleo tomado en Calesa ordenado por media de concentración máxima.....	87
Figura 5.18. Comparativo de las tendencias elementales de boro con el índice de ancho de anillo (IAA) en el sitio de Calesa. ....	89
Figura 5.19. Comparativo de las tendencias elementales de cromo con el índice de ancho de anillo (IAA) en el sitio de Calesa. ....	90
Figura 5.20. Comparativo de las tendencias elementales de magnesio con el índice de ancho de anillo (IAA) en el sitio de Calesa.....	91
Figura 5.21. Comparativo de las tendencias elementales de vanadio, con el índice de ancho de anillo (IAA) en el sitio de Calesa. ....	92
Figura 5.22. Comparativo entre la variación de Ba, Ca, Mg y V en Calesa. ....	93
Figura 6.1 Variación de IAA en función del tiempo (dendrocronología de Barranca de Amealco) correlacionada con los eventos a escala global como vulcanismo, erupciones solares y eventos climatológicos como El Niño y La Niña. En cuanto a volcanes, en 1815 se observa el de La Tambora en Indonesia (VEI: 7), en 1835 el de Cosiguina en Nicaragua (VEI:5), en 1883 Krakatoa en Indonesia (VEI:6), en 1886 Okataina en Nueva Zelanda (VEI:5), en 1902 Santa Maria en Guatemala (VEI:6), en 1912 Novarutka en Alaska, EUA (VEI:6), en 1963 Agung Bali en Indonesia (VEI:4), en 1980 Mount St. Helens en EUA (VEI:5), en 1982 El Chichón en Chiapas, México (VEI:5) y en 1991 Monte Pinatubo en Filipinas (VEI:6). En cuanto a fenómenos como el niño, se tienen eventos intensos en 1957, 1965, 1972, 1982 y 1997. La Niña tuvo eventos intensos en 1906, 1916, 1924, 1928, 1938, 1954, 1970, 1988, 1995. Los eventos de erupciones solares más importantes se tienen en 1859, 1872, 1941, 1972, 1989 y 2003 (Cliver y Svalgaard, 2004).....	99
Figura 6.2 Variación de IAA en función del tiempo (dendrocronología de Calesa) correlacionada con los eventos a escala global como vulcanismo, erupciones solares y eventos climatológicos como El Niño y La Niña. En cuanto a volcanes se tiene en 1963 el de Agung Bali en Indonesia (VEI 4), en 1980 Mount St. Helens en EUA (5), en 1982 El Chichón en Chiapas, México (5) y en 1991 Monte Pinatubo en Filipinas (6). En cuanto a fenómenos como el niño, se tienen eventos intensos en 1957, 1965, 1972, 1982 y 1997. La Niña tuvo eventos intensos en 1928, 1938, 1954, 1970, 1988, 1995. Los eventos de erupciones solares más importantes se tienen en 1941, 1972, 1989 y 2003 (Cliver y Svalgaard, 2004). ....	100
Figura 6.3 Crecimiento radial anual (grosor de anillo) para un núcleo de cada sitio (Tax1M4G para Barranca de Amealco y Tax3m6C para Calesa) en mm y la precipitación reportada a las estaciones de monitoreo correspondientes de cada sitio. ....	102
Figura 6.4 Crecimiento radial anual del núcleo de Barranca de Amealco y Calesa con las temperaturas máximas y mínimas de las estaciones de monitoreo cercanas de cada sitio. ....	103
Figura 6.5 Relación PDSI para junio (Stahle, 2011) y núcleo de Barranca de Amealco (Tax1m3g).....	104

Figura 6.6. Concentración de suelo, agua (temporada seca y de lluvia) y núcleos de ambos sitios. ....	107
Figura A.1. Comparativo de las tendencias elementales de Al, con el índice de ancho de anillo (IAA) en el sitio de Barranca de Amealco .....	126
Figura A.2. Comparativo de las tendencias elementales de Be, Cd, Mo con el índice de ancho de anillo (IAA) en el sitio de Barranca de Amealco.....	127
Figura A.3. Comparativo de las tendencias elementales de Mg, con el índice de ancho de anillo (IAA) en el sitio de Barranca de Amealco .....	127
Figura A.4. Comparativo de las tendencias elementales de Mn, con el índice de ancho de anillo (IAA) en el sitio de Barranca de Amealco .....	128
Figura A.5. Comparativo de las tendencias elementales de Ni, con el índice de ancho de anillo (IAA) en el sitio de Barranca de Amealco. ....	128
Figura A.6. Comparativo de las tendencias elementales de V, con el índice de ancho de anillo (IAA) en el sitio de Barranca de Amealco .....	129
Figura A.7. Comparativo de las tendencias elementales de Zn, con el índice de ancho de anillo (IAA) en el sitio de Barranca de Amealco .....	129
Figura A.8 Concentraciones elementales de Barranca de Amealco. A) Aluminio, B) Boro, C) Bario, D) Calcio, E) Cromo, F) Hierro, G) Magnesio, H) Manganeso, I) Sodio, J) Silicio, K) Vanadio y L) Zinc. ....	132
Figura A.9. Comparativo de las tendencias elementales de Al, con el índice de ancho de anillo (IAA) en el sitio de Calesa. ....	133
Figura A.10. Comparativo de las tendencias elementales de Be y Cd, con el índice de ancho de anillo (IAA) en el sitio de Calesa. ....	133
Figura A.11. Comparativo de las tendencias elementales de Ba, con el índice de ancho de anillo (IAA) en el sitio de Calesa. ....	134
Figura A.12. Comparativo de las tendencias elementales de Cu y Mo, con el índice de ancho de anillo (IAA) en el sitio de Calesa. ....	134
Figura A.13. Comparativo de las tendencias elementales de Fe, con el índice de ancho de anillo (IAA) en el sitio de Calesa. ....	135
Figura A.14. Comparativo de las tendencias elementales de Mn, con el índice de ancho de anillo (IAA) en el sitio de Calesa. ....	135
Figura A.15. Comparativo de las tendencias elementales de Si, con el índice de ancho de anillo (IAA) en el sitio de Calesa. ....	136
Figura A.16. Comparativo de las tendencias elementales de Zn, con el índice de ancho de anillo (IAA) en el sitio de Calesa. ....	136
Figura A.17 Concentraciones elementales de Calesa. A) Boro, B) Bario, C) Calcio, D) Cromo, E) Hierro, F) Magnesio, G) Manganeso, H) Sodio, I) Níquel, J) Silicio, K) Vanadio.....	138

## Índice de Tablas

Tabla 4.1 Muestras de agua recolectadas según tipo de muestra y coordenadas.	38
Tabla 4.2 Muestreo y descripción de las muestras de suelo.	39
Tabla 4.3 Tabla de número de malla a milímetro y pulgadas utilizadas para el tamizar las muestras de suelo.	46
Tabla 4.4 Porcentajes de recuperación de muestras de núcleos.	59
Tabla 4.5 Límites de detección y cuantificación del instrumento y del método para cada elemento.	61
Tabla 5.1 Porcentaje de humedad y clasificación de las muestras de suelo.	63
Tabla 5.2. Concentración en mg/kg de los elementos analizados en los suelos de Barranca de Amealco y Calesa por el equipo de ICP-OES con sus respectivos límites de detección, cuantificación y porcentajes de recuperación.	64
Tabla 5.3. Límites de detección y cuantificación del instrumento y del método para cada elemento.	67
Tabla 5.4. Concentración elemental del agua en temporada seca y de lluvia de Barranca de Amealco y Calesa	68
Tabla 5.5. Concentraciones en mg/L de aniones en temporada seca y de lluvias en ambos sitios.	70
Tabla 5.6. Edades obtenidas de las muestras de ambos sitios.	73
Tabla 5.7. Tabla de puntos utilizados para graficar las concentraciones elementales de las series de crecimiento de anillos de árboles.	81
Tabla 5.8. Tabla de puntos utilizados para graficar las concentraciones elementales de las series de crecimiento de anillos de árboles en Calesa.	88
Tabla 5.9 índices de acumulación relación árbol/agua y árbol/suelo.	96
Tabla A.1 Concentraciones del núcleo de Barranca de Amealco (Al – Cu).	140
Tabla A.2 Concentraciones del núcleo de Barranca de Amealco (Mg – Zn).	142
Tabla A.3 Concentraciones del núcleo de Calesa (Al – Fe).	144
Tabla A.4 Concentraciones del núcleo de Calesa (Mg – Zn).	146

## Resumen

En México, la especie vegetal riparia *Taxodium mucronatum* Ten. sobresale por su potencial dendrocronológico para formar anillos de crecimiento anuales en función de variaciones climáticas. El ahuehuete responde a fluctuaciones de precipitación debido a que un alto porcentaje de sus raíces se encuentran fuera del cauce principal, absorbiendo agua y nutrientes disponibles del agua pero también del suelo.

En el presente trabajo se cosecharon ocho series de crecimiento de dos árboles de *Taxodium mucronatum* Ten, las cuatro primeras series pertenecientes a la ciudad de Querétaro y las otras cuatro de la cañada de Barranca de Amealco (San Juan del Rio) con edades promedio de  $86\pm 2$  años y  $253\pm 15$  años respectivamente, con la finalidad de evaluar si la especie puede utilizarse como registro de contaminación a través de dendroquímica. Para complementar el estudio, se tomaron muestras del agua del río y suelo de los sitios donde están ubicados estos árboles. Mediante la técnica de ICP-OES se analizó la composición química de elementos mayores, menores y trazas del suelo, agua y anillos de crecimiento para evaluar las posibles relaciones entre los tres medios con las que se obtuvieron índices de acumulación.

Entre los resultados analíticos obtenidos, se encuentra que el agua del Río Querétaro en el sitio de Calesa presenta concentraciones más altas en la mayoría de los aniones y cationes que el agua de la corriente tributaria del sitio de Barranca de Amealco. En las tres matrices se pueden distinguir algunos elementos ambientalmente importantes como el B, Ba, Mn y, Ni y V de los cuales el B y el Mn son oligoelementos de las especies arbóreas, a su vez se encontró Cd, Cr y Pb en suelos y el As que sólo se encontró en el agua. Cabe mencionar que todos estos elementos están presentes en el árbol, sin embargo, el Mo sólo se encontró en los anillos de crecimiento.

Las tendencias similares en el Ba, Ca, Mg, Na y V de uno de los núcleos analizados mostró que es posible la especie *Taxodium mucronatum* Ten. pueda incorporar y mantener los elementos en los anillos de forma individual y por lo tanto podría ser utilizada para estudios dendroquímicos, aunque no se descarta la posibilidad de que

pueda existir una translocación radial con lo que se requerirían más estudios para su confirmación.

## Abstract

In México, the Riparian plant species *Taxodium mucronatum* Ten, has been used as an indicator of the presence of surface water and stands out for his dendrochronological potential to form annual growth rings depending on climatic variations. The Ahuehuete responds to fluctuations in rainfall because a high percentage of its roots are outside the mainstream, absorbing water and nutrients available in water, but also in soil.

In this paper, eight series of growth rings of two trees *Taxodium mucronatum* Ten. were dated. The first four series belonging to the city of Querétaro and other four to the Glen of Barranca de Amealco (San Juan del Rio) with a mean age of  $86\pm 2$  years and  $253\pm 15$  years respectively, in order to assess whether the species can be used as a record of contamination through dendrochemistry. To complement the study, samples of river water and soil were taken of the places where these trees are located. Chemical composition of major, minor and trace elements were analyzed by ICP-OES in soil, water, and growth rings samples to assess possible relationships between the three media that accumulation rates were obtained.

Among the analytical results obtained, it was found that the river water Queretaro on the site of Calesa presents higher concentrations in most of the anions and cations than the river in the site of Barranca de Amealco. In the three matrices can be distinguished some environmentally important elements such as B, Ba, Mn and Ni and V of which the B and Mn are the necessary elements for arboreal species, in turn Cd, Cr and Pb was found in soil and the As only found in the water. It is noteworthy that all these elements are present in the tree, however, only Mo was found in the growth rings.

Similar trends in Ba, Ca, Mg, Na and V in one of the analyzed tree series showed that is possible that the species *Taxodium mucronatum* Ten. can incorporate and maintain elements in the individually rings and therefore can be used in dendrochemical studies, although the possibility of radial translocation is not ruled out, further studies would be needed for confirmation.



## Capítulo 1

### INTRODUCCIÓN

La biodiversidad es uno de los constituyentes substanciales en la estabilidad de los sistemas naturales. Modificaciones tan severas como la extinción de una especie, puede traer consecuencias a todo el ecosistema provocando daños irreversibles. La fauna silvestre no puede sobrevivir en medios contaminados por lo que la preservación de un ambiente limpio supone protección a las especies vegetales y animales que lo habitan (Nebel y Wright, 1999).

El crecimiento de la población humana y el incremento de actividades industriales han traído consigo la liberación de contaminantes antropogénicos que son depositados a los ecosistemas acuáticos y terrestres. Estas emisiones pueden impactar negativamente a la biota, ya sea directamente por la deposición atmosférica o por procesos indirectos como cambios en la química del suelo (Prasad, 2001).

La contaminación de los ríos y cuerpos de aguas se define como la presencia o el aumento de un elemento o sustancia que es perjudicial y afecta a los seres vivos y al ecosistema, y puede ser natural o antropogénica. La contaminación de los cuerpos de agua genera la degradación y muerte de flora y fauna, entre otros. El origen de la contaminación puede tener diferentes fuentes, algunas de ellas son los desechos industriales y urbanos, drenados de la agricultura y minería, erosión, efluentes de plantas depuradoras, derrames de sustancias tóxicas, ruptura de drenajes, etc. Estos contaminantes pueden ser esparcidos y arrastrados fácilmente por las propiedades solventes del agua, modificando su ciclo. Estas fuentes de contaminación también pueden tener afectaciones al suelo, deteriorando el crecimiento vegetal y producción de alimento a diferente escala (Jiménez, 2010).

En el 2004, la CONAGUA menciona que los resultados de la evaluación de la calidad del agua en México muestran que las cuencas que tienen ríos con mayor

grado de contaminación son las de Lerma, Alto Balsas, Río Colorado y Alto Pánuco (CEMDA et al, 2006). En el país, se esboza que un 74% de los cuerpos de agua están contaminados en mayor o menor grado. Los principales contaminantes son materia orgánica, nutrientes como nitrógeno y fósforo, microorganismos (coliformes totales y fecales), metales y derivados de hidrocarburos.

El estado de Querétaro ocupa el tercer lugar a nivel nacional en crecimiento poblacional de la última década. Tan sólo en la Ciudad de Querétaro se tiene más del 40% de la población total del estado, representando el 1.63% del total del país (INEGI, 2010). Este incremento poblacional no fomenta únicamente el desarrollo, si no que trae consigo la concentración de industrias, transporte público y privado, consumo energético y actividades que generan contaminación tanto en emisiones, como de agua y residuos. El 75% de la contaminación atmosférica proviene de las emisiones vehiculares. En el estado se tuvo un aumento del 10.2% en la Tasa de crecimiento medio anual (TCMA), finalizando con 129,949 unidades de 1998 al 2003, llegando a 304, 062 unidades en el 2010. En el municipio de Querétaro se tuvo un incremento de más de 64,000 vehículos, representando una TCMA del 8% anual, que finalizó con 195, 515 unidades para el 2010 (INEGI 2003; INEGI, 2010). Además de la contaminación por fuentes móviles en el Estado, se tiene contaminación derivada de fuentes fijas. Esto se debe a la relevancia del sector industrial como primer generador de empleos, colocándolo como el segundo generador más importante de contaminantes atmosféricos con un 15% del total (Camacho, 2013). De acuerdo a la SEDESU (2004), la Ciudad de Querétaro cuenta con 8 parques industriales. En estos se tienen instaladas más de 4,000 empresas o industrias de distintos tamaños y giros.

Para determinar los procesos de contaminación, un número de metodologías de monitoreo ambiental han sido desarrolladas usando análisis químicos y organismos vivos (Hagemeyer, 2000).

El monitoreo de emisiones de contaminantes atmosféricos es relativamente reciente y se encuentra poca información disponible sobre la deposición de estos, siendo nula en zonas rurales o inaccesibles donde no se encuentran equipos de monitoreo.

Para compensar la falta de información histórica, se han hecho intentos para estimar la deposición histórica de metales traza basada en organismos como plantas superiores o árboles (Prasad, 2001)

Los árboles ayudan a mantener un delicado balance entre las concentraciones de CO<sub>2</sub> y oxígeno en la atmósfera, lo cual es indispensable para que exista la vida. Estos también se encargan de limpiar el dióxido de carbono extra que las actividades humanas emiten a la atmósfera lo cual incrementa de forma artificial la temperatura global y además pueden fungir como registros del ambiente en el que se desarrollaron.

La dendrocronología ha adquirido un papel relevante en las últimas décadas debido a su potencial para relacionar series de eventos tanto de contaminación como climáticos con los anillos de crecimiento de árboles de algunas especies en particular. En la actualidad esta disciplina tiene varias vertientes entre las que se encuentran la dendroclimatología que relaciona las condiciones climáticas del ambiente donde se desarrollaron los árboles. Otra es la dendroquímica, la cual se enfoca en estudiar la composición bioquímica de los anillos haciendo posible el estudio del ciclo hidrológico y de carbono, patrones de circulación atmosférica y contaminación por algunos elementos (Cerano et al, 2009).

En México existen especies que pueden ser utilizadas para estudios dendrocronológicos entre las que destacan la *Pseudotsuga menziesii* (Abeto de Douglas), *Pinus cembroides* Zucc. y *Taxodium mucronatum* Ten (o ahuehuete). Esta última especie sobresale por tener un alto potencial dendrocronológico (capacidad de formar anillos de crecimiento anuales) y sensibilidad en función al clima. Entre sus características está que la especie se distribuye casi por todo el país (con excepción de la península de Yucatán y Baja California), donde exista una fuente permanente o semipermanente de agua como a orillas de ríos, manantiales, canales y arroyos y oscilando a altitudes entre los 300 y 2,500 msnm (Martínez, 1963; Rzedowski, 1978; Carranza, 1992). Además son los árboles más longevos del país, encontrando especímenes de más de 1,500 años de edad en la región central y norte del territorio mexicano (Constante et al, 2010; Villanueva et al, 2007b)

La dendroquímica, como la interpretación del análisis elemental de anillos de árboles fechados, puede proveer un registro temporal de cambios ambientales, sin embargo, requiere un entendimiento de la biología del árbol (Smith y Shortle, 1996). Actualmente, la dendroquímica se utiliza para reconstruir el momento en el que ocurren los cambios en el ambiente químico externo del árbol, así como de descubrir marcadores temporales de los cambios ambientales o encontrar evidencia directa de fitotoxicidad (Smith y Shortle, 1996).

Desde 1960, varios investigadores como Sheppard y Funk (1975) Hagemeyer (1993) Fukuoka and Kishi (1995), Taniguchi et al, (1995), Watmough, (1999) y Punshon, (2003) han llevado a cabo estudios usando dendroquímica para analizar el contenido de metales pesados en anillos de crecimiento anuales, debido a la estabilidad en los núcleos de varias especies de árboles (Madeiros et al, 2008). Los anillos de crecimiento resultan muestras atractivas para muchos análisis, debido a que son no destructivas, son ambientalmente benignas y usualmente sencillas de obtener (Bondietti et al, 1990; Berish and Ragsdale, 1985).

Los anillos de crecimiento de árboles son una fuente de información hidrológica, ecológica y paleoclimática, entre otras, debido a que diversos factores bióticos y abióticos tienen una relación directa con su formación, ya sea durante el proceso de división celular o antes de la estación de crecimiento. Cuando se focaliza en cada uno de los factores de interés y se discrimina a los restantes, se constituye una base técnica para cuantificar por separado la influencia de cada uno de ellos (Cook, 1987; Delgado, 2000). Así, queda clara la relevancia de la información que se puede extraer cada anillo de crecimiento y la importancia de fecharlo exactamente al año de su formación y medir su grosor lo más preciso posible. Esto con la finalidad de poder comparar los crecimientos con cada una de las variables de interés involucradas y desarrollar reconstrucciones de variables hidrológicas, climáticas, ecológicas, etc., para su posterior interpretación y aplicación (Constante et al, 2009). Para algunas especies, un anillo de crecimiento constituye una fuente de información de las condiciones ambientales dominantes que imperaron durante su formación (Villanueva et al, 2010).

Se pretende llevar a cabo este estudio dendroquímico del ahuehuate (*Taxodium mucronatum* Ten.) para evaluar la correlación que existe entre la composición química de los anillos de crecimiento de este, el agua y suelo superficiales de un sitio rural (Barranca de Amealco) y de un sitio urbano (Calesa) para evaluar un posible impacto debido al crecimiento urbano.

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

- Evaluar el potencial dendroquímico de la especie *Taxodium mucronatum* Ten. para poder utilizarlo como registro de contaminación.

### **Objetivos particulares**

- Fechar núcleos de *Taxodium mucronatum* Ten. mediante la generación de series de crecimiento anuales.
- Determinar las concentraciones de elementos mayores y trazas en suelo y aguas superficiales en el entorno de los árboles analizados.
- Determinar las concentraciones de elementos mayores y trazas en anillos de crecimiento de árboles.
- Evaluación de la correlación entre las concentraciones de núcleos, suelo y agua de los sitios de estudio (Querétaro).

## Justificación

Los árboles son plantas superiores con gran distribución en el planeta, lo que permite valorar que se desarrollan bajo condiciones muy variadas y son sensibles a ciertos cambios en el ambiente. Esta sensibilidad reconoce el potencial de algunas especies para brindar información sobre el crecimiento del árbol, no sólo en cuestiones fisiológicas sino también de elementos químicos que fue asimilando, lo que podría permitir en el futuro el reconocimiento de las afectaciones reales que está generando la contaminación en el medio ambiente.

La población de ahuehuete ha sido afectada de manera muy importante por la modificación antrópica de su medio natural en particular por la canalización de ríos, desviación de cauces, azolvamiento y contaminación así como la sobre extracción de agua subterránea desde la década de los 70's, que ha inducido a la desaparición de numerosos cuerpos de agua por el abatimiento piezométrico (Martínez, 1999; Ceballos et al, 2009), por lo que se vuelve necesario conservar las que aún quedan para entender las afectaciones de las actividades antropogénicas en el medio.

Los objetivos se han fijado con la finalidad de evaluar si la especie puede utilizarse como registro de contaminación en la ciudad. Primeramente se requiere tener varias series de anillos de crecimiento de árboles de la ciudad para poder analizarlas y comparar sus concentraciones con las muestras del suelo y el agua del mismo sitio para posteriormente evaluar si existe alguna correlación entre el árbol y el medio en que crecieron.

Finalmente, la especie de *Taxodium mucronatum* Ten. sobresale por su potencial dendrocronológico y dendroclimático, por lo que resulta relevante analizar su potencial dendroquímico para un mayor entendimiento y cuidado de la especie.

## CAPÍTULO 2

### FUNDAMENTOS TEÓRICOS

#### 2.1 Dendrología

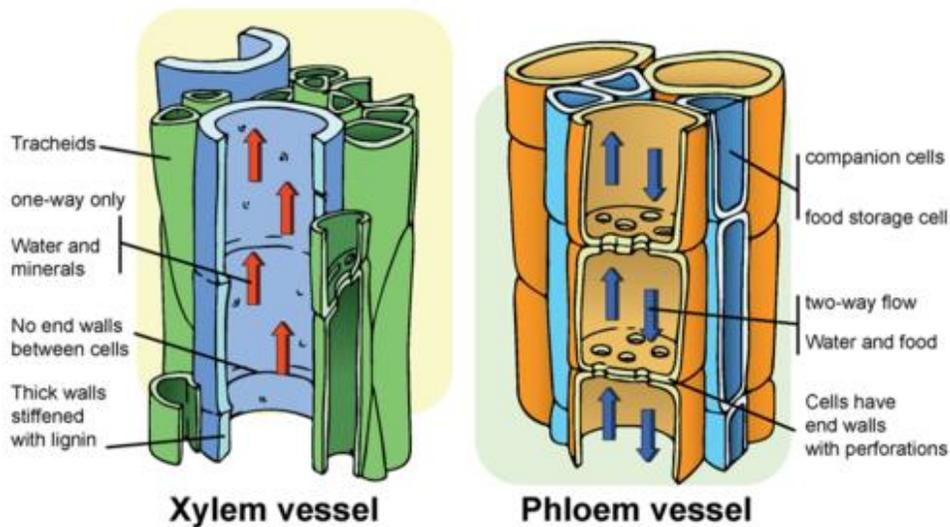
La dendrología se define como una división de la silvicultura o la botánica que estudia la taxonomía, nomenclatura, clasificación, identificación y distribución de los árboles y otras plantas leñosas. De acuerdo con la Forest Terminology (1944), un árbol se define como planta leñosa que tiene un tronco bien definido, erecto, perenne y una copa más o menos formada, que puede alcanzar una altura superior a los cinco metros y un diámetro normalmente mayor a 10cm.

Entre las funciones de los árboles se encuentra reducir la erosión del suelo, producir oxígeno y reducir el dióxido de carbono a través de la fotosíntesis. El proceso de fotosíntesis realiza la conversión de materia inorgánica a materia orgánica a través de la energía que aporta la radiación solar, así la energía lumínica se transforma en energía química estable que aprovecha el árbol como materia prima para crecer o llevar a cabo otras funciones. Una de las estructuras fundamentales que participan en este proceso se denominan estomas, estos son pequeños orificios o poros que atraviesan la epidermis de las plantas de forma que puedan comunicar el ambiente gaseoso del interior de la planta con el del exterior, esto es porque poseen una morfología particular que les permite abrirse o cerrarse según las condiciones del ambiente. Los estomas a través del proceso de transpiración vegetal, son la vía principal por la que la planta pierde el agua absorbida por las raíces.

En cuanto a la anatomía general se tiene que un árbol está constituido de tres partes principalmente, la raíz, el tronco y la copa. Dependiendo del árbol, se puede tener una raíz principal o una raíz ramificada fasciculada. El tronco en su parte exterior se llama corteza y protege la savia, en la parte interior se encuentran los anillos, que en algunas especies crecen anualmente y pueden representar periodos de sequía o abundancia. En el centro se encuentra el duramen, que está compuesto de células

leñosas muertas y es de color más oscuro, y en la parte más externa la albura, representada por anillos más claros y recientes. La albura y el duramen se encuentran divididos por el cambium (tejido vegetal compuesto por una capa de células que indican que el tronco está creciendo). Este cambium está compuesto por el xilema (tejido vegetal lignificado que transporta líquidos de la raíz a las hojas) que abarca la albura y el duramen; y el floema (tejido conductor que transporta nutrientes de la parte aérea a la basal) y abarca la corteza interna, en la Figura 2.1 se pueden observar el xilema y el floema, así como el corte transversal del pino.

a)



b)

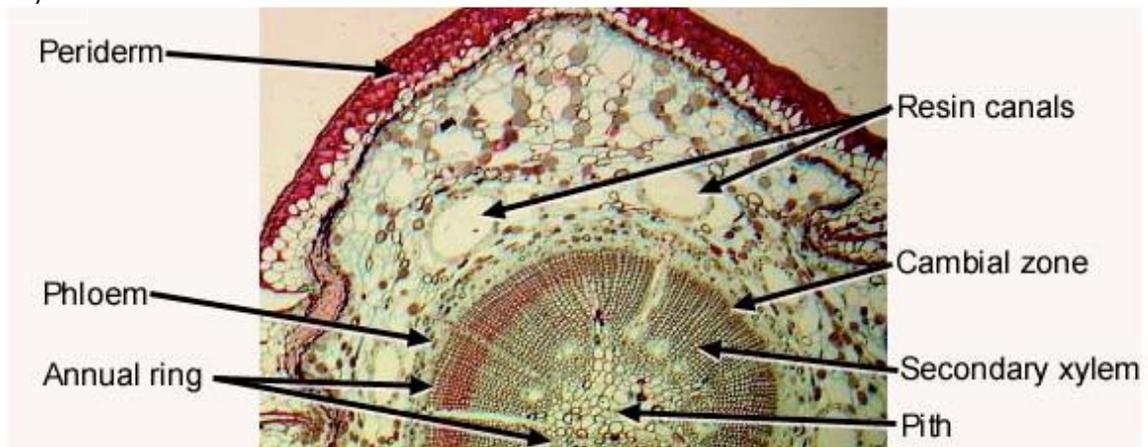


Figura 2.1 (a) Diagrama del cambium compuesto por el xilema y (b) el floema y corte transversal de un tronco de pino. (Ernst, 1953)

Los árboles crecen de dos formas, ya sea por el incremento en altura a lo que se llama crecimiento apical y por el incremento en amplitud, conocido como crecimiento radial. Este crecimiento resulta por la actividad celular en el tejido meristemo (células de forma poliédrica de paredes finas y vacuolas pequeñas y abundantes, responsables del crecimiento vegetal) en dos regiones de la planta. El meristemo apical forma el tejido primario que causa que el árbol se extienda en longitud del tallo y ramas. El cambium vascular, derivado de los meristemos laterales, forma el tejido secundario que resulta en un incremento en el diámetro. El cambium vascular se divide a manera que las células formadas en el interior del cambium se diferencian dentro del xilema, conformando la parte de madera del árbol y aquello formado por la parte externa del cambium dentro del floema.

El floema es esencial para el árbol debido a que los nutrientes se mueven entre sus células. No se utiliza directamente para la datación dendrocronológica, sin embargo no se descarta debido a que su presencia en una muestra asegura que no hay pérdida de xilema y por lo tanto anillos perdidos. La corteza es una porción que va mudando continuamente por lo que no tiene una estructura de anillos útil para la datación.

Después de que el tejido primario ha sido formado, el crecimiento del xilema se establece cada año de forma externa a los años anteriores y aparece un anillo en la sección transversal. De esta forma los estratos de crecimiento anual se describen como una serie de conos progresivamente apilados uno encima del otro.

La xilogenesis o formación de madera, empieza con la división periclinal de las células del cambium vascular, seguido por la expansión celular, el engrosamiento de las paredes celulares y lignificación, y termina con la autólisis del contenido de la célula (Larson, 1994). A inicios de la temporada de crecimiento, cuando el agua y las reservas de nutrientes son abundantes, la división de células activas en el cambium forma las traqueidas de madera temprana. Cuando la estación va progresando y el agua se vuelve menos abundante, la actividad cambial se ralentiza (Uggla et al, 2001). El porcentaje de madera temprana y tardía dentro de un sólo

anillo tiene un gran peso en el proceso de transporte de agua, almacenamiento y vulnerabilidad a la embolia (Domec y Gartner, 2002).

De esta forma los anillos de crecimiento son resultado de una actividad rítmica del cambium (Prasad, 2001). Cada anillo es el resultado de un crecimiento anual que inicia su desarrollo al principio de la estación de crecimiento, que generalmente es en primavera y culmina en las estaciones de verano o principios de otoño (Villanueva et al, 2010).

En las gimnospermas, caso concreto las coníferas, cada anillo anual está formado por células denominadas traqueidas que inician su formación durante la estación de crecimiento, periodo que se caracteriza por un rápido incremento radial (madera temprana); pero con el tiempo la actividad del cambium decrece y las traqueidas desarrollan paredes celulares más gruesas con cavidades progresivamente más pequeñas (madera tardía). La diferencia en coloración y densidad de la pared celular de las últimas células, en relación con las primeras del año siguiente, es lo que delimita a un anillo de crecimiento anual (Fritts, 1976; Bernal y Terrazas, 2000).

Un anillo de crecimiento se integra de dos bandas o franjas, con características morfológicas y estructurales definidas que son madera temprana o de primavera y madera tardía o de verano. La madera temprana está caracterizada por tener menor densidad en comparación con la madera tardía, el cual se forma durante la fase terminal del crecimiento. Las traqueidas presentes en la madera temprana tienen mayor diámetro como respuesta fisiológica del árbol para favorecer el transporte de agua, nutrientes y hormonas en su etapa de mayor crecimiento. Por su parte, la madera tardía, cumple las funciones de transporte y resistencia mecánica. Tiene un diámetro reducido y la pared celular gruesa (Bernal y Terrazas, 2000).

El número de traqueidas producidas por el cambium, el área de lumen y el espesor de las paredes celulares es controlado por procesos tanto fisiológicos como condiciones ambientales (De Micco et al, 2007). Temperaturas altas en primavera promueven la síntesis de los componentes de la pared celular, pero reducen el tiempo del desarrollo de la traqueida en la zona de engrosamiento de la pared

secundaria y como resultado, las primeras traqueidas tienen paredes celulares delgadas (Nicault et al 2001). La formación de la madera tardía está influenciado por el estrés de agua (Vaganov et al, 2006). El incremento de la longitud del tiempo de la deposición del material de la pared celular resulta en la formación de traqueidas con paredes gruesas (De Micco et al, 2007; Viera et al, 2009).

Cabe mencionar que la diferencia estructural entre la madera tardía de una estación y la madera temprana del siguiente año, una vez realizado el cosechado y su correlación con el clima, constituye la base técnica para la afirmación de la naturaleza periódica de producción de madera o anillos de crecimiento anuales (Stokes y Smiley, 1968; Fritts, 1976; Stahle, 1999).

Algunos factores ambientales así como la edad del organismo afectan el crecimiento de los anillos anuales, esto se debe a que a medida que crece el área del fuste o tronco principal es cada vez mayor. Se tiene que cuando un árbol es joven, los primeros anillos de crecimiento son grandes, porque la superficie en que el árbol distribuye el crecimiento también es pequeña, pero a medida que el árbol crece en grosor, los anillos reducen su tamaño debido a que, independientemente de la calidad del sitio que predispone un crecimiento similar año con año, al paso del tiempo, el árbol incrementa el diámetro del fuste y por ende su área basal, lo que conlleva a la formación de anillos más angostos (Villanueva et al, 2010).

El crecimiento arbóreo está en función del clima, edad, características fenotípicas y de forma particular influenciado por disturbios de agentes bióticos y abióticos, los cuales se reflejan en la variación de los anillos de crecimiento (Speer, 2010).

En la figura 2.2 Se observan anillos de crecimiento de un corte transversal del tronco de la especie *Quercus alba* (Wiedenhoeft, 2010).

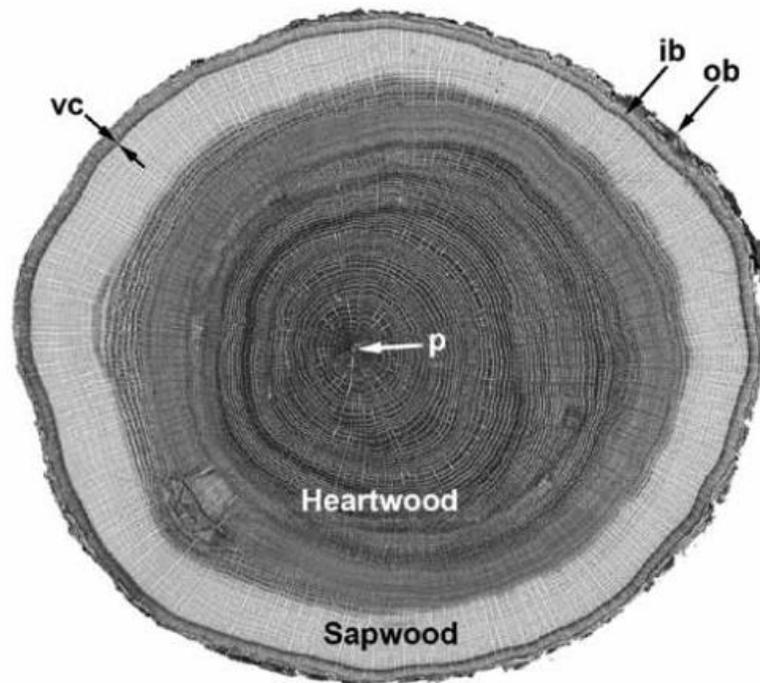


Figura 2.2 Vista macroscópica de la sección transversal del tronco *Quercus alba*, la primera capa de afuera hacia dentro es la corteza externa (ob), posteriormente la corteza interna (ib), seguida por el cambium vascular (vc). El punto (p) es la médula, el cual es el centro del tronco (Wiedenhoeft, 2010).

La formación de madera temprana del *Taxodium mucronatum* Ten o Ahuehuete ocurre durante los meses de abril, mayo y junio, por lo cual existe una relación entre las fases fenológicas del ahuehuete y la precipitación, debido a que justo en ese periodo la lluvia y la temperatura aumentan. Se considera también que la formación de la madera tardía se presenta generalmente entre julio y agosto, que es cuando concluye el crecimiento radial (Correa, 2014). La mayor correlación obtenida con mediciones del año actual indica que años previos tienen poca influencia en el crecimiento y los meses con mayor relación en cuanto al crecimiento son enero y febrero. Los árboles de esta especie registran con menor veracidad los eventos húmedos, debido a que una vez que el suelo está saturado, el agua escurre sin que pueda ser aprovechada por el árbol, presentándose principalmente en verano, cuando está en proceso de formación de madera tardía.

Algunos factores que influyen en el crecimiento de los árboles son el incremento de temperatura, los cambios hidrológicos asociados a la morfología, y el incremento del CO<sub>2</sub>, además de las emisiones antropogénicas (puntuales o difusas). Suzan-Azpiri y Enriquez-Peña (2008) menciona que además de los factores anteriormente citados, la humedad disponible, la materia orgánica depositada en los sustratos, inundaciones y perturbaciones causadas por el hombre, afectan el crecimiento vegetativo y el desempeño reproductivo de la especie *Taxodium mucronatum* Ten.

Correa et al. (2014) menciona que es importante evaluar el desempeño fisiológico de especies forestales como el Ahuehuate para conocer el comportamiento de la vegetación en condiciones atmosféricas cambiantes, como el incremento en la concentración de CO<sub>2</sub> del último siglo y sus afectaciones.

## 2.2 Dendrocronología

La dendrocronología es la ciencia que se encarga de analizar y fechar los anillos de árboles. El cofechado es el principio fundamental sobre el cual la dendrocronología está basada y por lo tanto merece una explicación más profunda. Primero debe asegurarse de que los anillos de dos o más especímenes fueron formados en el mismo año y para ello el conteo simple de anillos no es suficiente. Tampoco se tiene un patrón único de covarianza en el ancho de anillo (una firma estrictamente individual), por lo que se intenta evitar un cofechado falso- al comparar muestras que tienen al menos 100 años. Estos patrones de anillos pueden ser generados por una variedad de causas naturales. Fritts (1976) en una sola gráfica enlista 18 posibles causas por la que ocurren anillos angostos. Los patrones de anillos que son más fechables usualmente provienen de los árboles que tienen respuesta mutua a ciertos estímulos climáticos. En algunas regiones, principalmente en las lluviosas, se pueden generar patrones que no se ajustan proporcionalmente al ambiente (sensibilidad), lo que puede deberse a la predominancia de un clima en ciertas zonas (Kuniholm, 2001).

La dendrocronología se define como el estudio de la secuencia cronológica de los anillos de crecimiento anuales en árboles. Se requieren tres condiciones para que estos patrones puedan ser utilizados para fechar un espécimen.

- La primera es que los árboles deben adicionar sólo un anillo por cada temporada de crecimiento (año).
- La segunda condición es que aunque el crecimiento temporal total sea el resultado de muchos factores interactivos como la genética y el ambiente, sólo un factor ambiental (precipitación y/o temperatura) debe dominar en la limitación del crecimiento.
- La tercera condición es que el factor climático que limita el crecimiento debe variar de intensidad año con año y que los anillos anuales resultantes reflejen fielmente dicha variación en el espesor. Es la secuencia reconocible entre anillos angostos y anchos lo que hace posible el cotejado o el cotejo de patrones de anillos entre un espécimen y otro.

El objetivo de los estudios dendrocronológicos es reconstruir la variabilidad ambiental con base en el crecimiento anual de los anillos, para ello se contemplan dos etapas básicas: la primera es eliminar el ruido por factores biológicos como la edad y otros factores no ambientales que han influido en el crecimiento en algún periodo, y la segunda es maximizar la señal climática, mediante el proceso de estandarización de cada una de las muestras analizadas. Esta metodología permite generar índices de anillos y comprar series de diferentes edades (Villanueva et al, 2010).

Esta estandarización nos permite obtener el Índice de Ancho de Anillo (IAA) que son valores de crecimiento comparable entre los núcleos de un mismo árbol o entre diferente árboles. Esta estandarización consiste en insertar los valores de medición de ancho de anillo a una curva exponencial negativa o línea recta y después dividir cada valor anual de medición entre el valor esperado o estimado de la curva. Esto permite generar una serie de índices normalizados con media 1.0 y eliminar las tendencias de crecimiento y variables que no estén relacionadas con el clima o la edad de crecimiento (Cerano et al, 2009; Correa, 2014).

Cabe mencionar que el crecimiento anual del árbol está influenciado por una serie de factores endógenos (competencia o supresión) y exógenos (incendios, vientos, plagas, agricultura y contaminación) que definen el grosor de los anillos para un año específico. Esta variación en el grosor de los anillos puede ser representado como un modelo lineal (Cook, 1987; Villanueva et al, 2004). También existen otras variables exógenas que influyen en el grosor de los anillos que involucran perturbaciones como terremotos, deposición de contaminantes, fluctuaciones hidrológicas y la historia misma de la evolución del sitio (Kitzberger et al., 1995; Meya et al., 2001; Bernal, 2004; Villanueva et al, 2005). A una determinada secuencia de anillos extraída del fuste principal del árbol con un taladro de Pressler, se le denomina serie de crecimiento, incremento radial o testigo.

El Ahuehuete es quizá la especie más longeva en México, que llega con frecuencia a superar los 1000 años de edad (Villanueva et al, 2006; 2010; Stahle, 2011) semi – caducifolia o caducifolia que se distribuye desde el sureste de los Estados Unidos de América, gran parte de la República Mexicana y región occidental de Guatemala (Villanueva et al, 2011).

### 2.3 Dendroclimatología

La dendroclimatología es una subdisciplina de la dendrología que busca relacionar las condiciones climáticas en las que se desarrollaron los árboles con las características de sus anillos (utilizados como registros o fuentes indirectas). La especie *Taxodium mucronatum* Ten. puede ser considerada una especie de lento crecimiento, la cual tiene gran potencial para detectar periodos de sequías (Suzán-Azpiri et al, 2007). Se requieren de mínimo tres núcleos por árbol para que se pueda proporcionar una cronología confiable, pero de un extenso número de árboles para que el estudio pueda ser representativo (Correa, 2014).

De esta manera, un análisis de una secuencia de crecimientos, permite generar series de tiempo de alta resolución, al fecharse cada banda de crecimiento al año exacto de su formación y de esta manera, determinar los factores climáticos que

tuvieron una mayor influencia previo o durante su formación. La relación entre el clima y el ancho de anillo, ocurre debido a que el crecimiento de la planta está influenciado por diversos factores ecológicos, los cuales varían a través del ciclo de vida de la planta y en ciertos periodos pueden afectar el crecimiento y la forma de muchas estructuras que lo constituyen (Fritts, 1976).

En lugares donde las estaciones del año son muy marcadas, particularmente en regiones templadas y frías, los árboles producen un anillo de crecimiento por año, en el cual se registran las condiciones climáticas que se presentaron antes o durante la estación de crecimiento. De acuerdo a lo anterior, se pueden diferenciar patrones en el ancho, densidad y composición isotópica de los anillos, que reflejan las fluctuaciones climáticas durante su formación (Fritts, 1976; Villanueva et al, 2008).

El uso de árboles con diferentes edades para crear cronologías de anillos de crecimiento para estudios climatológicos puede incrementar la resolución de las señales climáticas. Las respuestas dependientes de la edad al clima pueden dar pistas importantes para predecir como los árboles jóvenes y longevos pueden reaccionar al cambio climático u otros eventos (Viera et al, 2009). Se utiliza el IADF (Intra-annual density fluctuations) para evaluar las fluctuaciones que ocurren entre el patrón de crecimiento típico de madera temprana- tardía en las coníferas, es decir, si existe alguna desviación en el crecimiento y si hay formación de madera temprana dentro de las células de madera tardía y viceversa. En otras palabras, además de la transición normal entre la madera temprana y la madera tardía en los anillos de crecimiento, las IADF pueden ocurrir (Fritts, 2001). Estas estructuras están formadas en respuesta de los cambios en las condiciones climáticas durante la estación de crecimiento (Masiokas and Villalba, 2004) y su posición radial dentro de los anillos está determinada en el momento en el que ocurrió el factor desencadenante (Campelo et al, 2007).

La inclusión de IADF en los estudios dendrocronológicos permite un análisis más detallado de los eventos climáticos en la estación de crecimiento (Wimmer et al, 2000). Además, se considera que los árboles jóvenes tienen una frecuencia más alta de IADF que los viejos, debido a que tienen una estación de crecimiento mucho

más larga y responden más rápidamente a los cambios en las condiciones ambientales (Villalba y Veblen, 1994), aunque existen estudios que muestran que la señal climática fue maximizada en arboles más viejos (Carrer and Urbinati, 2004).

La acumulación de sustancias en las paredes celulares cercanas al final de la estación de crecimiento, cuando las condiciones de crecimiento son menos favorables, pueden generar afectaciones y hacer que las traqueidas no alcancen la madurez completa, viéndose como células de madera temprana (Viera et al, 2009).

Martinez-Meier et al (2008) señaló que la variación en las características de la madera tardía (densidad y grosor) del Douglas-fir, mayormente en los anillos externos, debe estar relacionada con la resistencia a la sequía, ayudando a los arboles a mantener la integridad de sus sistemas hidráulicos. Campelo et al (2013) sugiere que el IADF puede ser un mecanismo usado a nivel individual por el árbol para adaptarse a la sequía, al menos en la especie de *Pinus pinaster*.

Los anillos más anchos pueden ser formados debidos a una alta tasa de producción de células en el cambium (Rathgeber et al 2011) y/o una estación de crecimiento más larga (Rossi et al, 2008; Linares et al, 2009; Lupi et al, 2010). De acuerdo a Rathgeber et al (2011) y Linares et al (2009), la actividad cambial de árboles pequeños comienza después y termina antes, y tiene menores tasas de producción celular. Así, el intervalo de tiempo para registrar la variabilidad climática es menor y una menor respuesta de árboles pequeños al clima debe esperarse y consecuentemente, una ocurrencia más baja de IADF (Campelo et al, 2013).

Stahle et al (2011) llevo a cabo una nueva reconstrucción para el PDSI (Palmer Drought Severity Index) con anillos de crecimiento de árboles para Mesoamérica desde el año 771 al 2008, identificando las sequias más severas del siglo XX.

Los árboles de la especie *Taxodium mucronatum* Ten encontrados en Barranca de Amealco, Querétaro han sido utilizados para desarrollar una cronología de 1238 años que está correlacionada con precipitación, temperatura, índices de sequía y campos de cultivo en la parte central del país. Esta cronología ha sido utilizada para reconstruir los balances de la humedad del suelo de la primavera y principios del

verano sobre la provincia cultural de Mesoamérica, siendo el primer registro exacto y anual paleoclimático para Mesoamérica de Clásico tardío, Post Clásico, Colonial y la era moderna (Stahle et al, 2011).

Paradójicamente, las cronologías de anillos de ahuehuetes de EUA y México están en todos los casos directamente correlacionados con la precipitación e inversamente correlacionados con la temperatura durante la estación de crecimiento, a pesar de las condiciones de inundaciones frecuentes del sitio (Stahle et al, 2011).

La respuesta positiva del ahuehuate a la disponibilidad de humedad parece reflejar una limitante de crecimiento durante el nivel bajo de agua cuando las raíces pueden estar expuestas al aire seco, y mejora de crecimiento durante aguas altas cuando las raíces son suministradas con un flujo de agua incrementado y mejorado con nutrientes y altos niveles de oxígeno disuelto (Stahle y Cleveland, 1992; Davidson et al, 2006).

La integración de la precipitación y temperatura en el modelo de Palmer de la humedad del suelo provee una aproximación razonable para el entendimiento del clima del crecimiento del árbol y ha sido usado exitosamente para las reconstrucciones de anillos de crecimiento de paleoclimas en Norteamérica y Asia (Cook et al, 2007, 2010)

La reconstrucción del PDSI provee información valiosa de las condiciones climáticas de la estación de crecimiento temprano durante el surgimiento y la caída de la civilización prehispánica en Mesoamérica (Stahle, 2011).

De igual forma, Correa (2014) indica que en el área de San Miguel – Querétaro se encontró una relación entre la precipitación y el incremento del área basal de la especie *Taxodium mucronatum* Ten., siendo la precipitación de enero - febrero determinante para el crecimiento. En otros sitios como San Felipe – Estado de México se determinó que el abatimiento de mantos freáticos ocasionó una reducción del 85% en el incremento del área basal después de 1970. Se identifica la existencia de una correlación directa entre el Índice de Ancho de Anillo (o IAA) y los episodios

climáticos extremos como las sequías de la década de 1950, 1994 y 2005 que afectaron el norte y centro de México (Correa, 2014; Cerano *et al*, 2009).

Los anillos de *Taxodium mucronatum* Ten. muestran gran variación en su crecimiento como resultado de la influencia de la variedad climática, por lo que representa la especie ideal, acorde a su sensibilidad, para estudiar los cambios de crecimiento arbóreo en función del clima. La importancia de esta técnica ha sido cada vez mayor debido a su potencial para estudiar los cambios climáticos globales, asociar patrones de circulación atmosférica con los ciclos hidrológicos y de carbono (Correa, 2014).

## 2.4 Dendroquímica

Actualmente se utilizan varias técnicas para evaluar históricamente la contaminación de algunos elementos. Entre ellas se encuentran núcleos de hielo, núcleos de turba y perfiles verticales de lagos sedimentarios, los cuales han sido usados exitosamente (Farmer *et al*, 1996). Sin embargo, la desventaja más grande que tienen estas técnicas es que su distribución geográfica es desigual, por lo que los árboles de maderas duras (caducifolias) pueden representar una alternativa muy útil al estar mucho más esparcidos en ambientes terrestres (Novak *et al*, 2010). Además se estima que la recolección de muestras de anillos de crecimiento es logísticamente más simple y menos costosa que en el caso de otras técnicas como sedimentos, turba o hielo (Blinder *et al*, 2003).

Se podría considerar a la especie *Taxodium mucronatum* Ten. como un bioindicador debido a que puede proporcionar respuestas biológicas observables ante una perturbación ecológica, permitiendo evaluar variaciones en la calidad ambiental. Esto acorde a la definición de bioindicador dada como: especie o conjunto de especies que poseen requerimientos particulares con relación a un conjunto de variables físicas o químicas, tal que los cambios de la presencia o ausencia del número, morfología o conducta de esa especie en particular, indique que las

variables consideradas se encuentren cerca de sus límites de tolerancia (Rosenberg y Resh, 1993; Gamboa et al, 2008).

El monitoreo biológico de contaminación (uso de biomonitores) se define como la medición de la respuesta en organismos vivos a los cambios en el medio ambiente. Esta respuesta puede referirse a los cambios en la biota y/o acumulación de contaminantes lo cual depende de la especie y su sensibilidad. Se han utilizado musgos, líquenes, árboles, agujas de pino, entre otras como biomonitores de algunos compuestos orgánicos y metales (Lepp, 1975; Alonso et al, s.f.). La medición de estos, permite obtener información sobre el medio donde se desarrollaron las especies, ya sea la deposición de algunos elementos, su absorción o incluso remediar contaminación mediante plantas hiperacumuladoras (Alonso et al, s.f.). Los anillos de crecimiento de los árboles pueden registrar las condiciones ambientales del pasado en el que se desarrollaron permitiendo una resolución temporal, y a su vez pueden preservar la señal de entrada de metales como Pb en el año de su formación (Amato, 1988).

La composición mineral de los anillos de madera depende parcialmente de la absorción de minerales del árbol. El grado de absorción de minerales puede reflejar la disponibilidad de los elementos en el ambiente alrededor del árbol. Esto ha llevado a la idea de usar los anillos de crecimiento como biomonitores de contaminación de metales traza, este método es conocido como dendroanálisis o dendroquímica (Prasad, 2001).

El uso de dendroanálisis como herramienta de contaminación ambiental debe cumplir con algunas condiciones:

- a) Debe existir una relación constante entre la concentración de elementos en el ambiente y la cantidad de elementos presentes en el tejido de madera.
- b) La incorporación del elemento a cierto anillo anual debe ocurrir dentro de un periodo de tiempo limitado.
- c) Debe ser conocido a cuál de los anillos es transportado el elemento (al externo o al más joven) o a un número de anillos más viejos.

d) Posterior a la incorporación del anillo anual no sucede una removilización subsecuente o no es probable que pueda ocurrir un transporte radial.

e) El patrón de distribución radial de cierto elemento debería ser similar en diferentes partes del mismo árbol y en diferentes arboles creciendo en la misma área (Prasad, 2001).

Dependiendo de la forma en la que estén presentes algunos elementos metálicos, se tendrá mayor o menor disponibilidad relativa para las especies vegetales (Galán y Romero, 2008). Algunos elementos químicos son nutrientes imprescindibles para el crecimiento de los árboles.

Guimaraes (1982) menciona que dentro del grupo de oligoelementos se tiene al Mn, que es un activador enzimático que participa en el transporte de electrones en la fotosíntesis. El B tiene gran influencia en la formación de paredes celulares, transporte de carbohidratos y crecimiento celular. El Cu es un activador de enzimas oxidantes de fenoles que también participan en el transporte de electrones durante la respiración y fotosíntesis. El Fe es un componente estructural de los citocromos (proteínas que transportan energía química a todas las células), activador de enzimas y forma parte de coenzimas que desempeñan papeles fundamentales en procesos como formación de clorofila, síntesis de proteínas y transporte de electrones durante la fotosíntesis. Finalmente el Zn es un activador enzimático para la síntesis del aminoácido triptófano, precursor del ácido indol acético que se encarga de regular el crecimiento celular (Ponchner et al, 1993). Se considera que la inserción de algunos metales en especies arbóreas ocurre como impurezas y se encuentra a niveles de trazas (en rangos de ppm a ppb). La captación de metales pesados en plantas puede ocurrir vía foliar, cortical o por el aparato radical (Tommasini et al, 1999).

Debido a que el árbol guarda el registro del ambiente en el que se encuentra, es importante considerar el agua y el suelo en el que se desarrolla. Se tiene que los elementos traza más abundantes en los suelos pueden clasificarse en cinco categorías de acuerdo a la forma química en la que se encuentren. Entre estas categorías se encuentra la de cationes:  $\text{Ag}^+$ ,  $\text{Cd}^{+2}$ ,  $\text{Co}^{+2}$ ,  $\text{Cr}^{+3}$ ,  $\text{Cu}^{+2}$ ,  $\text{Hg}^{+2}$ ,  $\text{Ni}^{+2}$ ,  $\text{Pb}^{+2}$

y  $Zn^{+2}$ . Metales nativos como el Hg y V. Oxianiones:  $ASO_4^{-3}$ ,  $CrO_4^{-2}$ ,  $MnO_4^{-2}$ ,  $HSeO_3$ ,  $SeO_4^{-2}$ . Halogenuros:  $F^-$ ,  $Cl^-$ ,  $Br^-$  e  $I^-$  y organocomplejos como Ag, As, Hg, Se, Te, Tl (Galán y Romero, 2008). Estos elementos pueden presentarse en más de una forma y por lo tanto su disponibilidad para ser absorbido puede aumentar o reducirse.

A su vez Galán y Romero (2008) consideran 17 elementos como muy tóxicos y fácilmente disponibles y asimilables para la cadena trófica: Ag, As, Bi, Cd, Co, Cu, Hg, Ni, Pb, Pd, Pt, Sb, Se, Sn, Te, Tl y Zn. Únicamente diez de estos elementos son fácilmente movilizados por las actividades humanas en proporciones excedentes a los procesos geológicos: Ag, As, Cd, Cu, Hg, Ni, Pb, Sb, Sn y Tl.

Los patrones de distribución radial de elementos traza en troncos de árboles están influenciados por la localización del borde entre la madera temprana (albura) y la madera tardía. Algunos elementos tóxicos como el Cd y Pb mostraron bajas concentraciones cercanas al cambium, y los niveles se incrementaron cerca del centro del tronco (médula). Una translocación de sustancias tóxicas orgánicas a través de los rayos en el duramen fue sugerido como un posible mecanismo de desintoxicación de la albura (Prasad, 2001).

Una suposición fundamental del método dendroanalítico es la estabilidad de los patrones de distribución mineral por ejemplo, que una vez que los elementos fueron almacenados en los anillos no debería ocurrir una movilidad significativa. Aunque algunos estudios presentaron buenas correlaciones entre las distribuciones radiales entre los metales pesados en los anillos de crecimiento y los registros temporales de contaminación de industrias o tráfico, otras fallaron usando dendroanálisis como registro cronológico de contaminación. La distribución radial de elementos puede cambiar con el tiempo y las porciones móviles de elementos en madera indican la posibilidad de removilización y retranslocación. Sin embargo, el método puede proveer información acerca del transporte y el almacenamiento de los elementos en árboles (Prasad, 2001).

Los patrones de distribución radial en elementos traza en troncos de árboles están influenciados por la ubicación del borde entre la albura y el duramen (Okada et al,

1990; Chun and Hui-Yi, 1992). Elementos tóxicos como el Cd y el Pb mostraron bajas concentraciones cerca del cambium e incrementaron niveles hacia el centro del tallo (Nabais et al, 1999). El conjunto completo de información tanto en anillos de crecimiento como en partículas de aire, ha demostrado que la composición isotópica de algunos elementos como el Pb de los anillos puede ser usada exitosamente como una representación de la composición isotópica de Pb atmosférico de áreas urbanas (Tommasini et al., 1999).

Se han tenido estudios exitosos mostrando una correlación entre la contaminación ambiental y la concentración de metales pesados en anillos de crecimiento (Meisch et al, 1986; Tendel y Wolf, 1988; Yanosky y Vroblesky, 1992; Jonsson et al, 1997). Las concentraciones de Al en los anillos externos de crecimiento de la especie *Fagus sylvatica* se explicó por la acidificación del suelo, el cual movilizó este elemento en el suelo (Meisch et al., 1986).

La deposición ácida puede cambiar la disponibilidad de la absorción de elementos. Para trazar la historia de la deposición ácida de un bosque es necesario entender la distribución y movilidad de los cationes en el xilema. La distribución de cationes que son inmóviles en los anillos anuales pueden ser usados como un registro temporal de disponibilidad de nutrientes. Cabe mencionar que los metales traza que entran en las raíces son transportados en el xilema en el flujo de transpiración. La savia del xilema en el árbol es el líquido que fluye en el apoplasto, principalmente entre los elementos conductores de la madera. La mayoría de los elementos no siguen una simple difusión o cinética de flujo de masas del suelo al tallo. Las interacciones de los cationes con aniones no difusibles de la pared celular de los vasos del xilema conducen a una separación del transporte de cationes desde el flujo de agua. El xilema opera como una columna de intercambio iónico que tiene el potencial de impedir el movimiento hacia arriba del tronco por meses e incluso años (Prasad, 2001).

Entre las suposiciones que tiene este tipo de análisis se encuentra. Uno, la química de la madera refleja la química del suelo y de la solución del suelo. La relación química del suelo y del tronco es una serie de umbrales abruptos y de varios

equilibrios. La savia juega un papel muy importante, y es el líquido que fluye en el apoplasto, fundamentalmente a través y con los elementos conductores de la madera. La savia contiene células vivas. Casi ninguna célula sigue una cinética simple de flujo de masa desde el suelo hasta el tronco (Prenzel, 1979). Incluso concentraciones muy altas de metales como Pb en el suelo pueden ser no detectadas fácilmente en madera de crecimiento rápido (Lukaszewski et al., 1993).

Los metales traza son transportados a través del tejido de conducción de agua de los anillos y acumulado en la madera. Se asume que cuando los anillos pierden su función, aíslan un registro relativo de la química de la savia y los elementos absorbidos del ambiente son depositados solo en partes de actual crecimiento del árbol (Momoshima y Bondietti, 1990).

En un estudio de Robitaille (1981) se obtuvo que el decremento observado en Pb de la madera más reciente formada en árboles de sitios no contaminados se debió más a la exposición breve de la madera a la corriente de savia en lugar de un decremento en la cantidad de Pb en el suelo.

El movimiento de la savia del xilema toma lugar predominantemente a través de los lúmenes de los elementos del xilema. Las paredes internas del xilema llevan cargas negativas fijas, principalmente grupos carboxilos libres, y muchos cationes son transportados por el proceso de intercambio iónico (Dollard and Leep, 1977).

El calcio es el catión divalente más abundante en el xilema de la mayoría de las especies y juega un rol importante en el movimiento progresivo de otros cationes menos abundantes (Bell y Bidulph, 1963; Ferguson y Bollard, 1976). Momoshima y Bondietti (1990) encontraron que la capacidad de unión del calcio (CUC) del *Picea Rubens* fue más alta cerca de la médula y gradualmente se redujo hacia el cambium. El decremento de la capacidad de unión del calcio indica que hay menos grupos carboxilos disponibles para la unión (Momoshima y Bonditti, 1990).

El Cd y Pb, los elementos en la madera pueden estar presentes en varias formas de unión química con diferentes fuerzas. Una fracción móvil está disuelta en la savia del xilema y es fácilmente extraíble con agua, y una fracción menos móvil está unida

a cargas negativas fijas en las paredes de los vasos del xilema y solo se moviliza con ligandos fuertes (Nabais et al, 1999).

Los iones de Pb libre se unen más fácilmente al tejido de la madera que el Pb complejado. En la savia del xilema, el Pb está presente probablemente en forma acomplejada. La cantidad de Pb depositada en los anillos de crecimiento representa la fracción fácilmente unida (forma iónica) y no la cantidad total transportable de Pb (Lepp y Dollard, 1974). Es importante entender la forma de transporte de un elemento y su comportamiento en el xilema antes de que se hagan inferencias sobre su deposición en los anillos de crecimiento de anuales y su posible conexión con el ambiente del árbol (Nabais et al, 1999).

La selectividad en la absorción puede darse por el transporte activo en el simplasto, como ocurre para el Mg y K. El transporte simplástico puede ser fácilmente facilitado por las micorrizas, especialmente para el P. La selectividad de absorción ocurre en el apoplasto, la red de la pared celular esta menos controlada directamente pero es mantenida mediante la producción de los sitios de intercambio iónico y gradientes de pH. Para Ca esencial, la translocación es aploplastica mediante el desplazamiento sucesivo de iones. El Ba y el Sr no esencial son similarmente translocados en el apoplasto. La translocación del Mg es también activa mediante el transporte activo del simplasto y desplazamiento iónico en el apoplasto (Smith y Shortle, 1996).

Se han encontrado variaciones estacionales de concentraciones y patrones de distribución de los elementos en el tronco de madera de los árboles. Algunas fluctuaciones en las concentraciones de elementos traza en la madera pueden estar ligados a los cambios en cantidades y en composición de la savia del xilema durante el año (Hagemeyer y Shäfer, 1995). Un incremento de contenido de aminoácidos en la savia del xilema y un incremento consecuente en la capacidad de elementos translocados se observan usualmente en primavera (Sauter y Van Cleve, 1992).

Adicionalmente, la velocidad más alta del flujo de transpiración en verano incrementa la reducción de los elementos móviles en el tronco de madera que no es rápidamente remplazado por la absorción de la raíz (Nabais et al, 1999).

La distribución de algunos elementos traza parece ser afectado por procesos fisiológicos endógenos. La mayoría de los casos estudiados en dendroanálisis involucran casos que en el algún punto de su crecimiento sufrieron un incremento en los elementos traza presentes en el ambiente (Nabais et al, 1999).

Es importante mencionar que la distribución radial de los elementos está cambiando subsecuentemente. Las tasas de crecimiento de los anillos de crecimiento pueden también influenciar las concentraciones de los elementos en la madera. Durante periodos de crecimiento lento, altas concentraciones de elementos pueden ser encontradas en la madera. Por lo tanto, los patrones de distribución radial de metales pesados en anillos debería ser usada con precaución como una herramienta para el biomonitorio retrospectivo de la contaminación ambiental (Nabais et al, 1999).

Los análisis químicos de los anillos de crecimiento de árboles pueden resultar útiles para evaluar varios eventos tanto externos como internos de la historia del árbol. Se considera que las coníferas (incluyendo el *Taxodium mucronatum* Ten.) tienen un gran potencial para dendroanálisis, debido a la naturaleza primitiva de la madera (Legge et al, 1984). Prohaska et al (1998) ha indicado que existe un fuerte enlace entre la química de las plantas y la química del suelo. Es por ello que los abundantes elementos de los anillos de árboles pueden ser utilizados para evaluar las diferencias en los niveles de contaminación y otros cambios ambientales, aunque deben entenderse primeramente los procesos biológicos y evaluar la posible translocación de elementos en la especie.

## Capítulo 3

### DESCRIPCIÓN DEL MARCO GEOLÓGICO LOCAL

La ciudad de Querétaro se localiza en el centro del país, con una elevación topográfica promedio de 1890m.s.n.m. Carreón-Freyre et al. (2016) menciona que el Valle de Querétaro se encuentra dentro de un graben extensional del Mioceno, justamente en la frontera de las provincias geológicas de la Mesa Central y el Cinturón Volcánico Transmexicano. El valle de Querétaro está parcialmente emplazado sobre una llanura de lava basáltica intercalado con una unidad de piroclastos (andesitas, basaltos y domos dacíticos) de aproximadamente 100m, la cual fue erosionada por procesos fluviales durante el Terciario. Posteriormente se tiene una secuencia granular de depósitos piroclásticos (principalmente cenizas y lapilli), limo lacustre y sedimentos arcillosos. La unidad de las capas superficiales de la llanura están compuestas de limo y arena re TRABAJADOS provenientes de materiales piroclásticos o depósitos volcanoclásticos cubiertos por limo orgánico y arcilla esmectítica. En el Mioceno tardío se encuentra andesita y basalto fracturado. Por encima de esto se encuentra una unidad fluvio-lacustre de material grueso como conglomerados y arena en la base y material de grano fino como limo y arcilla en la parte superior que corresponden al material volcánico re TRABAJADO. Finalmente en el cuaternario se tienen depósitos aluviales y lacustres. En la Figura 3.1 se observan las características geológicas del Valle de Querétaro y en la Figura 3.2. se muestra la estratigrafía descrita anteriormente.

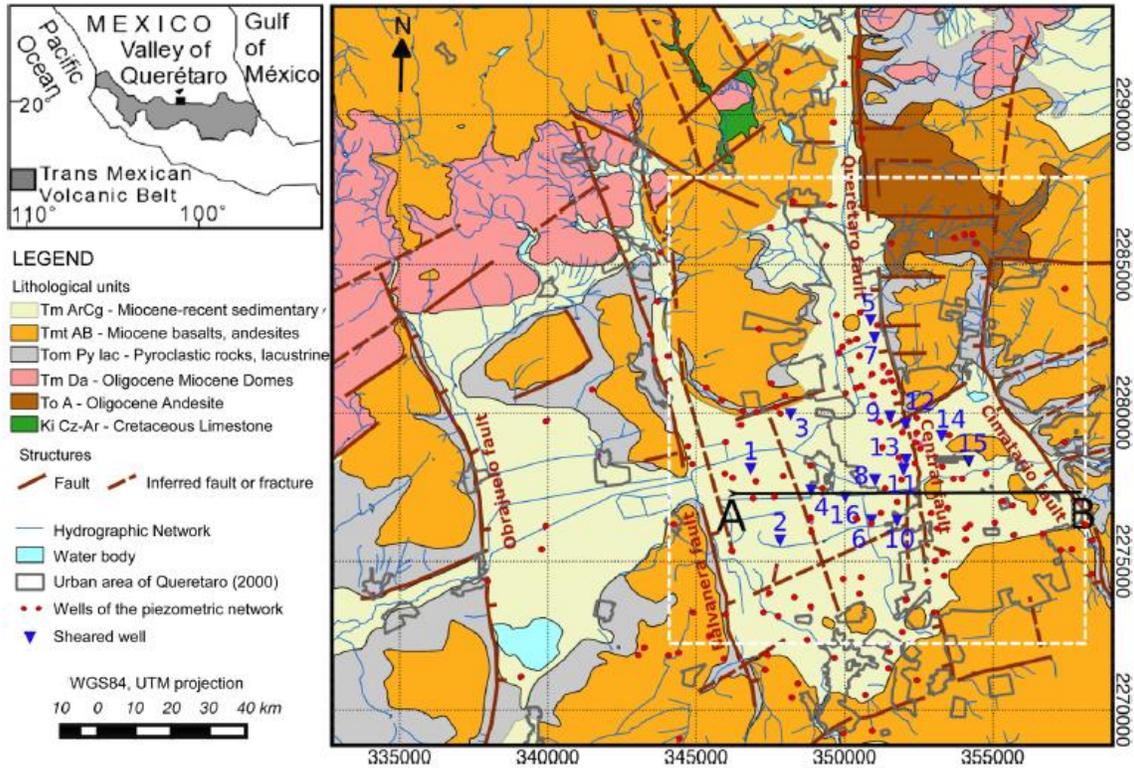


Figura 3.1 Características geológicas del Valle de Querétaro (Carreón-Freyre et al, 2016).

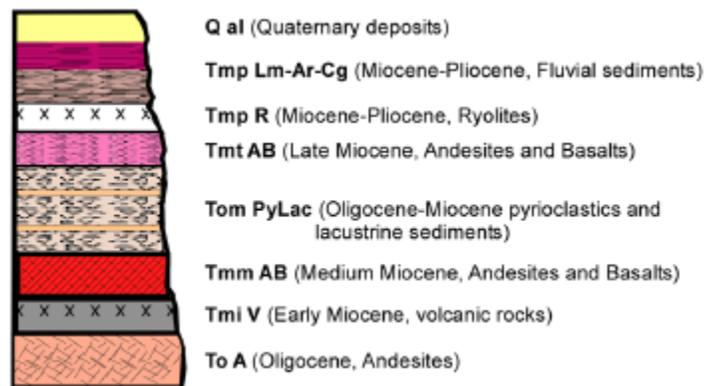


Figura 3.2. Estratigrafía representativa del Valle de Querétaro (Carreón-Freyre et al, 2016).

La geología superficial actual del Valle de Querétaro está conformada de manera general por andesitas y basaltos Miocénicos, junto con gravas, conglomerados,

arena, limos y arcillas y en la parte norte de la cuenca por riolitas del Oligoceno y en menor extensión caliza del Cretácico y conglomerados y arenisca. Mientras que en menor proporción se encuentran tobas del Mioceno y gravas (Carrera et al, 2016).

De acuerdo con los estudios de la Food and Agriculture Organization (FAO, 1988) el tipo de suelo en las áreas de estudio son comparables y formados por Feozem lúvico con textura media (Correa, 2014).

Las condiciones meteorológicas entre los dos sitios de estudio son comparables por la cercanía que existe entre ellos (40km). La temperatura media anual es de 15.79°C, con máximas de 29.3°C en mayo y mínimas de 4.5°C en enero. En la zona climática centro las condiciones promedio se establecen en 22.0°C como máxima, 7.5°C como mínima y un clima templado subhúmedo (Correa, 2014). Las temperaturas medias en las estaciones lluviosas y secas van desde 15°C a 20°C, respectivamente. La distribución de las precipitaciones se caracteriza por períodos prolongados de sequía interrumpidos por tormentas ocasionales pero de alta intensidad. Las precipitaciones presentan un acumulado anual medio de 500mm y se concentran en una breve temporada, ocurriendo principalmente entre junio y septiembre. El valor de la evapotranspiración potencial anual promedio para el área de estudio es de 746 mm por año. La aridez de la región se debe a la combinación de la escasez de precipitaciones y el tiempo de retención corto de las aguas superficiales debido a la mala calidad del suelo y las altas tasas de evaporación, lo que limita la disponibilidad de agua para la vegetación (Hernández, 2014).

Se presentan climogramas de precipitación y temperatura de dos estaciones climáticas cercanas a los puntos de muestreo respectivamente de la CEA (Comisión Nacional de Agua) ubicadas en Querétaro 20°34'13"N 100°22'11"W y San Juan del Rio 20°22'27"N 99°59'54"W para evaluar las posibles correlaciones entre las afectaciones de estos factores en la cuenca y el crecimiento de los árboles como se muestra en la Figura 3.3 correspondiente al sitio de Calesa - Querétaro y 3.4 perteneciente al sitio de Barranca de Amealco – San Juan del Rio.

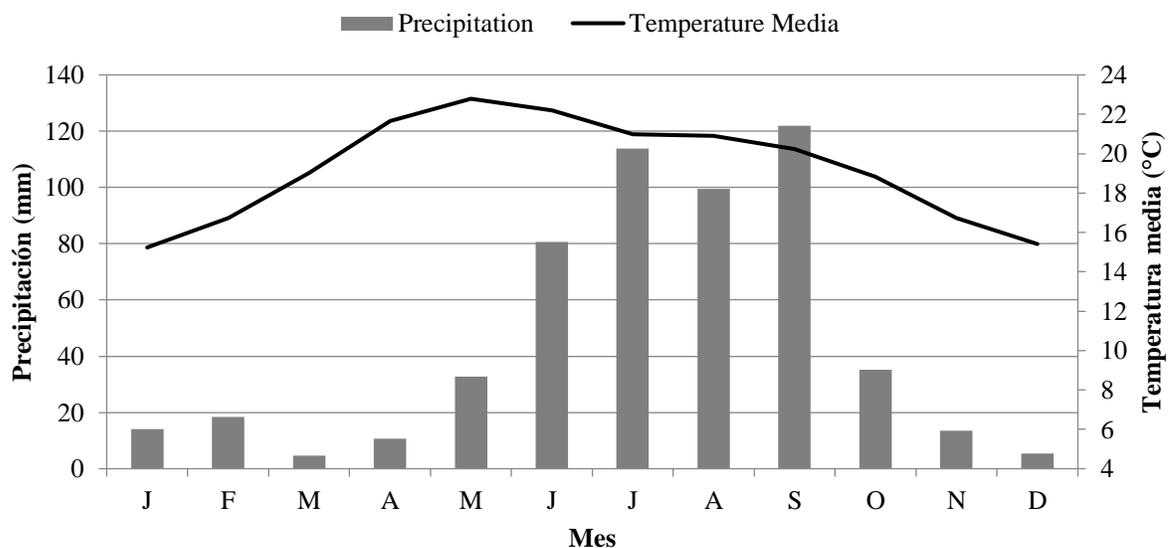


Figura 3.3 Climograma de estación de monitoreo de la CEA ubicada en Querétaro para el periodo de 1995 – 2013 (INEGI-CONAGUA, 2015; INEGI, 1995; 1996; 1997; 1998; 1999; 2000; 2001; 2001; 2002; 2003; 2004; 2005; 2006; 2007; 2008; 2009; 2010; 2013).

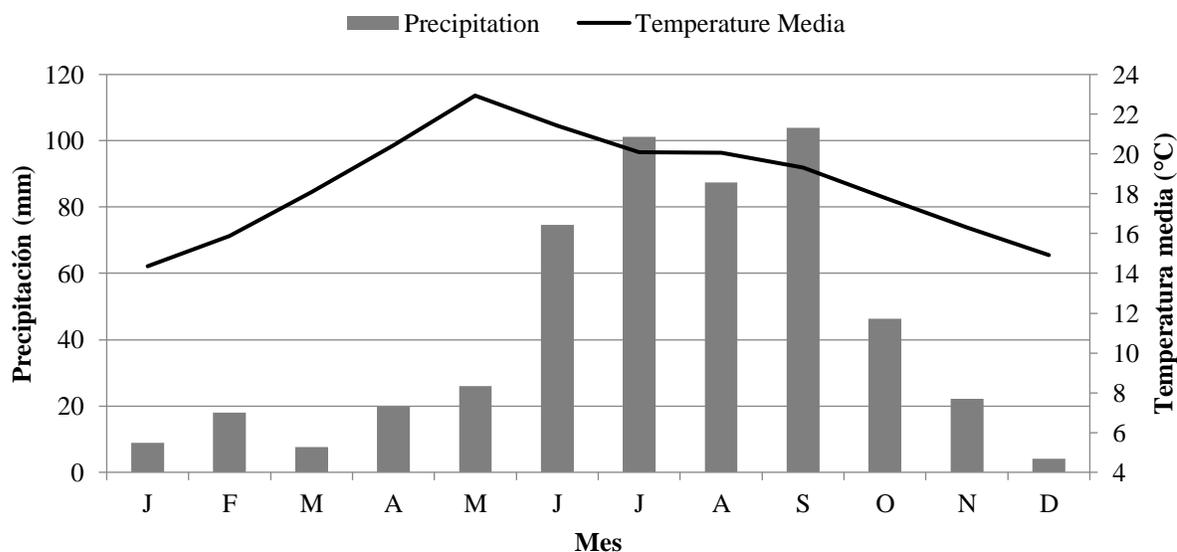


Figura 3.4 Climograma de estación de monitoreo de la CEA ubicada en San Juan del Río para el periodo de 1995 – 2013 (INEGI, 1995; 1996; 1997; 1998; 1999; 2000; 2001; 2001; 2002; 2003; 2004; 2005; 2006; 2007; 2008; 2009; 2010; 2015).

La red de drenaje es principalmente de tipo dendrítico. Numerosos arroyos y corrientes efímeras transportan cantidades considerables de agua hacia los ríos Querétaro y los tributarios a la Presa Constitución de 1917, entre los que se encuentra la corriente o el cauce del sitio de Barranca de Amealco al que se denominará con el mismo nombre, es decir río Barranca de Amealco. Ambos ríos se ubican en las áreas de estudio y son corrientes de agua perenne. La cuenca a la que pertenece la parte oriental del Valle de Querétaro donde está ubicado el árbol de Calesa, es la del Río Querétaro y se encuentra dentro de la región hidrológica del Lerma- Santiago. La localidad de Barranca de Amealco se encuentra en la región hidrográfica del Pánuco, en la cuenca del Río Moctezuma. La corriente perenne donde se encuentran los árboles seleccionados pertenece a una corriente tributaria a la presa Constitución de 1917. Esta corriente se ubica en la subcuenca Drenaje Caracol de tipo endorreica que drena en el Río San Juan (INEGI, 2015).

Los sitios donde se encuentran los árboles de estudio en Calesa y Barranca de Amealco son sistemas riparios, donde la vegetación se desarrolla a lo largo de ríos y riberas de lagos de agua dulce. Esta vegetación tiene la capacidad de soportar inundaciones temporales e invadir rápidamente bancos de grava y áreas expuestas. Estos sitios son muy particulares, debido a que se encuentran dentro de un ambiente semidesértico donde predomina una vegetación de tipo arbustos subtropicales caracterizada por mezquite, nopal, guajillo, garambullo y pastizales. Entre las funciones de los ecosistemas de tipo riparios se encuentran la filtración entre los ambientes adyacentes y el río, impidiendo el flujo de agroquímicos y productos orgánicos (insumos agrícolas y desechos agropecuarios) a los torrentes de los cuerpos de agua, amortiguando también procesos de sedimentación de los lechos de ríos. Estos bosques son un conjunto muy heterogéneo (Hernández, 2014).

## Capítulo 4

### METODOLOGÍA

#### 4.1 Selección del sitio y especie de estudio

Primeramente se eligió el sitio de estudio y la especie de árbol. Para ello se evaluó la población arbórea existente en el estado, su cercanía a la zona urbana, así como un sitio donde dicha población tuviera menor disturbio por actividades humanas para utilizarlo como blanco. Se consideró el tener dos sitios con poblaciones que se desarrollaran bajo diferentes ambientes (considerando criterios como disturbio por actividades antropogénicas, cercanía a cuerpos de agua así como fuentes puntuales o difusas de contaminación atmosférica, población de árboles, entre otros) para comparar las tendencias de algunos elementos. A su vez, se buscó una especie que registrara su crecimiento anualmente por lo que se acudió al Laboratorio de Ecología de la Facultad de Ciencias Naturales de la Universidad Autónoma de Querétaro y se recomendó ampliamente el uso de coníferas, dentro de ellas el pino y el ahuehuete.

Se eligió la especie *Taxodium mucronatum* Ten. por encontrarse en el margen de uno de los Ríos más importantes de la ciudad de Querétaro (en términos de contaminación) y se valoró el estudio en los municipios aledaños a la capital del Estado. Una vez delimitada la zona de estudio, se estableció la zona riparia de la corriente tributaria a la Presa Constitución de 1917 en Barranca de Amealco, San Juan del Río como “blanco” y la zona que abarca el Río Querétaro dentro de la colonia Calesa en el municipio de Querétaro como área de contaminación. Cabe mencionar, que el crecimiento urbano descontrolado de Querétaro ha provocado que la población de Ahuehuetes permanezca mermada por lo que sólo quedan algunos especímenes en ciertos puntos de Querétaro, Tequisquiapan y San Juan del Río. Además del crecimiento urbano en el sitio de Calesa, uno de los problemas que trajo consigo la remoción de árboles para la construcción de calles, carreteras

y vivienda, fue la pavimentación y la contaminación de cuerpos de agua con residuos urbanos, industriales y basura por lo que el Río Querétaro ya ha presentado muchos problemas sanitarios (Cabrera y Rodríguez, s.f.; López, 2015), conjuntamente a la cercanía (<250m) del Boulevard Bernardo Quintana, una de las principales vialidades de la ciudad y una población superior a los 850,000 habitantes en el municipio de Querétaro. En cuanto a la zona de Barranca de Amealco se tiene una urbanización mucho menor, con una población menor a los 4,700 habitantes en los poblados más cercanos llamados Galindo y San Miguel Galindo, cuyas principales actividades son la agricultura, ganadería aunque se tiene apicultura.

## 4.2 Muestreo

Las campañas de muestreo de los dos sitios se llevaron a cabo entre el 22 de enero y el 14 de febrero del 2015. Para completar el estudio se realizó un muestreo adicional de agua superficial durante el mes de junio que corresponde a la temporada de lluvias, esto con la finalidad de obtener información sobre el comportamiento de algunos elementos de interés antes y después de lluvias, así como de los aniones y evaluar si de manera general se diluyen o se concentran.

### 4.2.1. Muestras de agua

El muestreo de agua corresponde a dos sitios, el primero corresponde al Río Barranca de Amealco, el cual es un efluente de la presa Constitución de 1917 y se localiza en una parte de la Barranca que pertenece a San José Galindo, una comunidad de San Juan del Río en el estado de Querétaro, con coordenadas 20°22'58.8" latitud Norte y 100°05'38.4" Latitud Oeste y con una altitud de 2005m. El segundo sitio corresponde al Río Querétaro que está ubicado en la Colonia Calesa, Delegación Cayetano Rubio del municipio de Querétaro. Las coordenadas del sitio son a 20°36'02.79" latitud Norte y 100°22'23.91" latitud oeste con una

elevación de 1835m. De las Figuras 4.1 a la 4.3 se pueden observar los sitios de muestreo en vista área por el programa de Google Earth.



Figura 4.1 Mapa del Estado de Querétaro de los puntos de muestreo.



Figura 4.2 Sitio de muestreo en la colonia Calesa

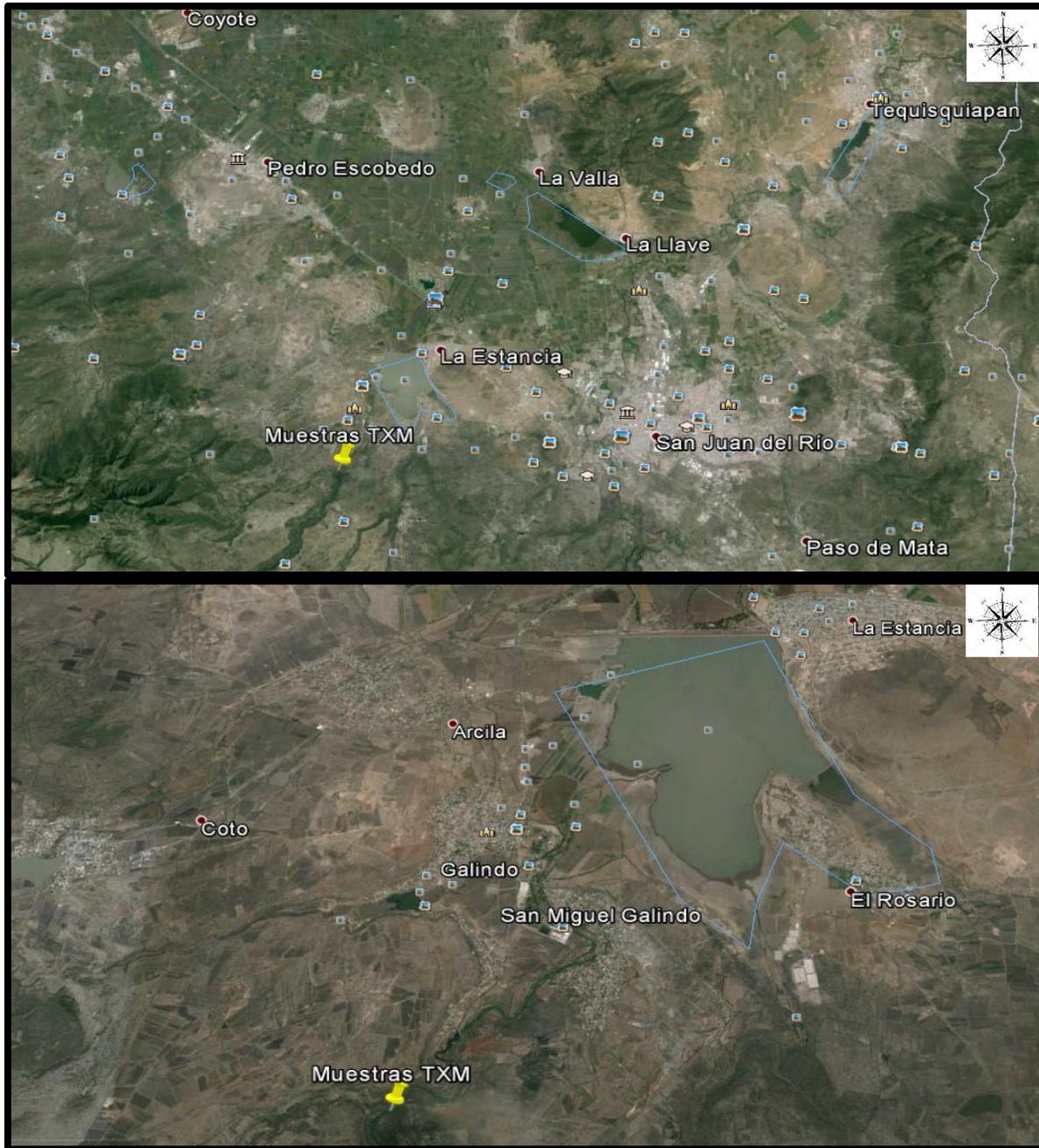


Figura 4.3 Sitio de muestreo en Barranca de Amealco.

Para las muestras de agua, se realizaron dos visitas a cada sitio de estudio. La primera visita se llevó a cabo el 14 de febrero y la segunda el 10 de junio del 2015. Las muestras de agua se tomaron cercanos a los árboles de los que se tomaron las

series de crecimiento y consistieron en una muestra de análisis para aniones y otra para cationes de cada sitio y cada visita, siendo un total de ocho muestras como se observa en la Figura 4.4. Las muestras fueron colectadas en frascos de polietileno de alta densidad con rosca de marca Nalgene con capacidad de 125ml. Los frascos que fueron utilizados para aniones, únicamente se lavaron con agua RO (aplicando osmosis inversa) y agua desionizada para evitar lecturas erróneas en el equipo, mientras que los que fueron utilizados para colectar las muestras de cationes llevaron el mismo procedimiento pero adicionalmente pasaron por un lavado de ácido nítrico al 20%.

Las muestras fueron tomadas en frascos de 125ml. A las muestras de cationes se les adicionó  $\text{HNO}_3$  concentrado (al 2%) en campo para que se mantuviera un pH menor a 2 y evitar reacciones redox con los elementos presentes o propagación de microorganismos. A su vez, se midieron algunos parámetros en campo como pH y temperatura. Todos los frascos fueron etiquetados previamente a la salida de campo.



Figura 4.4 Muestreo de agua y acidificación de muestras de cationes en Barranca de Amealco.

También se tomaron blancos, tanto de aniones como de cationes en el mismo sitio. Para este proceso, se llevó agua desionizada en frascos con el proceso de lavado previamente mencionado pero con capacidad de 500ml. Esta agua fue vertida en un frasco de 125ml en el mismo punto donde se tomó cada muestra, para tener un blanco.

Para su transportación, los frascos se colocaron en bolsas y se introdujeron en una hielera para que mantuvieran una temperatura menor a los 10°C hasta llegar al laboratorio. En la tabla 4.1 se pueden observar las muestras de agua recolectadas con sus especificaciones.

Tabla 4.1 Muestras de agua recolectadas según tipo de muestra y coordenadas.

Sitio	Fecha	Nombre	Tipo de muestra	Coordenadas		Características
				Latitud	Longitud	
Barranca de Amealco	14/02/15	ATAX1aG	Aniones	20°22'21.69"	100°06'19.92"	Corriente tributaria a la presa Constitución de 1917
		ATAX1cG	Cationes	20°22'21.69"	100°06'19.92"	
	10/06/15	ATAX2aG	Aniones	20°22'21.64"	100°06'19.71"	
		ATAX2cG	Cationes	20°22'21.64"	100°06'19.71"	
Calesa	14/02/15	ATAX1aC	Aniones	20°36'06.18"	100°22'26.29"	Cauce del Rio Querétaro
		ATAX1cC	Cationes	20°36'06.18"	100°22'26.29"	
	10/06/15	ATAX2aC	Aniones	20°36'06.20"	100°22'26.63"	
		ATAX2cC	Cationes	20°36'06.20"	100°22'26.63"	

#### 4.2.2. Muestras de suelo

Se tomaron muestras de suelo de ambas zonas de estudio, de forma superficial y a una distancia <1m del árbol donde se tomaron los testigos. Se evaluó que no tuviera algún tipo de erosión o afectación visible y que no estuviera en una zona de fácil arrastre por gravimetría o flujo pluvial a la corriente cercana.

Se recolectaron en total dos muestras de suelo con textura diferente para el primer sitio de Barranca de Amealco y una para el de Calesa. Las muestras se colectaron con pala de plástico y se guardaron en bolsas selladas "Ziploc" para evitar contaminación, estas correspondieron aproximadamente a 500g cada una. Posteriormente se etiquetaron y almacenaron hasta llegar al laboratorio, en la tabla 4.2 se observan los sitios de muestreo y las coordenadas.

Tabla 4.2 Muestreo y descripción de las muestras de suelo

Sitio	Fecha	Nombre	Coordenadas		Características
			Latitud	Longitud	
Barranca de Amealco 1	22/01/15	STAX1M1G	20°22'17.37"	100°06'19.66"	Superficial, muestra de suelo de raíces superficiales del árbol de lado SE a 3-5cm de profundidad y a 1.5m del rio.
Barranca de Amealco 2	22/01/15	STAX2M1G	20°22'17.4"	100°06'19.75"	Superficial, muestra a un 1m de distancia del árbol donde se tomaron los testigos y a 3m del rio.
Calesa	14/02/15	STAX3M1C	20°36'02.79"	100°22'23.91"	Superficial, muestra de suelo de raíces superficiales del árbol de lado NE a 3-5cm de profundidad y a 5-7m del rio.

Para el muestreo de suelo, se decidió no excavar para poder tener una correlación entre el agua, suelo superficial y los testigos, permitiendo evaluar si se tienen agentes contaminantes superficiales por deposición o los elementos de los testigos

están más relacionados a las corrientes de agua. En la Figura 4.5 se pueden observar las muestras del suelo.



Figura 4.5 Muestras de suelo de los dos sitios. En a) suelo STAX1M1G, b) STAX2M1G y c) STAX3M1C.

#### 4.2.3. Muestras de series de anillos crecimiento de árboles

El día 22 de enero del 2015 se llevó a cabo el primer muestreo de la especie *Taxodium mucronatum* Ten. en Barranca de Amealco.

La selección de los árboles se realizó con base en criterios como un tallo uniformemente circular, sin contrafuertes, poco disturbio (ataque de plagas, incendios, enfermedades o daños físicos) así como una apariencia longeva (para que se pudiera tener una cronología lo más amplia posible y mayor certidumbre en el cofechado, que requiere muestras de al menos 100 años) y que fuera accesible para el muestreo (altura de 1.5m).

Se seleccionó un árbol ubicado en la localidad de Galindo o Barranca de Amealco en San Juan del Rio al cual se le definirá del Sitio 1, que cumplía con las características mencionadas previamente. Este árbol tiene un ancho de 6.30m ( $\Phi=2$ ) y una altura aproximada de 20.92m, se encuentra en la orilla de una de las corrientes tributarias a la presa Constitución de 1917 y se puede observar en la figura 4.10. De este ejemplar se obtuvieron los primeros cuatro testigos o series de crecimiento con un Taladro de Pressler marca Haglof de 18" con diámetro interno

de broca de 0.5mm y de 2 cuerdas. Las muestras se envolvieron en película de emplaye para evitar alguna contaminación.



Figura 4.6 TAX1MG: Árbol del que se tomaron los testigos del sitio 1, ubicado en Barranca de Amealco, San Juan del Rio, Qro.

En la Figura 4.6 se puede observar en a) el árbol desde el suelo hasta el inicio de la copa, en b) se muestra cuando se perforó para obtener los testigos, c) y d) muestran los puntos donde se obtuvieron los testigos. Cabe mencionar que las muestras se tomaron del mismo lado por dos razones, la primera era que se deseaba que las series fueran cercanas para que los anillos fueran lo más parecido químicamente y la segunda era que otra parte del árbol era bastante irregular. Villanueva (2009) menciona que cuando el crecimiento de la especie forma contrafuertes muy irregulares, provocando que sean difíciles de fechar, se debe buscar una sección regular del fuste donde se puedan obtener muestras muy cercanas unas de otras aunque en diferentes orientaciones que permitan captar con veracidad la variación del crecimiento del árbol.

El árbol de la Figura 4.7 pertenece al sitio 2 y está ubicado en la Colonia Calesa. Tiene un ancho de 3.26m ( $\Phi = 1.03$  y una altura de 19.67m aproximadamente). En dirección SE del árbol y a 5m aproximadamente se encuentra una corriente de agua perteneciente al Río Querétaro. Debido a las características internas del árbol, de las siete perforaciones solo se pudieron obtener 4 muestras completas y tres incompletas, sin embargo, todas se almacenaron, transportaron y trataron de la misma forma.



Figura 4.7 TAX3MC: Árbol del que se tomaron los testigos del sitio 2, ubicado en la colonia Calesa, Del. Cayetano Rubio, Qro.

En la Figura 4.7 se muestra en a) el árbol desde el suelo hasta la copa, en b) la perforación del árbol para obtener los testigos y c) muestra los puntos donde se obtuvieron los testigos y se les colocó cera de Campeche para evitar enfermedades o plagas que puedan afectar al árbol.

Se plantea que a cada muestra se le debe etiquetar adecuadamente colocando las primeras tres letras del sitio, el número de árbol y con letras (A,B,C, etc.) el número de muestra, así como las coordenadas, la altura y el diámetro del árbol. Sin embargo, como no se tenían más que dos árboles diferentes, se optó por utilizar TAX por la especie de árbol, seguido por el número de árbol, la letra m de muestra y el número de muestra, finalizando con la inicial del sitio G (Galindo) y C (Calesa).

Las once muestras de testigos (ocho completas y tres fragmentadas) que fueron obtenidas de dos árboles se transportaron envueltas en película de empaque para evitar su contaminación. Una vez que llegaron al laboratorio se colocaron en el horno de secado marca Riossa, modelo H-48 a 40°C hasta alcanzar peso constante.

### 4.3 Análisis de muestras

#### 4.3.1 Análisis de muestras de agua

Las muestras de agua se guardaron en una hielera para mantenerse a baja temperatura durante el transporte hasta llegar al laboratorio. Antes de poder llevar a cabo las lecturas de pH se calibraron los sensores con soluciones buffer de 4, 7 y 10. El pH fue de 7.4 para el agua de Barranca de Amealco y de 7.2 para el agua de Calesa.

##### 4.3.1.1 Análisis de cationes por ICP-OES

Una vez medidas, las muestras fueron filtradas con membranas Millipore de 0.45µm y se verificó que el pH de las muestras de cationes fuera  $\leq 2$  para que no afectara las lecturas en el equipo. Las muestras de cationes se analizaron con el equipo ICP-OES- Thermo Scientific iCap 6000 series junto con sus respectivos blancos, como se muestra en la figura 4.8. Cabe mencionar que se llevaron a cabo dos curvas de calibración para valorar la eficiencia del equipo antes de medir las muestras. Se

utilizó Ytrio como estándar interno, la solución de lavado fue  $\text{HNO}_3$  al 2% y se utilizó gas argón con pureza del 99.998%. Para la primera curva se utilizaron seis puntos con concentraciones desde 0.005mg/L hasta 10mg/L del estándar EPA Method 200.7 Calibration Standard 5 de la marca High-Purity Standards, número de lote 1229733 de la EPA 200.7 y la segunda a la que nombraremos multi, se preparó a partir de estándares monoelementales certificados como el Ca con número de lote B2-CA03094, Na con lote F2-NA03098, K con lote B2-K022150, Mg con lote B2-MG03069 todos de marca inorganic ventures y concentración de 1000 $\mu\text{g/L}$ , además de azufre de marca High Purity Standards y lote 1208214 con los cuales también se prepararon 6 puntos con concentraciones que abarcaron desde los 0.05mg/L hasta los 100mg/L. Cabe mencionar que para la primera curva cada uno de los elementos tuvo diferentes concentraciones iniciales diferentes.

Se decidió analizar 33 elementos (cationes) como un barrido general para evaluar qué era lo que contenía el agua y así poder establecer alguna relación con la química de las series de anillos de crecimiento y el suelo.



Figura 4.8. Equipo ICP-OES Thermo Scientific iCap 6000 utilizado para el análisis de muestras de cationes de agua.

#### 4.3.1.2 Análisis de aniones por Cromatografía de Intercambio Iónico

A su vez las muestras para aniones fueron analizadas con el cromatógrafo de intercambio iónico 2500, con el detector Dionex EDS50 y columna A514 como se muestra en la Figura 4.9.

El cromatógrafo también requirió de una calibración. Para ello se preparó una curva de calibración con 7 estándares de aniones como  $F^-$ ,  $Cl^-$ ,  $Br^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $PO_4^{2-}$  y  $SO_4^{2-}$  con concentraciones diferentes que van desde los 0.05mg/L hasta 30mg/L con lo que también se obtuvo la MCL (muestra control de laboratorio). Fue necesario corroborar que las muestras no tuvieran concentraciones muy elevadas de ciertos elementos, porque podrían saturar al equipo, esto se debe a que en ocasiones se requiere hacer diluciones si se estima que es un sitio sumamente contaminado o con concentraciones muy altas. Los aniones que se analizaron corresponden a los mismos para los que se colocaron los estándares  $F^-$ ,  $Cl^-$ ,  $Br^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $PO_4^{2-}$  y  $SO_4^{2-}$  debido a que son las especies que se deseaban conocer por interés ambiental, además de que son los nos permite ver la columna y el detector a través de la metodología que se realizó.

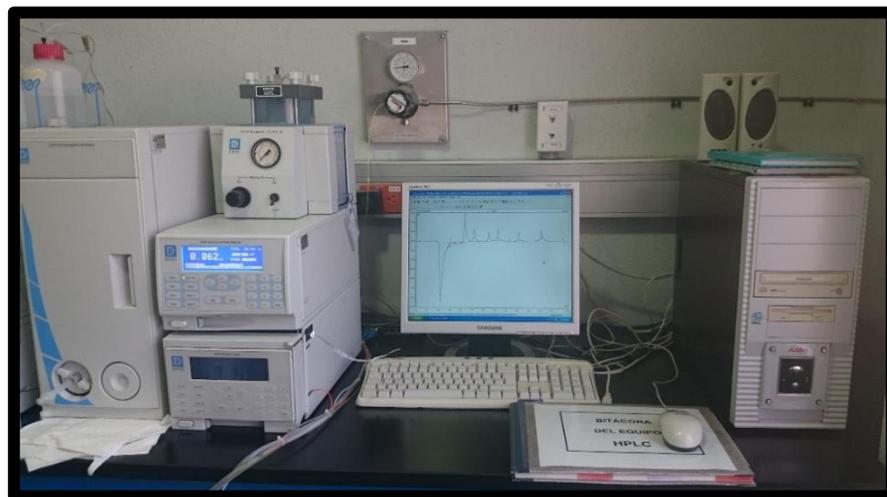


Figura 4.9. Cromatógrafo de Intercambio Iónico utilizado para el análisis de muestras de aniones de agua.

#### 4.3.2 Análisis de suelos

##### 4.2.2.1 Preparación de muestras de suelo

Las muestras de suelo, se llevaron a un horno donde fueron secadas en vidrios de reloj a 40°C para eliminar humedad pero no volatilizar los elementos relevantes para el estudio. Se mantuvieron en el horno durante 14 días hasta llegar a peso constante, se disgregaron y cuartearon para ser posteriormente cribadas con tamices de medidas de la Tabla 4.3 y observadas en la Figura 4.6.

Tabla 4.3 Tabla de mallas utilizadas para el tamizar las muestras de suelo

<b>Número de malla</b>	<b>Milímetro</b>
100	0.149
200	0.074

Debido a que se utilizaría el equipo de ICP-OES se utilizó la muestra que tuviera un tamaño igual o menor a 0.074mm es decir que pasara la malla 200, esto debido a que es el tamaño mínimo requerido para que la muestra pueda digerirse correctamente por el método utilizado.

El equipo ICP-OES requiere que las muestras sólidas sean digeridas para que puedan ser leídas por el equipo y para que puedan pasar de la fase sólida de suelo a fase líquida, dejando los elementos de interés disponibles y eliminando las posibles interferencias. A su vez el método EPA 200.7 también menciona que se requiere una digestión para la determinación de analitos totales en muestras sólidas cuando los elementos no están en solución (Martín, 1994). Se consideró necesario hacer una digestión ácida en la cual se utilizó ácido nítrico para hacer una descomposición oxidativa de las muestras de suelo y poder determinar su contenido de metales traza.

Para la digestión del suelo, se utilizó el método EPA 3051a, el cuál incluye agua regia (3mL HCl y 9mL de HNO<sub>3</sub>) y vasos de Alta Presión de Teflón (XP-1500). En la Figura 4.10 se observa el material utilizado para el procedimiento, la micropipeta con capacidad de 5mL y el HNO<sub>3</sub> Instra CAT 9598-34 que se adicionó a la muestra, así como los vasos de teflón con 0.1g de muestra.



Figura 4.10 Adición de HNO<sub>3</sub> a las muestras de suelo para el método de digestión por el método EPA3651a

Se utilizó un material de referencia certificado NIST (Nacional Institute of Standards and Technology) de Estados Unidos, con clave 2710a, el cual constituye una muestra de suelo con altas concentraciones conocidas de elementos mayores y traza. A su vez, se utilizó una solución estándar certificada (QCS-26 marca High Purity Standards) con concentración conocida para fortificar una de las muestras (duplicado) para darle trazabilidad a los resultados conociendo el porcentaje de recuperación de ciertos elementos en la muestra, así como contaminación de éste o posibles interferencias en la matriz. Para esta recuperación, se consideró que el criterio para que esta fuera aceptable estuviera dentro de un rango de  $\pm 25\%$ . La trazabilidad queda definida como la comparación que une el resultado con los estándares del sistema internacional y pasa por los patrones de referencia (Riu et

al, 1992) para lo que nos sirve el material de referencia. Cabe mencionar el material de referencia estándar es el que nos ayuda a evaluar el procedimiento de digestión y la recuperación, sin embargo, para este estudio utilizamos una muestra fortificada nos permitiera evaluar si la digestión se había llevado a cabo adecuadamente debido a que al introducir una concentración conocida a la muestra duplicada y esperamos obtener al menos esa concentración, lo que nos sirve como parámetro para asegurar que la muestra contiene ese elemento. Duffau *et al* (2010) señala que la recuperación es aquella fracción de la sustancia agregada a la muestra (muestra fortificada) antes del análisis, cuando se tienen muestras fortificadas y sin fortificar. Por lo que esta recuperación permite conocer el rendimiento de un método analítico en cuanto al proceso de extracción y la cantidad de analito que hay en la muestra original, por lo que esta inherente relacionada con las características de la matriz de la muestra.

Se utilizaron vasos de blancos para cada digestión, los cuales pasaron por el mismo proceso que los vasos de las muestras (lavado y secado). Estos blancos, tienen exactamente la misma cantidad de reactivos y tratamiento que los vasos con muestra, a excepción de que no contienen muestra. Lo que nos permite evaluar si existe cualquier contaminación y evaluar el ruido del equipo.

Posteriormente, las muestras fueron colocadas sobre chaquetas dentro del carrusel como se observa en la figura 4.11, para ser digeridas por el microondas Xpress Microwave. Este método incluye 3 rampas a 1600W de potencia; la primera para alcanzar una temperatura de 100°C durante 15 minutos y mantenerse así por dos minutos, la segunda para alcanzar 150°C durante 10 minutos y mantenerse así por dos minutos también y finalmente otra rampa de 15 minutos para alcanzar 175°C con 10 minutos de mantenimiento, además de los 15 minutos de enfriamiento. Una vez que se enfriaron y se retiraron del carrusel, las muestras se filtraron con papel filtro Whatman Ashless 42 (110mm  $\Phi$ ) para después ser aforadas a un volumen 50ml con agua desionizada.

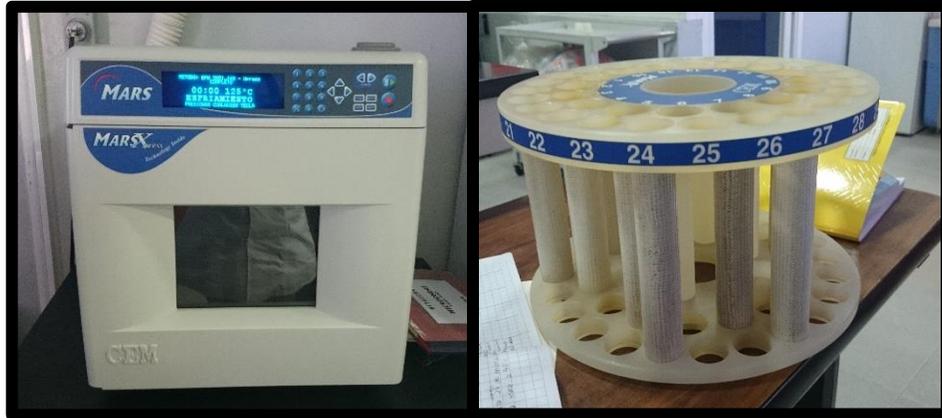


Figura 4.11 a) Microondas MarsXpress utilizado para la digestión de muestras, b) Carrusel y chaquetas para colocar las muestras.

Las muestras digeridas, se mantuvieron en refrigeración a 4°C hasta el día en que se analizaron con el equipo ICP-OES- Thermo Scientific iCap 6000 series junto con sus respectivos blancos, esto debido a que las muestras debían estar a temperatura ambiente.

#### 4.3.4 Análisis de anillos de crecimiento de árboles

##### 4.3.4.1 Datación de núcleos o series de anillos de crecimiento

Se eligieron cuatro núcleos de cada árbol que se mostraran completos y lo más regulares posibles (en cuanto a número y tamaño de anillos) para poder analizarlos mediante el microscopio y elegir tres de cada árbol para colocarlos en una base de madera de pino para poder fecharlo, mientras que las dos muestras restantes (una de cada árbol) se eligieron para ser sometidas a espectrometría de emisión atómica.

Una vez montados las series en bases de pino, se pegaron con resistol blanco para madera y se colocó masking tape para asegurar que no se movieran de sitio y toda la superficie de la serie estuviera adherida a la base. Se dejó secar toda la noche y al día siguiente se le retiraron los pedazos de masking, permitiendo lijar las muestras. Para el proceso de lijado se utilizaron varios tamaños de grano de lija,

comenzando desde la 120, 280 y 400, pudiendo utilizar las de 1200 y 1500 para el pulido final, lo que permite que sean más visibles los anillos de crecimiento, como se observa en la figura 4.12.

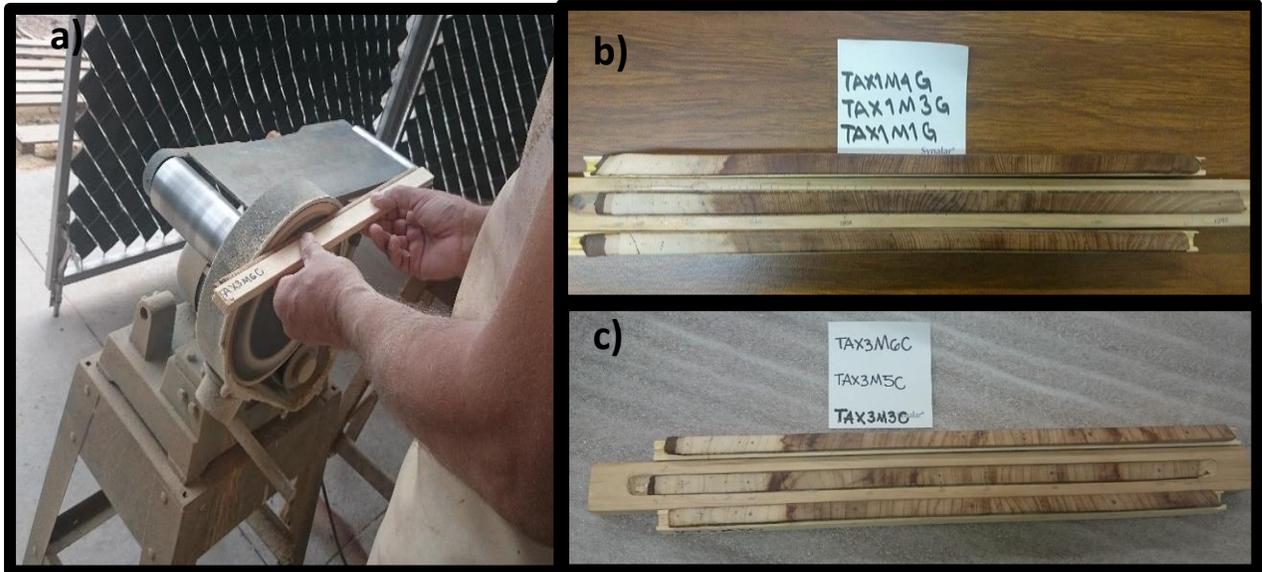


Figura 4.12 a) Lijado de muestras semimanual, b) y c) Muestras lijadas del árbol del sitio uno y dos respectivamente.

Una vez que las muestras estaban lijadas, se utilizó un microscopio binocular Westover 10x para dar inicio al fechado, el cual consiste en realizar gráficos en hojas milimétricas para cada muestra llamados “gráficos esqueletos” o “skeleton plots”. Estos gráficos son representaciones de los anillos de cada serie y sirven para compararlos entre ellos y/o con una serie maestra de la misma zona o un lugar cercano y así poder visualizar si se tienen anillos falsos o perdidos en alguna de las series.

Se inicia el conteo de anillos de la parte más cercana a la médula hasta la más nueva o reciente y se construyen las gráficas de esqueleto de acuerdo a la notación establecida por Constante et al. (2009). Para realizar estas gráficas de esqueleto, se requiere marcar cada anillo grueso con una b y los anillos delgados con una línea, la cual se vuelve más larga a medida que el anillo es más angosto. En la figura

4.13. se muestra el microscopio y en la parte inferior la gráfica de esqueleto para esa serie.



Figura 4.13 Prefechado de muestra en microscopio y elaboración de un gráfico de esqueleto por cada muestra

Cuando se compararon los esqueletos se pudieron observar las similitudes y discrepancias entre las series, así como los problemas de crecimiento entre series del mismo árbol y la diferencia entre los anillos. Conociendo estos problemas, se fueron fechando los núcleos uno a uno.

Una vez establecido la fecha para todas las muestras del mismo árbol, se compararon con la serie que no fue montada. Cabe mencionar que para evitar problemas de contaminación de las muestras que iban a ser analizadas, éstas se pulieron únicamente con las lijas de grano fijo y se tomaron fotos de cada serie con un microscopio Olympus SZX12, 0.5X y lámpara NCL 150 para poder llevar a cabo el cofechado, como se muestra en la Figura 4.14.

a)



b)



c)



Figura 4.14 a) Microscopio Olympus SZX12 utilizado para tomar fotografías de las series cuyos elementos se analizarían por ICP-OES, b) Serie de TAX1M2G, c) serie de TAX3M7C.

En el Laboratorio de Dendrocronología del CENID-RASPA ubicado en Gómez Palacio, Durango, se midió el ancho de anillo total de los núcleos de crecimiento con un sistema trilocular estereoscópico VELMEX con precisión de 0.001mm como se puede observar en la Figura 4.15, el cual utiliza el software Measure JX2. Este software permite hacer mediciones de anillos totales así como de madera temprana y tardía, lo cual es muy utilizado para dendroclimatología.

Se midió el ancho de anillos de todos los núcleos, estas mediciones se verificaron con el programa COFECHA, el cual nos permite establecer una correlación entre las series determinada en cada núcleo de cada árbol y después entre árboles de uno o varios sitios. Este programa pertenece a la Librería de Programas Dendrocronológicos de la Universidad de Arizona (DPL) (Holmes, 1994).



Figura 4.15 Equipo Velmex utilizado para la medición de anillos totales de las seis muestras

Una vez obtenida la correlación, si esta es superior a 0.32 se contempla que tiene niveles de confianza de 99% en el fechado de los anillos de las muestras, si se tiene una correlación menor, se vuelve necesario rectificar el fechado y medición de las muestras. Se utilizó el programa ARSTAN para estandarizar la serie de medición de ancho de anillos de crecimiento y remover las tendencias biológicas a la competencia (variación de ancho en función del lado del árbol), supresión de anillos o incremento en ciertas zonas del fuste.

#### 4.3.4.2 Preparación de muestras de anillos para análisis

Una vez que las tres muestras de cada árbol fueron seleccionadas y fechadas acorde al procedimiento descrito previamente, los dos núcleos restantes que habían sido seleccionados para el análisis (uno de cada árbol) y que habían sido también cofechados con los demás se cortaron con una navaja de acero inoxidable anteriormente lavada con agua desionizada para evitar alguna contaminación. La muestra se cortó lo más fino posible y se trituró con ayuda de un mortero de ágata, como se puede observar en la figura 4.16.

Previamente, se realizaron algunas pruebas con los núcleos incompletos (secado, digestión y análisis con el mismo método) y se determinó que el peso mínimo de materia analizable era de 0.2g de madera seca. Debido al crecimiento irregular de los anillos, la variación en su tamaño no permitió que en todos los análisis fuera exactamente de una muestra por anillo/año, de esta forma los 0.2g pudieron representar un valor de uno hasta más de diez anillos o años porque en ocasiones los anillos eran muy delgados.

Se utilizaron bolsas plásticas previamente etiquetadas y pesadas para guardar la muestra. Cabe mencionar que para evitar contaminación, tanto el cuchillo como el mortero, eran constantemente lavados con agua ro y desionizada.

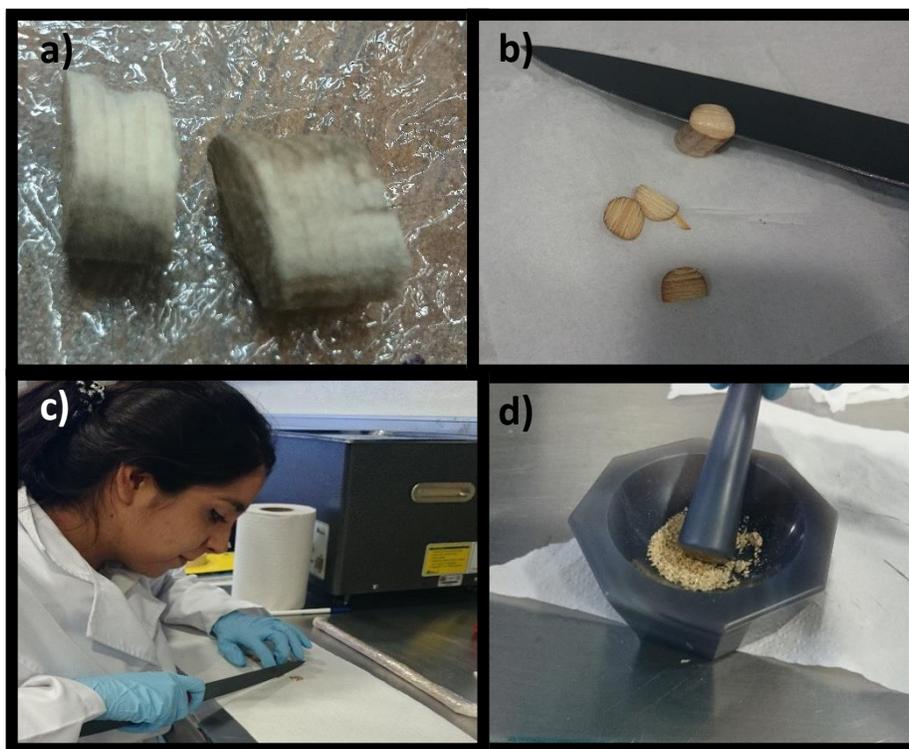


Figura 4.16 Proceso de obtención de muestra antes de la digestión.

En la Figura 4.16 se observa en a) cortes realizados acorde a los anillos y al peso de la muestra, b) cuchillo de acero inoxidable utilizado para cortar las muestras; c) corte fino de las muestras y d) triturado de muestras con mortero de ágata.

La digestión ácida se llevó a cabo en vasos de Alta Presión de Teflón (XP-1500) por el microondas Xpress Microwave con el método modificado de Morton-Bermea et al (2015) en cual se utilizó 0.2g de muestra en lugar de 0.5g, 1.2ml de peróxido de hidrogeno ( $H_2O_2$ ) en lugar de 3ml, y 4mL de ácido nítrico ( $HNO_3$ ) Instra CAT 9598-34, el cual es utilizado para análisis de metales traza, en lugar de 10mL. A su vez, se fortificó una muestra duplicada en cada digestión con 250 $\mu$  de solución estándar QCS-26 High Purity con concentración de 100ppm. No se utilizó un material de referencia debido a que no se encontró un material certificado en madera que tuviera la misma estructura fibrosa (compuesta por celulosa, hemicelulosa y lignina) y que pudiera ser utilizado bajo las mismas condiciones para la digestión (Cuervo et al, 2009). Para resolver este punto, Duffau *et al.* (2010), nos menciona que la

recuperación se puede obtener de una muestra fortificada, así como el sesgo, que se define como la diferencia entre la expectativa relativa a los resultados de una medición y el valor verdadero, puede ser determinado por un material de referencia, un material fortificado, material control, entre otros. Esto nos permite asumir que es posible usar la solución QCS-26 desde la predigestión para poder detectar las posibles interferencias de matriz en los elementos de interés y la fortificación como método de veracidad que hace referencia al grado de concordancia entre el valor medio de una serie de resultados y a un valor verdadero. Además del hecho de que para la curva de calibración se usó el estándar EPA 200.7 mencionado anteriormente por lo que se buscó otra solución estándar de marca diferente. Con esto se podría asumir que los analitos reportados de las muestras no fortificadas podrían ser aceptados como valores cercanos a reales.

El método de digestión que se utilizó en el microondas fue el de Madera-TM, el cual consta de tres etapas, dos rampas y el enfriamiento. La primera de 25 min buscaba alcanzar una temperatura de 200°C, la segunda mantener una temperatura de 180°C y posteriormente una etapa de enfriamiento. Ver Anexo I.

En la figura 4.17 se observa como las muestras digeridas fueron filtradas, pesadas y se aforaron a 40mL con agua desionizada para poder introducir las al ICP-OES Thermo Scientific iCap 6000 (Figura 4.3). Este aforo permitió mantener las muestras acidificadas en un 8%, lo que permitió que fuera aceptable para las condiciones del equipo que establece que las muestras deben estar entre 2 y 6% de acidez para mantenerlo en buenas condiciones y que tenga mayor durabilidad.

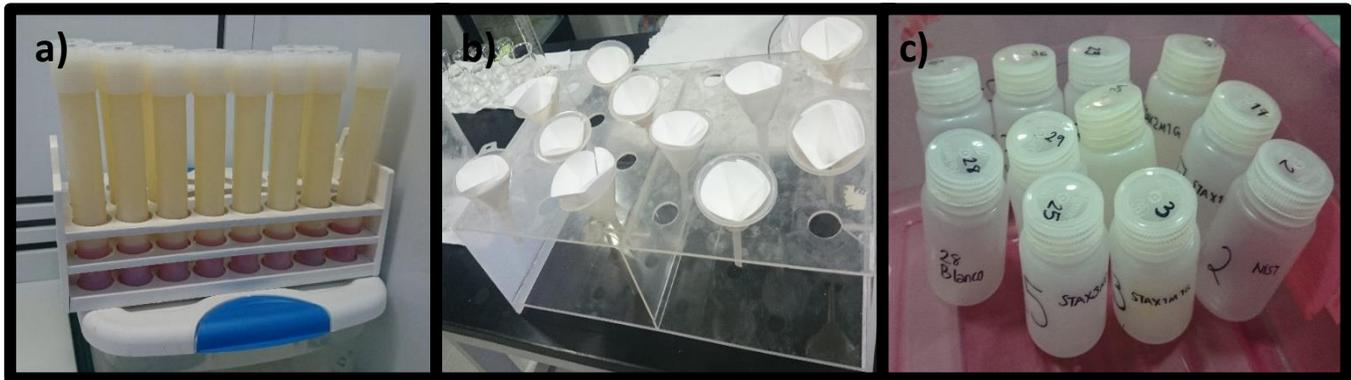


Figura 4.17 a) Vasos de teflón con muestra ya digerida; b) Filtrado de muestra con embudos y filtros; c) Frascos previamente etiquetados y pesados con muestra.

#### 4.3.4.3 Análisis de anillos por ICP-OES

Una vez que se tuvo la muestra en los frascos se necesitó refrigerarla a 4°C hasta el día del análisis, en la que tuvieron que sacarse del refrigerador unas horas antes para que estuviera a temperatura ambiente.

Antes de llevar a cabo las mediciones en el equipo, se verificó el estándar interno (Ytrio), se prende la antorcha de gas argón pureza 99.998% y lleva a cabo la curva de calibración.

Se llevaron a cabo dos curvas de calibración para valorar la eficiencia del equipo antes de medir las muestras. Se utilizó Ytrio como estándar interno, la solución de lavado fue HNO<sub>3</sub> al 2% y se utilizó gas argón con pureza del 99.998%. Para la primera curva se utilizaron seis puntos con concentraciones desde 0.005mg/L hasta 10mg/L del estándar EPA Method 200.7 Calibration Standard 5 de la marca High-Purity Standards, de la EPA 200.7 y la segunda a la que nombraremos multi, se prepara a partir de estándares monoelementales de Ca, Na, K, Mg de marca inorganic ventures y concentración de 1000µg/L, además de azufre de marca High Purity Standards con los cuales también se preparan 6 puntos con concentraciones que van desde los 0.05mg/L hasta los 100mg/L, estas curvas son las mismas que se prepararon para los suelos.

Cuando se analizó la curva de calibración, se dió inicio al análisis de muestras. El núcleo analizado químicamente del sitio de Barranca de Amealco mostró tener siete años más que el núcleo fechado con más anillos del mismo sitio, por lo que se tuvieron datos dendroquímicos de años que no aparecen en la cronología desarrollada.

Por medio del ICP-OES se obtuvo un barrido de 33 elementos de ambos núcleos los cuales corresponden a Ag, Al, As, B, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, S, Sb, Se, Si, Sn, Sr, Tl, V, Zn e Y. De los cuales se utilizó la solución estándar QCS-26 mencionado anteriormente con el cual podría asumirse una posible recuperación de algunos elementos. Cabe mencionar que esta solución estándar cuenta con una concentración de 50ppm para el Si y 100ppm para estos 25 elementos, Ag, Al, As, B, Ba, Be, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, Sb, Se, Si, Tl, Ti, V, Zn.

De los elementos anteriores, únicamente se podría asumir una posible recuperación con un porcentaje entre 75% y el 125% el Al, As, B, Ba, Be, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, Pb, Sb, Se, Si, Tl, V y Zn como se puede observar en la tabla 4.4.

Tabla 4.4 Porcentajes de recuperación

<b>Elemento</b>	<b>% de Recuperación</b>
Al	93%
As	97%
B	86%
Ba	98%
Be	92%
Ca	98%
Cd	92%
Co	94%
Cr	104%
Cu	97%
Fe	107%
Mg	105%
Mn	98%
Mo	105%
Na	97%
Ni	102%
Pb	90%
Sb	97%
Se	95%
Si	90%
Tl	97%
V	99%
Zn	99%

Este porcentaje de recuperación se obtuvo al restar de cada muestra fortificada la concentración de la réplica sin fortificar y posteriormente dividiéndola con la

concentración obtenida (mediante la fórmula de concentración/volumen despejada en  $c_2 = c_1 \cdot v_1 / v_2$  en la que se considera la concentración del estándar de 100mg/L, el volumen añadido de 0.250ml entre el volumen del aforo, el cual fue de 40ml. Cabe mencionar que el Si fue el único elemento que tenía 50ppm, por lo que se calculó con esa concentración.

Algunas muestras contenían los elementos mencionados anteriormente, pero su concentración estaba por debajo de los límites de cuantificación, lo que indica que el equipo pudo leer que el elemento estaba presente en la muestra pero era tan pequeña la concentración que no pudo cuantificarla. De esta forma, de los elementos recuperados sólo 18 elementos pasaron los límites de detección y cuantificación del instrumento y del método para el sitio de Calesa y 17 elementos para el sitio de Barranca de Amealco. Estos elementos son Al, As, B, Ba, Be, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, Pb, Si, V y Zn. Se establecieron límites de detección y de cuantificación del método, los cuales son estos valores multiplicados por el factor de dilución (200). Este factor de dilución fue obtenido dividiendo el valor del aforo de la muestra (Litros) entre el peso de la muestra (Kilogramos) En la tabla 4.5 se muestran los límites para cada elemento.

Tabla 4.5 Límites de detección y cuantificación del instrumento y del método para cada elemento

<b>Elemento</b>	<b>L.D. (mg/L)</b>	<b>L.C. (mg/L)</b>	<b>L.D.M. (mg/Kg)</b>	<b>L.C.M. (mg/Kg)</b>
Al	0.0137	0.0457	2.7400	9.1333
As	0.0081	0.0270	1.6200	5.4000
B	0.0013	0.0043	0.2600	0.8667
Ba	0.0003	0.0010	0.0600	0.2000
Be	0.0001	0.0003	0.0200	0.0667
Ca	0.1530	0.5100	30.6000	102.0000
Cd	0.0002	0.0007	0.0400	0.1333
Cr	0.0008	0.0027	0.1600	0.5333
Cu	0.0014	0.0047	0.2800	0.9333
Fe	0.0009	0.0030	0.1800	0.6000
Mg	0.0040	0.0133	0.8000	2.6667
Mn	0.0002	0.0007	0.0400	0.1333
Mo	0.0015	0.0050	0.3000	1.0000
Na	0.1028	0.3427	20.5600	68.5333
Ni	0.0007	0.0023	0.1400	0.4667
Pb	0.0036	0.0120	0.7200	2.4000
Si	0.0026	0.0087	0.5200	1.7333
V	0.0004	0.0013	0.0800	0.2667
Zn	0.0003	0.0010	0.0600	0.2000

Una vez establecidos los límites de detección, se obtuvieron las concentraciones elementales de los núcleos. Se analizaron 109 muestras en total, de las cuales siete fueron duplicadas para realizar las fortificaciones, estos duplicados corresponden en su mayoría a anillos muy anchos. Estas muestras son correspondientes 52 del primer núcleo (Barranca de Amealco) y 54 del segundo núcleo (Calesa).

## Capítulo 5

### RESULTADOS

En este apartado, se presentan los datos obtenidos de los análisis de elementos mayores y traza en núcleos de anillos de crecimiento de la especie estudiada (*Taxodium mucronatum Ten*) así como los análisis de suelo y agua de su entorno para su correlación.

#### 5.1 Caracterización físico-química de los suelos en Calesa y Barranca de Amealco

Se obtuvieron tres muestras de suelos, dos pertenecientes al sitio de Barranca de Amealco (Stax1M1G y Stax2M1G) y otro al sitio de Calesa (Stax3M1C).

Los suelos pertenecientes al sitio de Barranca de Amealco muestran un color café pardo, cuyo contenido de humedad varía de 1.3 hasta 3.4% (tabla 5.2). Por su composición y textura fueron clasificados de suelo areno-limoso a arenoso con bajo contenido de arcilla. Para la clasificación de textura se utilizaron las muestras de suelo secas, las cuales se tamizaron en cinco mallas de cribado con las siguientes medidas: malla 10 (2mm), 18 (1.15mm), 40 (0.42mm), 80 (0.175mm), 200 (0.074mm). Una vez separada la parte fina se observó la muestra de suelo en seco y se separó una parte a la que se le adicionó agua para hacerle una prueba de manipulación, que consistió en formar una bola, si esto no era posible es indicativo de arena y si mantenía cohesión, se debía formar un cilindro, si no se mantenía es franco arenoso, si prosigue hasta lograr 15cm se debe doblar hasta formar un semicírculo, sino es posible esto es indicativo de suelo franco, si puede formar un círculo cerrado y no se agrieta es arcilla, si se agrieta es arcilla ligera y si no puede formar este círculo es franco pesado.

El suelo de Calesa, la muestra presenta un color café oscuro, con un porcentaje de humedad de 1.9% (tabla 5.1) y es clasificado como franco arenoso, con contenido de limo y poca arcilla.

Tabla 5.1 Porcentaje de humedad y clasificación de las muestras de suelo

<b>Muestra</b>	<b>% Humedad en suelo</b>	<b>Clasificación</b>
STAX1M1G	3.4%	Areno –limoso
STAX2M1G	1.3%	Arenoso
STAX3M1C	1.9%	Franco arenoso

Para las tres muestras de suelos, se analizaron 32 elementos con el equipo ICP-OES, obteniendo así un posible porcentaje de recuperación (entre 75% y el 125%) únicamente de los 20 elementos siguientes: As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Na, Ni, Pb, Sb, Se, Ti, Tl, V y Zn. De estos 20 elementos que presentaron un porcentaje de recuperación confiable solamente 11 elementos presentan una concentración arriba del límite de detección (L.D.) y cuantificación (L.C.), los cuales son el B, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, V y Zn y se observan en la tabla 5.2 con su respectivo L.D., L.C. y porcentaje de recuperación. A su vez, en la figura 5.1 se observa la gráfica de las concentraciones de los 11 elementos en ambos sitios.

En la figura 5.1 se pueden observar que los patrones de las concentraciones elementales son similares en las tres muestras, a excepción del comportamiento del Cu la muestra Stax1M1G en Barranca de Amealco. En la figura 5.2 se presentan los valores de concentraciones elementales obtenidos comparados a los valores máximos permitidos por la norma de suelo NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 que establece los criterios para determinar concentraciones de suelos contaminados para Ba, Cd, Cr (VI), Ni, Pb, Tl y V. Se puede observar que de los tres suelos ninguno de los elementos analizados presenta una concentración superior a los valores de concentración indicado por la Norma para suelos (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004).

Tabla 5.2. Concentración en mg/kg de los elementos analizados en los suelos de Barranca de Amealco y Calesa por el equipo de ICP-OES con sus respectivos límites de detección, cuantificación y porcentajes de recuperación.

Elementos (mg/kg)	B	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	V	Zn
<b>STAX1M1G</b> Barranca de Amealco	13.258	110.006	3.131	9.017	13.289	67.384	275.22 9	4.459	10.716	53.997	46.127
<b>STAX2M1G</b> Barranca de Amealco	12.434	126.274	2.902	8.882	13.085	6.129	291.03 7	5.304	10.308	43.509	40.607
<b>STAX3M1C</b> Calesa	14.547	156.067	2.317	8.472	15.942	8.7998 2	278.77 9	4.842	15.918	47.279	58.289
<b>L.D.</b>	0.0008	0.0041	0.0003	0.0005	0.0008	0.001	0.0001	0.0005	0.0029	0.0002	0.0004
<b>L.C.</b>	0.0027	0.0137	0.001	0.0016	0.0026	0.0033	0.0003	0.0017	0.0097	0.0007	0.0013
<b>% Recuperación NIST2710a</b>		51	<b>95</b>	<b>85</b>	45	69	56				69
<b>% Recuperación QCS-26</b>	<b>100</b>	<b>116</b>	<b>104</b>	<b>113</b>	<b>101</b>	<b>120</b>	<b>91</b>	<b>101</b>	<b>97</b>	<b>105</b>	<b>118</b>

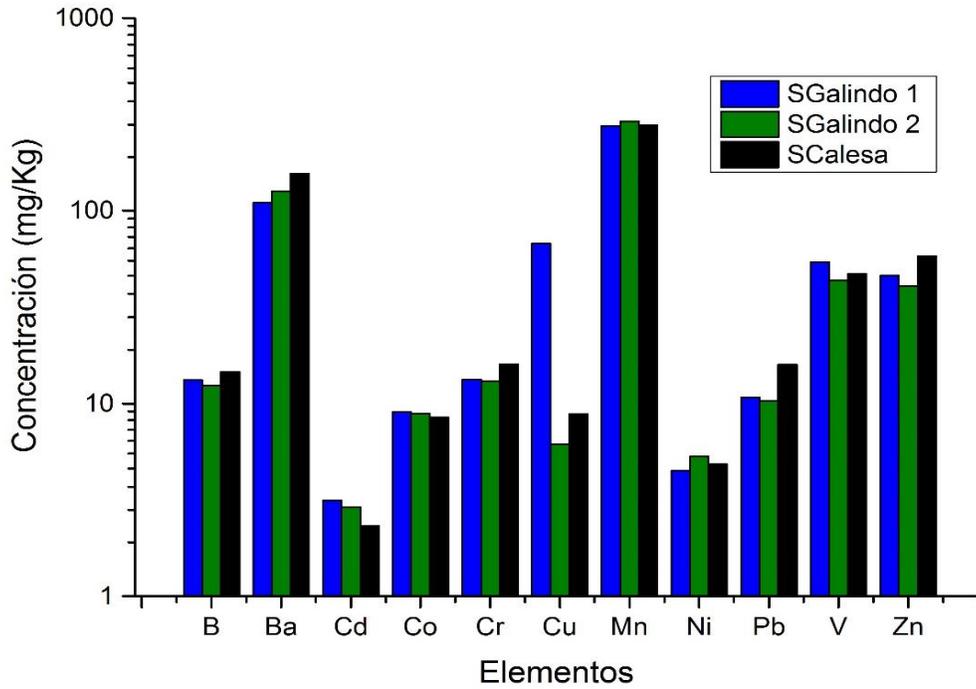


Figura 5.1 Concentración en mg/kg de los elementos analizados en los suelos de Barranca de Amealco y Calesa

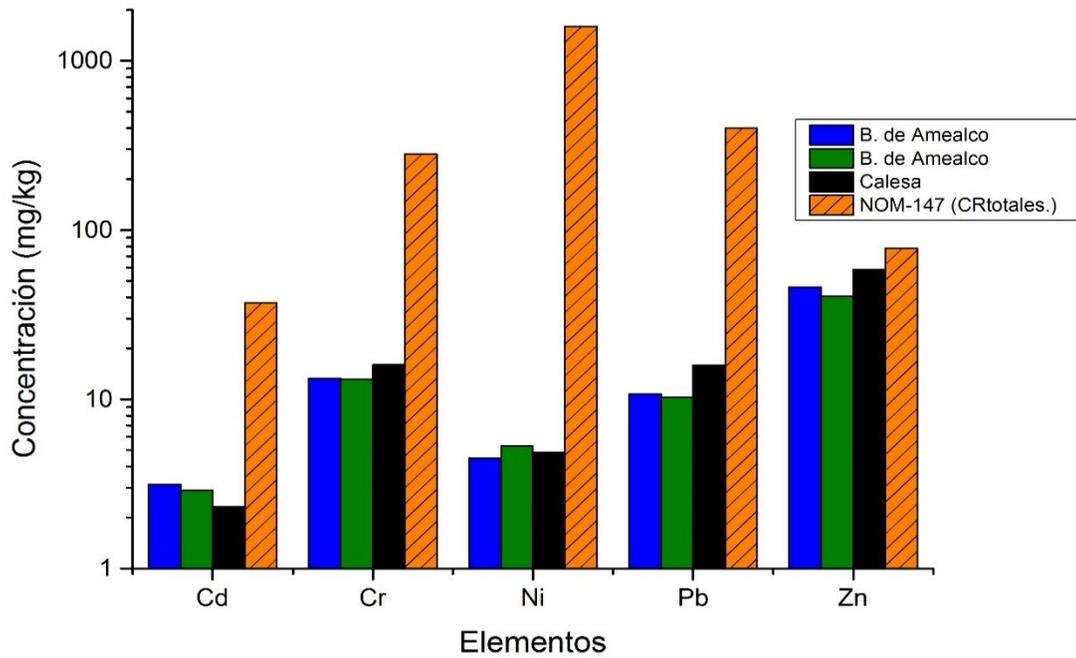


Figura 5.2 Concentración en mg/kg de muestras de suelos de ambos sitios de estudio comparada con la Norma Oficial Mexicana (NOM-047).

Los suelos recolectados en ambos sitios de estudio no presentan rasgos de contaminación inorgánica de relevancia. Además, es importante mencionar que presentan una composición química (digestión total) comparable en ambos sitios. No es posible descartar que algunos de los elementos presentes en los suelos puedan ser asimilables por el árbol debido a su disponibilidad, forma química (cationes, oxianiones, organocomplejos, etc) y condiciones del suelo (pH, contenido de agua).

## 5.2 Caracterización físico-química del agua en Calesa y Barranca de Amealco

Debido a que los árboles de la especie *Taxodium mucronatum* Ten son riparios, la composición química inorgánica de sus anillos de crecimiento puede correlacionarse directamente con la composición del agua de los ríos donde crece. Para tener una visión más completa del rango de la variación de concentración elemental de los ríos donde crecen los árboles estudiados, se realizó un muestreo en dos etapas, una en temporada seca (14 de febrero del 2015) y otra en temporada de lluvia (10 de junio).

En las muestras de agua de ríos se analizaron 29 elementos (ICP-OES). Los 29 elementos analizados tuvieron un porcentaje de recuperación entre el 90% y el 110%. De estos 29 elementos solamente los elementos siguientes: As, Ba, Be, Ca, Co, Cu, Fe, Li, Mg, Mn, Na, Ni, S, Si, Sr, V y Zn, tuvieron una concentración mayor al Límite de Cuantificación (L.C.) Estos serán los únicos elementos reportados y discutidos en las tablas 5.3 y 5.4.

Tabla 5.3. Límites de detección y cuantificación del instrumento y del método para cada elemento

<b>Elemento</b>	<b>Línea (ICP-OES)</b>	<b>L.D. (mg/L)</b>	<b>L.C. (mg/L)</b>	<b>L.D.M. (mg/Kg)</b>	<b>L.C.M. (mg/Kg)</b>
Al	3944	0.0137	0.0457	2.7400	9.1333
As	1937	0.0081	0.0270	1.6200	5.4000
B	2497	0.0013	0.0043	0.2600	0.8667
Ba	2335	0.0003	0.0010	0.0600	0.2000
Be	2348	0.0001	0.0003	0.0200	0.0667
Ca	3158	0.1530	0.5100	30.6000	102.0000
Cd	2144	0.0002	0.0007	0.0400	0.1333
Cr	2055	0.0008	0.0027	0.1600	0.5333
Cu	3247	0.0014	0.0047	0.2800	0.9333
Fe	2382	0.0009	0.0030	0.1800	0.6000
Mg	2795	0.0040	0.0133	0.8000	2.6667
Mn	2576	0.0002	0.0007	0.0400	0.1333
Mo	2020	0.0015	0.0050	0.3000	1.0000
Na	3302	0.1028	0.3427	20.5600	68.5333
Ni	2216	0.0007	0.0023	0.1400	0.4667
Pb	2203	0.0036	0.0120	0.7200	2.4000
Si	2516	0.0026	0.0087	0.5200	1.7333
V	3093	0.0004	0.0013	0.0800	0.2667
Zn	2138	0.0003	0.0010	0.0600	0.2000

Tabla 5.4. Concentración elemental del agua en temporada seca y de lluvia de Barranca de Amealco y Calesa

Elementos	Temporada seca Concentración (mg/L)		Temporada de lluvia (mg/L)	
	Barranca de Amealco	Calesa	Barranca de Amealco	Calesa
As	<l.d.	0.018	<l.d.	<l.d.
Al	<l.d.	<l.d.	2.063	0.059
B	<l.d.	<l.d.	0.011	0.313
Ba	0.057	0.063	0.063	0.053
Be	0.0003	0.0003	0.0006	0.0006
Ca	8.293	38.76	8.9	43.09
Co	<l.d.	0.0025	<l.d.	0.002
Cu	<l.d.	0.003	0.004	0.019
Fe	0.228	0.087	1.06	0.06
K	4.561	50.5	4.82	66.34
Li	<l.d.	0.061	<l.d.	0.133
Mg	3.766	12.09	2.43	12.46
Mn	<l.d.	0.191	0.0047	0.1659
Na	11.5	106.7	10.46	167.2
Ni	0.003	0.018	<l.d.	0.0093
P	<l.d.	<l.d.	0.02	11.07
S	2.796	28.5	2.42	30.06
Si	14.79	17.26	16.12	26.62
Sr	0.099	0.211	0.096	0.207
V	0.004	0.019	0.003	0.009
Zn	0.003	0.499	0.018	0.196

Nota: "<l.d.": representa que la concentración está por debajo del límite de detección

En la Figura 5.3 se observa que ambos sitios presentan el mismo patrón de concentración elemental. El sitio de Calesa presenta concentraciones generalmente más altas que las de Barranca de Amealco en particular en metales de transición (As, Co, Cu, Mn, Zn) y Li.

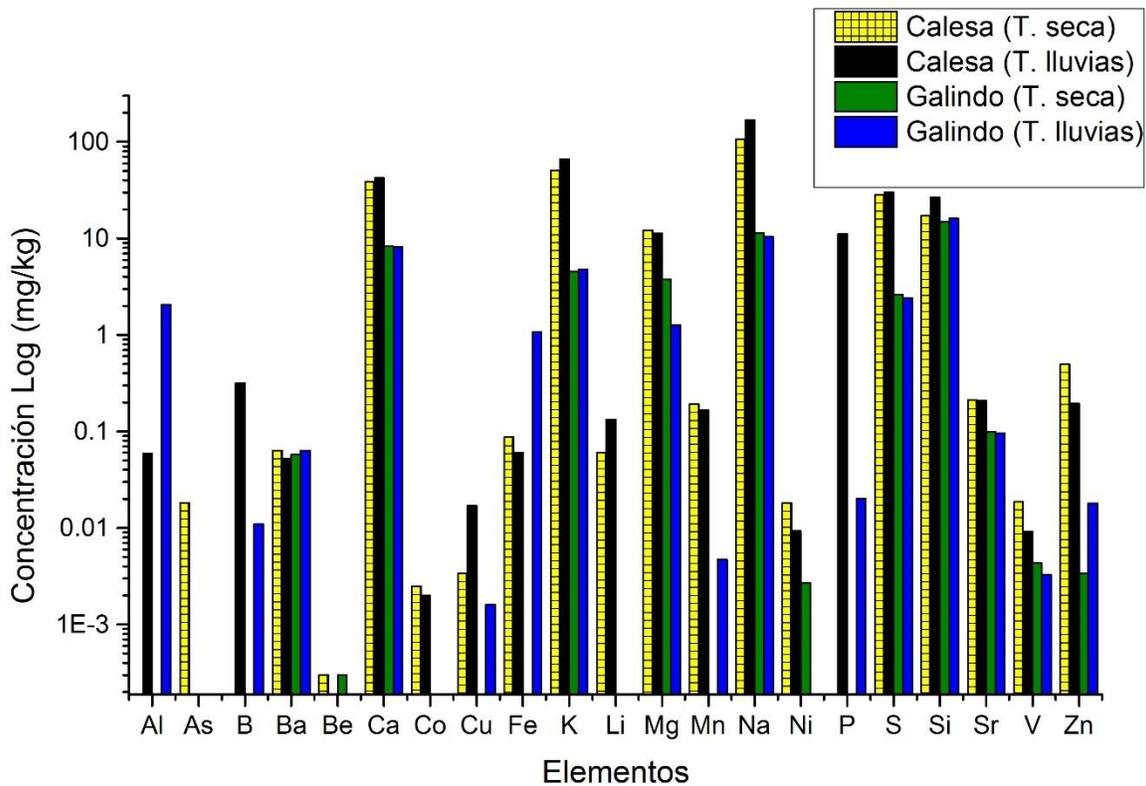


Figura 5.3 Concentraciones en mg/L con eje vertical en escala logarítmica de elementos mayores y trazas obtenidas de las muestras de agua de los ríos de ambos sitios en temporada seca y de lluvias en ambos sitios de estudios.

Los resultados obtenidos para la temporada de lluvia presentan concentraciones más altas para los elementos siguientes: Al, B, Cu, Si, Sr, Zn, V, S, y Li. Esta variación se puede relacionar con un mayor grado de erosión de los suelos alrededor y por consecuencia un incremento en partículas en suspensión, así como la lixiviación y barrido de ciertos nutrientes como el B, Cu y el Zn usados para actividades agrícolas en el sitio de Barranca de Amealco. Dicho proceso parece más

eficiente para aumentar las concentraciones iónicas en el agua de los ríos que la evaporación durante la temporada seca para algunos elementos.

En las tablas 5.5 y 5.6. se presentan las concentraciones de aniones determinadas en muestras de agua de ambos sitios de estudio en temporada seca y de lluvias.

Tabla 5.5. Concentraciones en mg/L de aniones en temporada seca y de lluvias en ambos sitios.

Elementos	Temporada seca		Temporada de lluvia	
	Concentración (mg/L)		(mg/L)	
	Barranca de Amealco	Calesa	Barranca de Amealco	Calesa
F <sup>-</sup>	0.22	1.38	0.23	2.11
Cl <sup>-</sup>	2.5	88.7	3.39	77.48
Br <sup>-</sup>	>l.c.	0.09	<l.c.	<l.c.
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.1	1.44	0.44	12.33
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	>l.c.	37.92	<l.c.	38.4
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	7.98	83.2	5.79	53.73

A la par de los resultados obtenidos en cationes, el agua de Rio Querétaro del sitio de Calesa presenta mayor concentración en aniones que el agua de la corriente tributaria del sitio de Barranca de Amealco. Así, su concentración generalmente crece durante la temporada de lluvia en ambos ríos como se observa en la figura 5.4.

El incremento significativo de los nitratos en el Rio Querétaro en Calesa sugiere un arrastre importante de productos como fertilizantes aunque podrían estar más relacionados con cultivos de traspatio o jardines por la zona urbana que por actividades meramente agrícolas en las cercanías. La concentración generalmente más alta en el Rio Querétaro comparada al Rio Barranca de Amealco se puede relacionar con la amplitud de la cuenca de drenaje, siendo mucho más amplio en el caso de Calesa. Así como la distancia entre el límite de la cuenca de drenaje y el punto de muestreo, que nuevamente es más largo en el caso de Calesa. Por lo cual

el Rio Querétaro presenta aguas más evolucionadas, las cuales tienen mayor tiempo de interacción con gran variedad de roca. Aun siendo en zona urbana, el rio Calesa está fuertemente influenciado por las interacciones de agua/roca/suelo de las áreas de cultivo en la parte superior de la cuenca de drenaje. El impacto es de hecho mayor en el sitio de Calesa que en el de Barranca de Amealco, el cual se encuentra en área agrícola. No obstante, ningún elemento analizado sobrepasa las concentraciones máximas precisadas en la NOM-001-SEMARNAT-1996 que menciona límites máximos permisibles para metales pesados y cianuros de suelo agrícola y humedales naturales (figura 5.5).

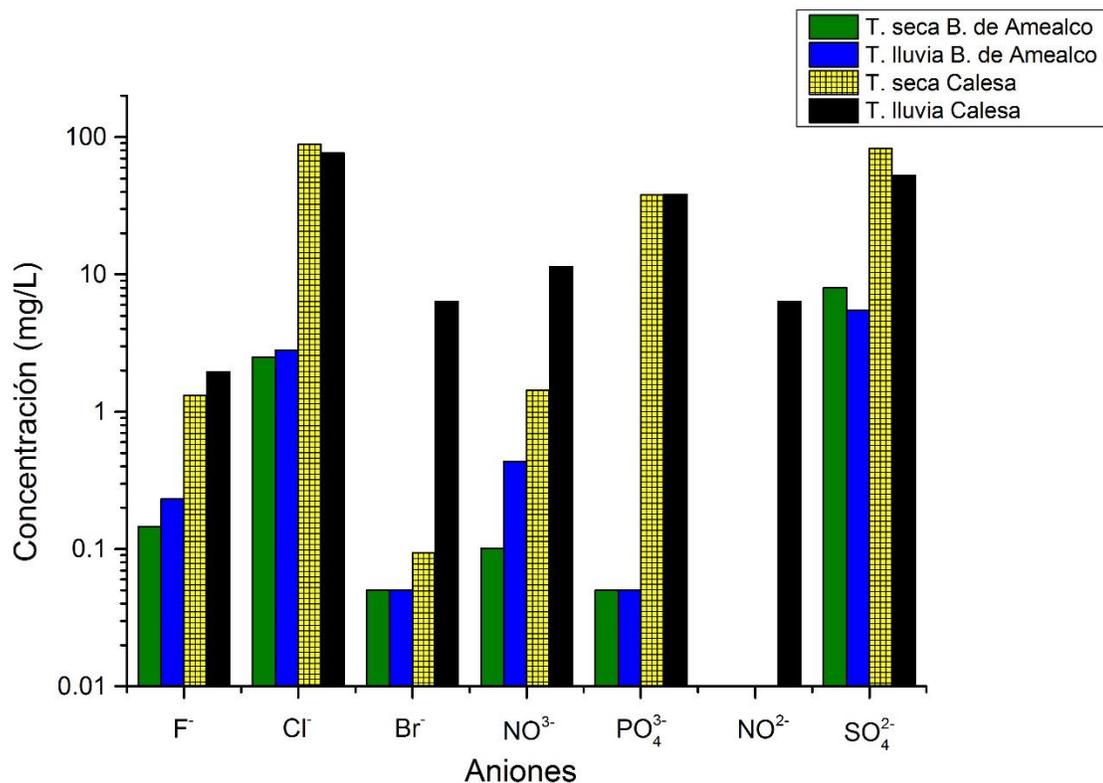


Figura 5.4. Concentraciones en mg/L con el eje vertical en escala logarítmica de aniones antes y durante la temporada de lluvias en ambos sitios.

Los aniones de F<sup>-</sup>, Br<sup>-</sup> y NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en Calesa y F<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup> y NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en Barranca de Amealco tuvieron una concentración mayor durante lluvias. El Br<sup>-</sup> en Calesa y el PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> en

Barranca se mantuvieron y el  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  en Calesa y  $\text{SO}_2^{4-}$  en Barranca disminuyeron su concentración durante lluvias.

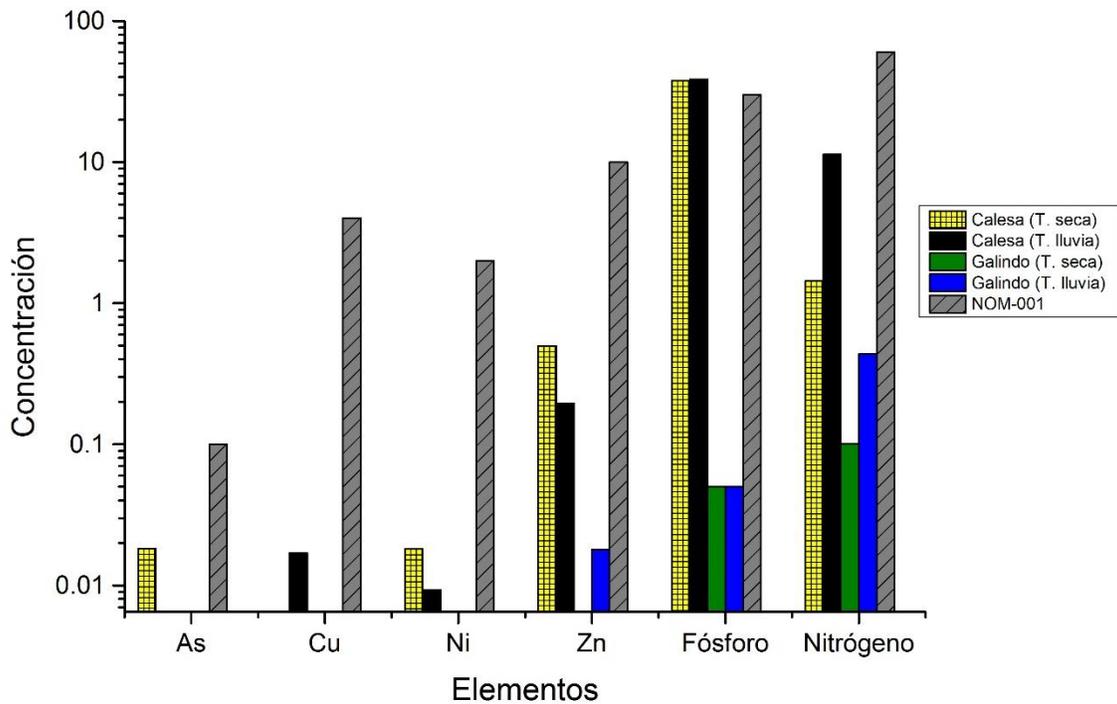


Figura 5.5. Norma Oficial Mexicana y muestras de agua de ambos sitios de estudio, antes y después de la temporada de lluvias.

En la gráfica se muestra que las concentraciones máximas de la NOM-001-SEMARNAT-1996 están por encima de las concentraciones de los elementos analizados en todas las muestras, con excepción del fósforo en el sitio de Calesa.

*Es posible considerar que el agua del Rio Querétaro en el sitio de Calesa tiene más elementos inorgánicos disponibles para su posible asimilación por *Taxodium mucrostanum* Ten. Algunos elementos como el B, Cu, Fe, Mn y Zn son nutrientes importantes para la especie y podrían tener alguna relación con su crecimiento.*

*Las aguas analizadas en ambos sitios no superan los valores de la NOM-001-SEMARNAT-1996 a excepción del fosforo en Calesa, el cual puede provenir de los agroquímicos (fertilizantes y pesticidas) de las zonas agrícolas que se encuentran en la parte superior de la cuenca y/o los fertilizantes que se emplean en la colonia.*

*Las aguas del río Querétaro en el sitio de Calesa presentan concentraciones más altas en aniones y cationes que el agua de la corriente tributaria del sitio de Barranca de Amealco. En ambos sitios la mayoría de las concentraciones crecen significativamente durante la temporada de lluvia.*

### 5.3. Dendrocronología de núcleos

De los tres núcleos medidos de Barranca de Amealco, se desarrolló una dendrocronología de extensión parcial de  $253 \pm 15$  años, correspondientes al periodo de 1750 a 2014. De los tres núcleos del sitio de Calesa se obtuvo una cronología de  $86 \pm 2$  años, correspondientes al periodo de 1926 a 2014. Una vez obtenida la edad de los núcleos, se utilizó el programa ARSTAN para estandarizar las muestras de cada sitio y obtener el Índice de Ancho de Anillo (IAA).

En la Tabla 5.6 se observan las edades obtenidas de las series fechadas de acuerdo a la metodología mencionada previamente y al programa COFECHA.

Tabla 5.6. Edades obtenidas de las muestras de ambos sitios

Sitio	Muestra	Año inicio	Año último	Años de la serie
<b>Sitio 1. Barranca de Amealco</b>	TAX1M1G	1774	2014	240 años
	TAX1M2G*	1743	2014	271 años
	TAX1M3G	1774	2014	240 años
	TAX1M4G	1750	2014	264 años
<b>Sitio 2. Calesa</b>	TAX3M3C	1931	2014	83 años
	TAX3M5C	1927	2014	87 años
	TAX3M6C	1926	2014	88 años
	TAX3M7C*	1926	2014	88 años

\* Muestras digeridas y analizadas en elementos totales (mayores y totales)

La cronología desarrollada para el sitio de Barranca de Amealco corresponde a las tres muestras analizadas del sitio y se muestra en la figura 5.6.

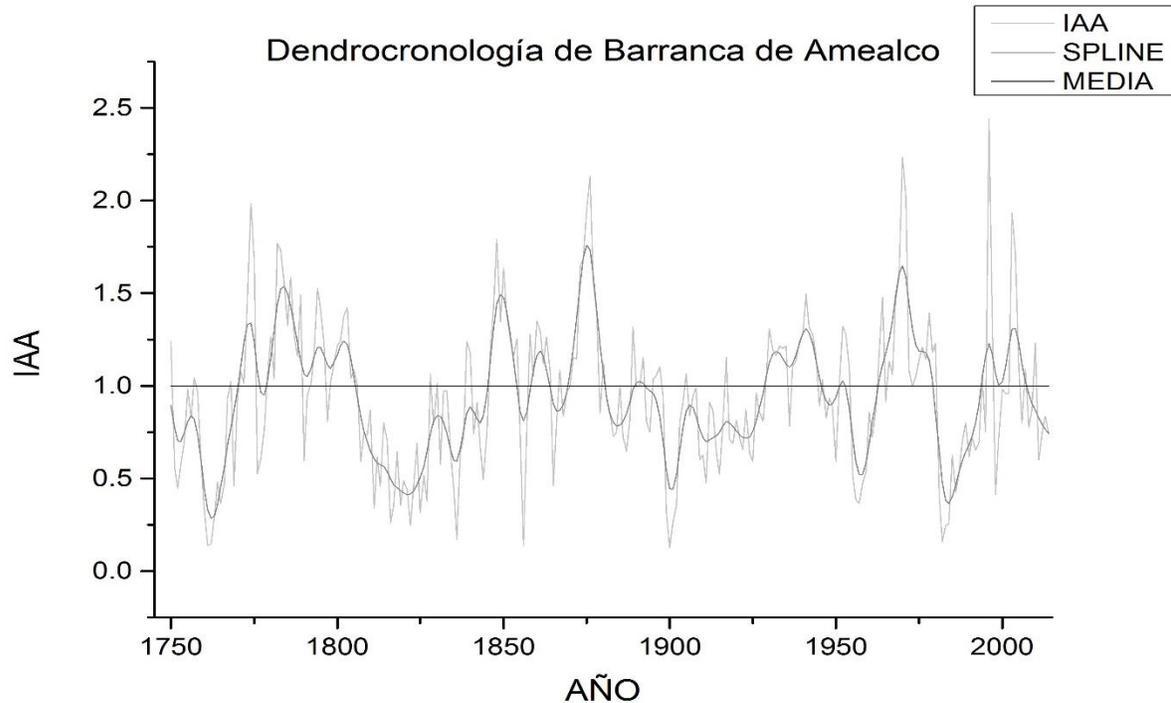


Figura 5.6. ÍAA para el sitio de Barranca de Amealco. Este índice corresponde a las muestras TAX1M1G, TAX1M3G, TAX1M4G analizadas. Spline de 10 años utilizado para resaltar eventos de baja frecuencia como periodos secos y húmedos así como para suavizar eventos de alta frecuencia.

En la Figura 5.6 se muestra la variación de ancho de los anillos de crecimiento (gris claro), el spline que corresponde a un suavizado de 10 años y la media de uno para la estandarización. La cronología estándar muestra un IAA promedio de 0.95 con una desviación estándar de 0.42. En la gráfica se exhiben 8 periodos por encima de la media y 9 periodos por debajo, los cuales están representados en los anillos de menor espesor que corresponden a 1761, 1776, 1856, 1900, 1950, 1982, mientras que los anillos más anchos corresponden a los años 1775, 1876, 1970, 1996 y 2003. El IAA nos muestra un crecimiento estandarizado por lo que al tener periodos por debajo o encima de la media es posible que algunos factores externos puedan influir en el crecimiento, entre ellos están los climáticos, como las sequías, provocando que los anillos sean muy delgados, aparezcan como microanillos o estén ausentes.

Cabe mencionar que se intentaron introducir los datos de las series de crecimiento obtenidos del sitio 1 al programa COFECHA para poder obtener una correlación con la cronología de Barranca de Amealco ya establecido por Stahle y Villanueva, sin embargo no fue posible porque sólo se tenía un árbol y tres núcleos, por lo que se recurrió al archivo de la NOAA (Stahle et al, 2011) llamado mesoamerica donde se menciona el estándar de anillos de crecimiento de árboles del sitio de Barranca de Amealco el cuál se usó junto con el IAA del sitio 1 como se puede observar en la figura 5.7, en la que se muestran periodos similares con índice debajo de la media principalmente entre 1813 y 1839, 1905 y 1912, 1949 y 1953 y 1984 y 1992; también se encuentran puntos por arriba de la media 1794 y 1805, 1843 y 1858, 1961 y 1976.

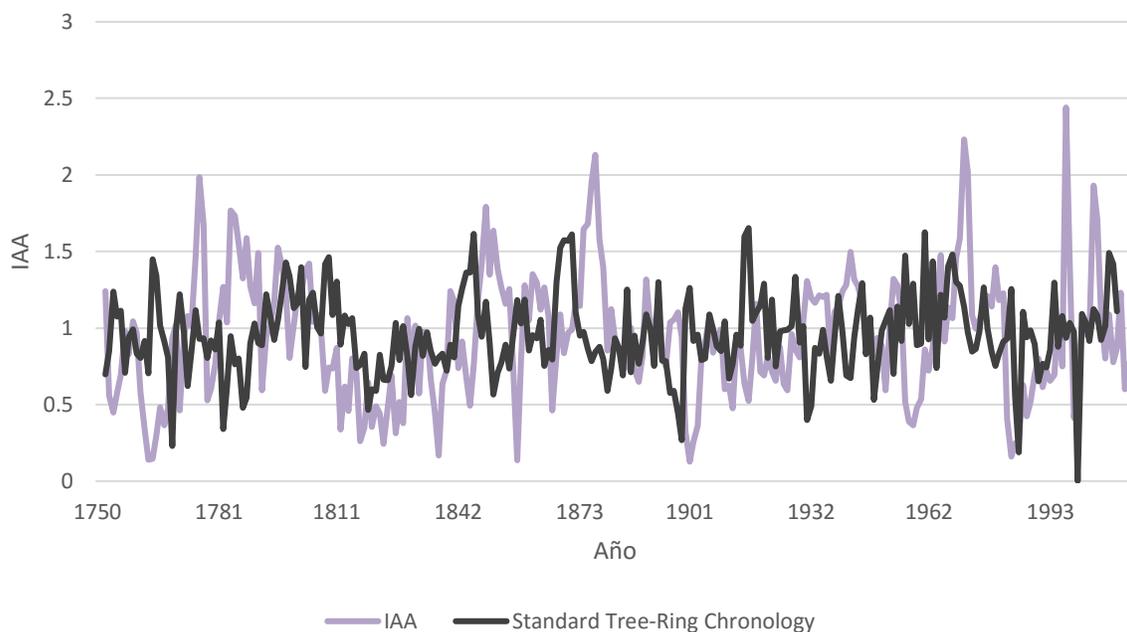


Figura 5.7 Figura comparativa del IAA del sitio 1 y la cronología estándar de anillos de crecimiento de árboles del sitio de Barranca de Amealco de Stahle et al. (2011)

En la figura 5.8 se puede observar IAA de la cronología de Calesa que fueron medidas con el estereoscopio y corresponden a los tres núcleos cofechados.

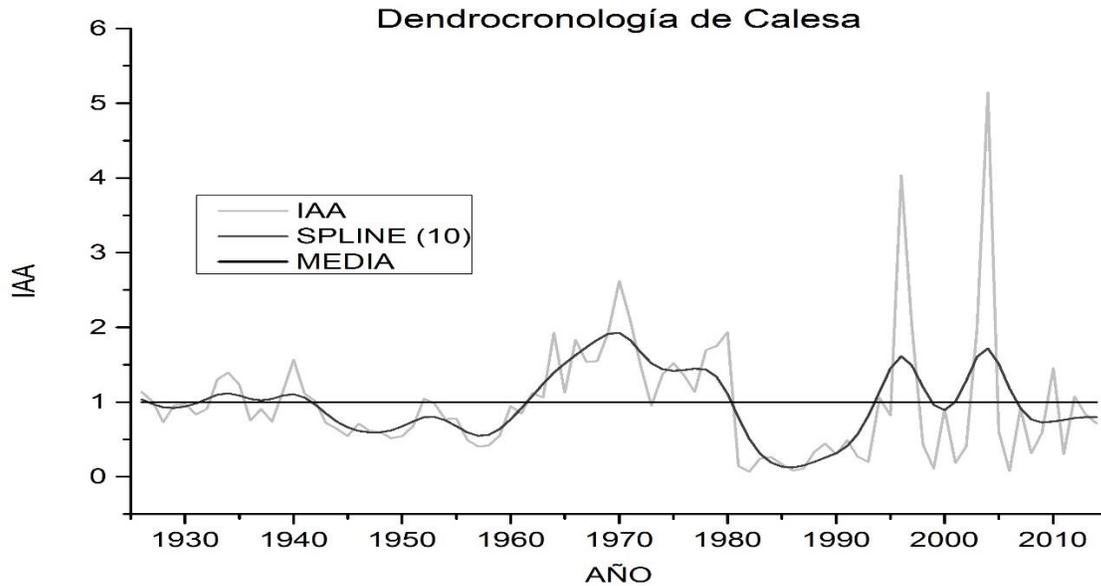


Figura 5.8. ÍAA para el sitio de Calesa, spline de 10 años. Esta cronología corresponde a las muestras TAX3M3C, TAX3M5C y TAX3M6C.

En la figura 5.8 se muestra el índice de ancho de anillo para el sitio de Calesa, en esta se presenta un crecimiento más uniforme. Los años con mayor crecimiento son 1970, 1996 y 2004, mientras que el menor crecimiento corresponde a 1982, 1986, 1993, 1999, 2001, 2006, 2008 y 2011. En esta cronología se muestra un IAA promedio de 0.98 y una desviación estándar de 0.78.

En la figura 5.9 se puede comparar los IAA de ambos sitios de estudio. Se muestran las grandes similitudes en el crecimiento de los anillos de los arboles muestreados en ambos sitios. De manera general se tiene una correlación significativa (0.79) en el crecimiento de anillos en ambos sitios, con periodos más representativos en 1955 a 1972, de 1990 al 2005, esta correlación nos permite asumir que a pesar de las variaciones individuales la especie es sensible a eventos climatológicos regionales y es posiblemente se puede comprobar que la datación se realizó de manera adecuada. De forma particular se observa una disminución brusca en el año 1980, que marca el inicio de una temporada de crecimiento muy limitado entre 1980 y 1995.

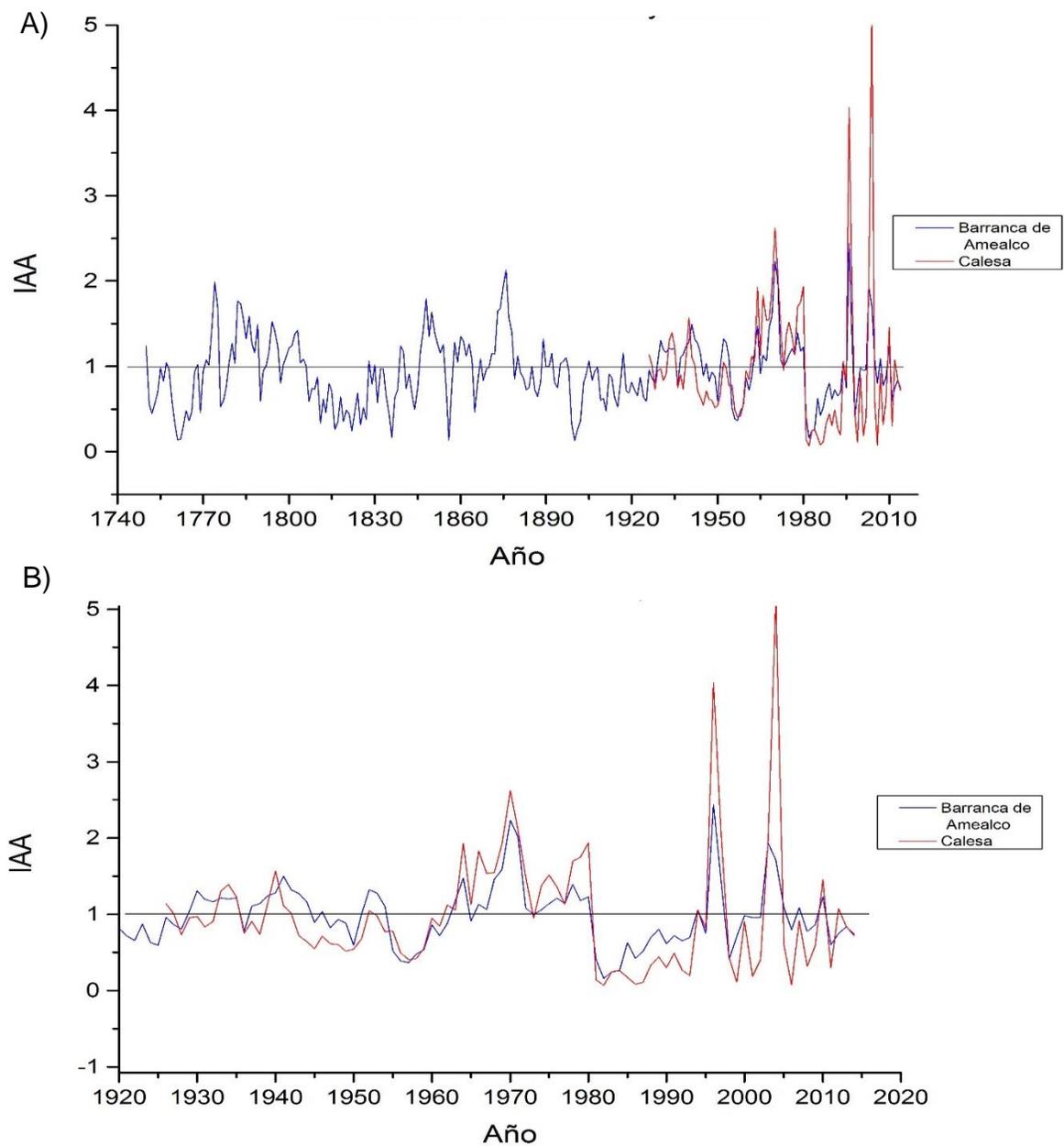


Figura 5.9 Índice de ancho de anillo del sitio de Barranca de Amealco (Azul) y Calesa (Rojo). En A) se tiene la cronología de Barranca de Amealco completa, mientras que en B) se observa la cronología a partir de 1920.

*Las variaciones de IAA observadas en ambos sitios responden a fenómenos regionales comunes, probablemente climáticos. Por lo cual las actividades*

*antropogénicas de cada sitio no parecen afectar considerablemente en el crecimiento local de Taxodium mucronatum Ten.*

#### 5.4 Dendroquímica de núcleos

De las cuatro muestras más completas que se consideraron por cada sitio, se tomó una de cada sitio para llevar a cabo el análisis dendroquímico. Los núcleos pertenecientes a estos análisis corresponden a TAX1M2G para el sitio de Barranca de Amealco y el de TAX3M7C para el de Calesa.

##### 5.4.1 Dendroquímica de núcleos de *Taxodium mucronatum* Ten. de Barranca de Amealco

En la Figura 5.10 se pueden observar los elementos que presentaron una concentración superior al límite de cuantificación en los anillos de crecimiento del *Taxodium mucronatum* Ten de Barranca de Amealco. En este diagrama de caja se tiene la información sobre las concentraciones en mg/kg del primer y tercer cuartil, así como la media y los valores máximos y mínimos. En la gráfica se pueden observar concentraciones altas de elementos que no corresponden a nutrientes esenciales (B, Cu, Fe, Mn y Zn) ni se encuentran como componentes básicos del suelo (Al, Ca, Mg, Na y Si) como el Ba, Be, Cd, Cu, Cr, Mo, Ni y V (Guimaraes, 1982). Fasola et al. (2012) en un estudio llevado a cabo en cortezas de árboles medicinales para investigaciones de metales pesados reporta para la especie *Magnifera indica* una concentración de 22.37mg/kg de Pb, 33.43mg/kg de Zn, 25.35mg/kg de Cu, 0.75 mg/kg de Cd y 12.83 mg/kg de Mn por el método de espectrometría de absorción atómica (AAS). Mientras que en el 2003, Brinder et al.

reportaron una concentración de Pb de 0.021 $\mu$ /g en anillos y hasta 0.4  $\mu$ /g en troncos de muestras de la especie *Picea abies*, determinado por ICP-MS.

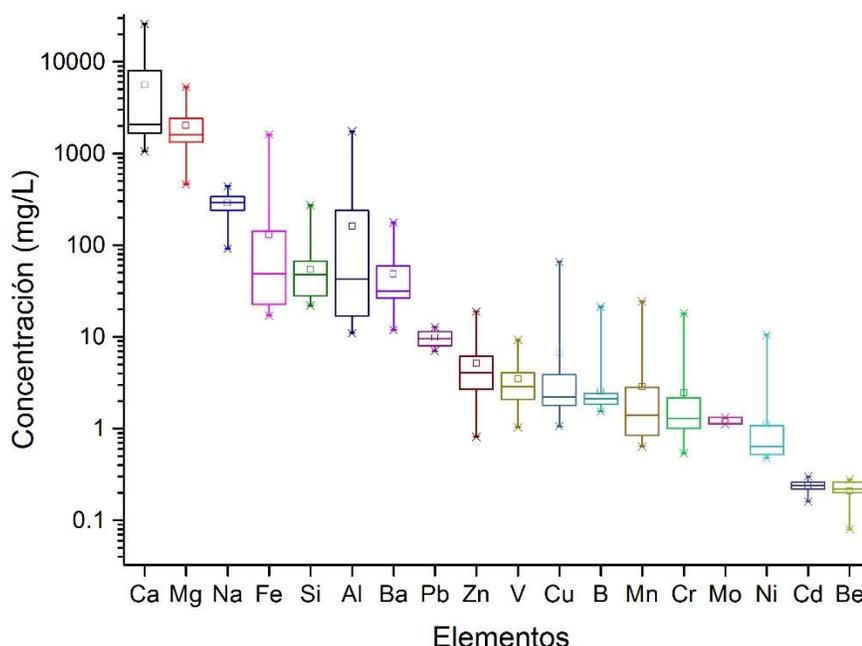


Figura 5.10. Concentraciones de los elementos en el núcleo tomado en Barranca de Amealco ordenado por media de concentración máxima.

Como se puede observar en la Figura 5.10 los resultados obtenidos en este estudio para Cd, Pb y Zn se encuentran dentro del rango de los estudios de Fasola et al. (2012) y Brinder et al. (2003). Sin embargo, las concentraciones en Cu y Mn son superiores a las reportadas en estudios.

En la figura 5.10 se observan los elementos analizados en los núcleos de *Taxodium mucronatum* Ten de Barranca de Amealco por orden de concentración media máxima descendente. Se puede observar una repartición en tres grupos de elementos: los elementos mayores con una concentración media superior a 30 mg/kg (Al, Ba, Ca, Fe, Mg, Na, Si), los metales de transición y B, Pb (no metal y metal respectivamente) con concentraciones medias entre 1 y 10mg/kg (Cu, Cr, Mo, Mn, Ni, V y Zn) y los elementos trazas con una concentración media inferior a 1 mg/kg como Cd y Be (metal de transición y alcalinotérreo respectivamente).

Además se puede apreciar que la variación de concentración por elemento en los 54 análisis realizados es importante debido a la diferencia de una a dos órdenes de magnitud entre los elementos mayores y el grupo de los metales de transición. Algunos de estos elementos corresponden mayormente a los oligoelementos necesarios para el crecimiento de los árboles, entre los que se encuentran el B, Cu, Fe, Mn y Zn (Guimaraes, 1982).

Para poder ilustrar las variaciones de concentraciones elementales y evaluar una posible tendencia elemental a lo largo del tiempo, y además de su posible relación con la variación de ancho de anillo, se elaboraron las figuras (5.11-5.15) que representan el comportamiento de cada elemento con el IAA. En el Anexo II se muestran las gráficas de las concentraciones de algunos elementos con el IAA que no están en el capítulo, así como las tendencias elementales sin el IAA.

En la Tabla 5.7 se muestran los puntos que se utilizaron para graficar los periodos en las gráficas. Cabe mencionar que en Barranca de Amealco algunos anillos eran tan delgados que las muestras llegaron a ser de 20 anillos/años por muestra como en el caso de 1971 a 1991.

Tabla 5.7. Tabla de puntos utilizados para graficar las concentraciones elementales de las series de crecimiento de anillos de árboles.

<b>Periodo</b>	<b>Año</b>	<b>Periodo</b>	<b>Año</b>
1744-1743	1744	1849-1847	1849
1748-1745	1748	1852-1850	1852
1753-1749	1753	1857-1853	1857
1758-1754	1758	1861-1858	1861
1762-1759	1762	1864-1862	1864
1766-1763	1766	1869-1965	1869
1774-1767	1774	1873-1870	1873
1779-1775	1779	1875-1874	1875
1782-1780	1782	1877-1876	1877
1787-1783	1787	1880-1878	1880
1790-1788	1790	1883-1881	1883
1793-1791	1793	1887-1884	1887
1797-1794	1797	1892-1888	1892
1801-1798	1801	1899-1893	1899
1805-1802	1805	1909-1800	1909
1808-1806	1808	1920-1910	1920
1813-1809	1813	1927-1921	1927
1817-1814	1817	1934-1928	1934
1822-1818	1822	1941-1935	1941
1827-1823	1827	1947-1942	1947
1829-1828	1829	1954-1948	1954
1832-1830	1832	1970-1955	1970
1836-1833	1836	1991-1971	1991
1842-1837	1842	2004-1992	2004
1846-1843	1846	2014 - 2005	2014

La figura 5.11 muestra la tendencia de variación de concentración del Bario (Ba). Esta tendencia es comparable a Ca, Na y V. Dicha tendencia presenta grandes variaciones. Las concentraciones de Ba fluctúan entre 11.9 y 176.6 mg/kg. Los periodos que tienen mayores concentraciones se encuentran 1805, 1878, 1883, 1889, 1892, 1909, 1920 y 1934.

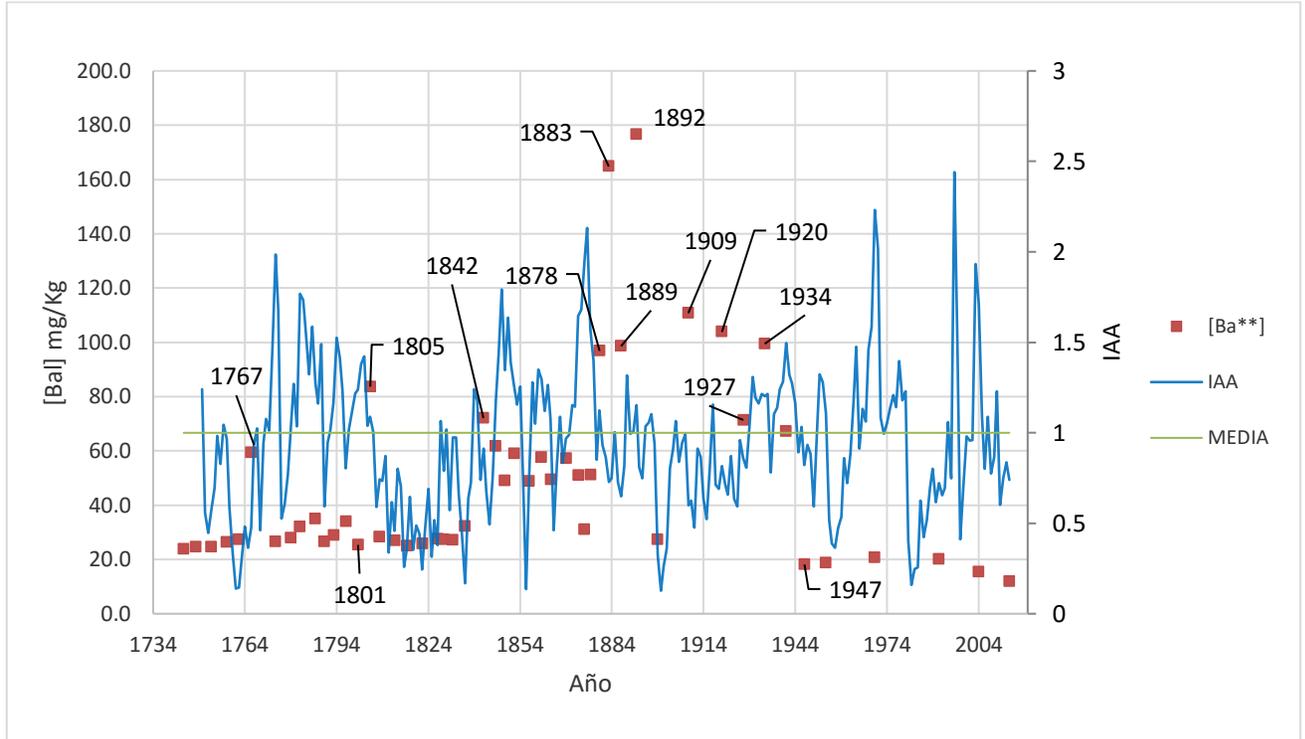


Figura 5.11 Comparativo de las tendencias elementales de bario con el índice de ancho de anillo (IAA) en el sitio de Barranca de Amealco.

La figura 5.12 se presenta la tendencia de variación de concentración del Cr. Los picos de concentraciones más representativos corresponden a los periodos de 1947, 1954 y 1991. A partir del 1991 se puede observar una disminución de las concentraciones observadas que casi alcanza los valores medidos de antes de 1900.

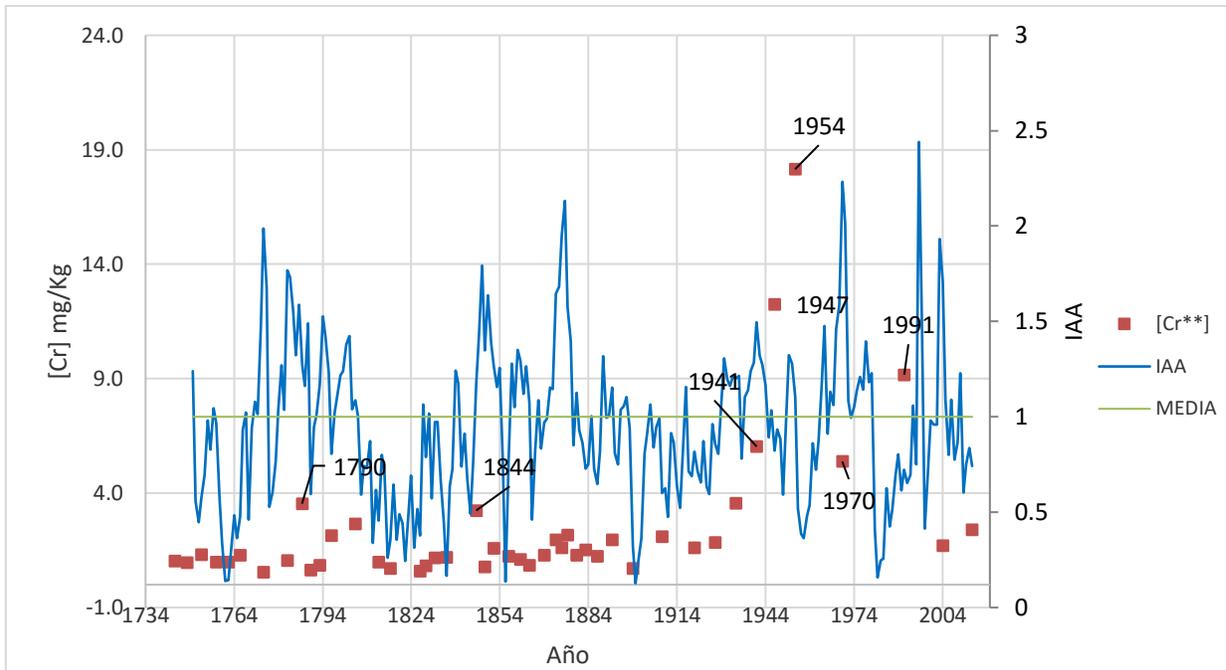


Figura 5.12 Comparativo de las tendencias elementales de cromo con el índice de ancho de anillo (IAA) en el sitio de Barranca de Amealco.

La figura 5.13 muestra la tendencia de variación de concentración del Fe, la cual tiene importantes variaciones hasta 1900. Las concentraciones más altas corresponden a los periodos de 1769, 1787, 1797, 1846, 1861, 1877, 1954 y 1991.

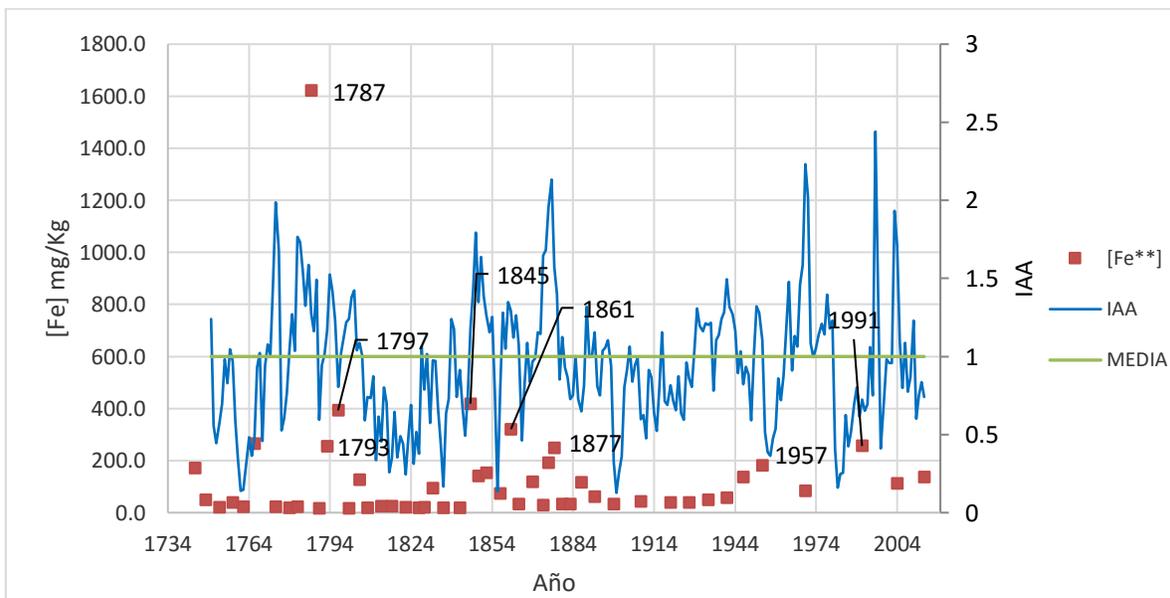


Figura 5.13 Comparativo de las tendencias elementales de hierro con el índice de ancho de anillo (IAA) en el sitio de Barranca de Amealco.

La figura 5.14 muestra la variación del Boro (B) con los anillos de crecimiento en función del tiempo. Se observa una tendencia lineal con ciertos incrementos ligeros en la concentración en los periodos de 1787, 1797 y 1805 y un pico de muy alta concentración en 1857, después de eso el comportamiento es lineal pero comienza a incrementarse ligeramente en los cuatro periodos de 1970, 1991, 2004 y 2014.

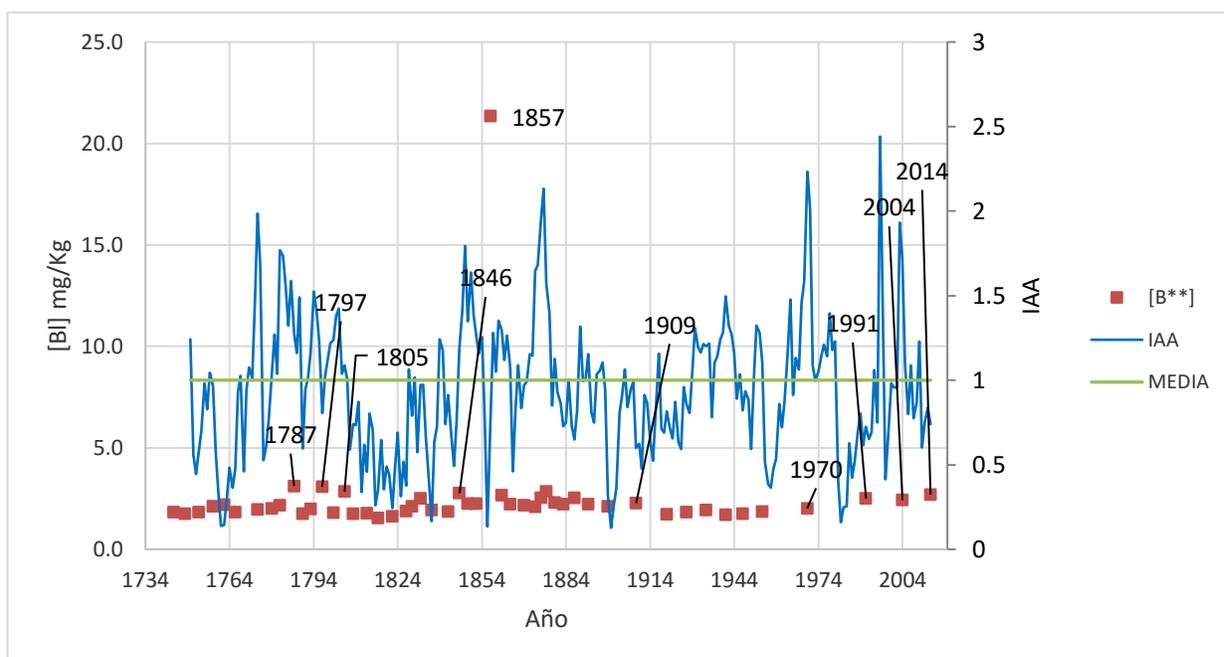


Figura 5.14 Comparativo de las tendencias elementales de boro con el índice de ancho de anillo (IAA) en el sitio de Barranca de Amealco.

La variación de concentración de los elementos Ba, Ca, Na, Mg, Mn, V, Cr y Fe no presentan un patrón de variación de concentración elemental en relación con el ancho de anillo de crecimiento.

En cuanto al Si de la figura 5.15 se tienen concentraciones por debajo de 100mg/kg en casi todos los periodos con excepción de 1877, 1991 y 2014. Algunos de los periodos que tienen las concentraciones más altas 1758, 1787, 1834, 1875, 1909, 1920, 1954, 1970, 1991, 2006 y 2014.

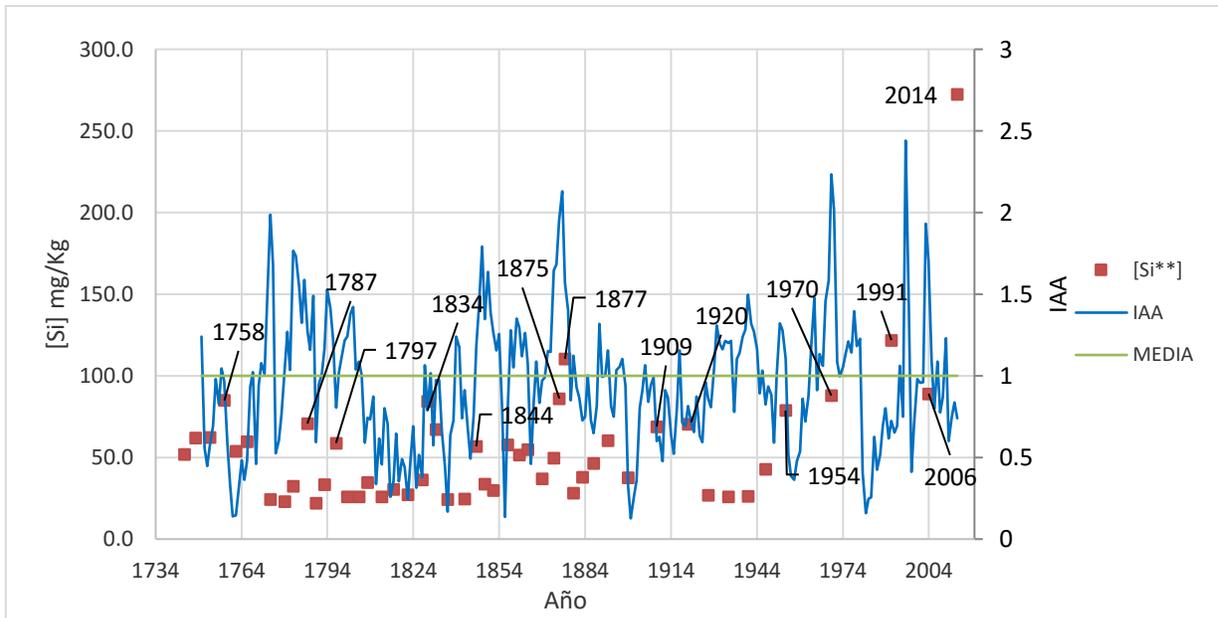


Figura 5.15 Comparativo de las tendencias elementales de silicio con el índice de ancho de anillo (IAA) en el sitio de Barranca de Amealco.

En la Figura 5.16 se muestra el comparativo de las tendencias elementales de bario, calcio, magnesio, sodio y vanadio del sitio de Barranca de Amealco.

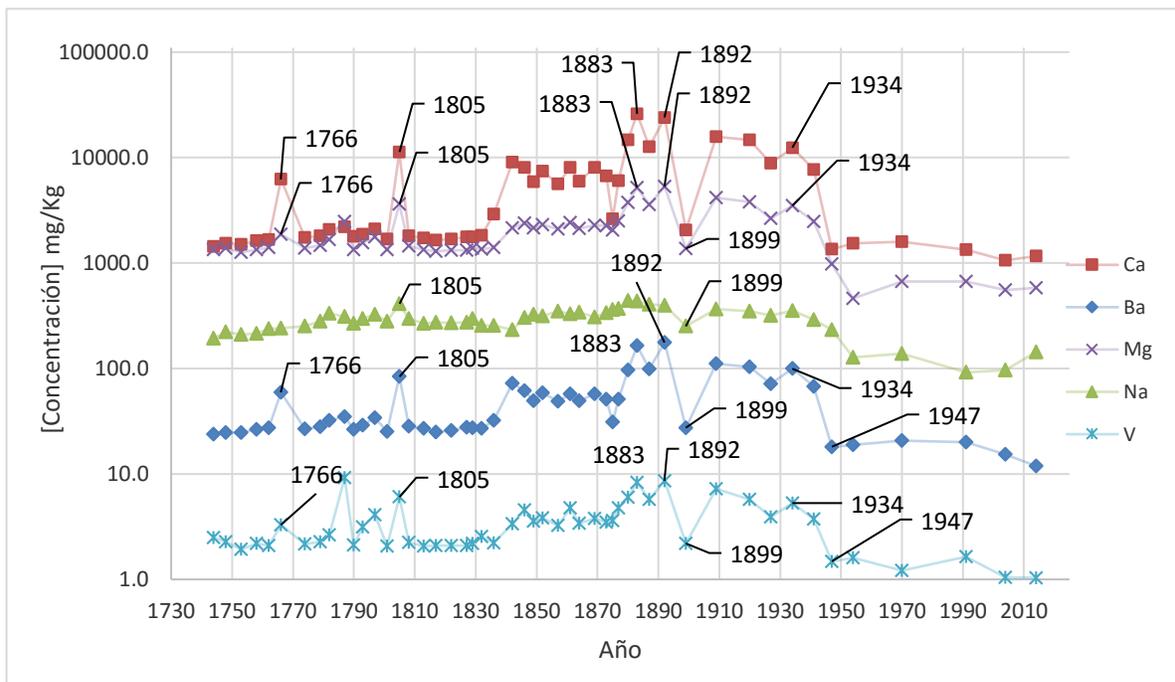


Figura 5.16. Comparativo entre la variación de Ba, Ca, Mg, Na y V en Barranca de Amealco.

Es importante mencionar que, debido al alcance del estudio, no se puede descartar la posibilidad de una posible distribución radial de algunos elementos traza, sin embargo, algunos estudios dendroquímicos (Okada et al, 1990; Chun and Hui-Yi, 1992) han reportado la posible influencia en algunos patrones de distribución radial en el borde de la albura y el duramen, lo que asumimos implicaría un incremento o una reducción súbita en las concentraciones de algunos elementos pero no se observa en la Figura 5.16.

*Las variaciones similares en el Ba, Ca, Mg, Na y V permiten evaluar la asimilación de los elementos y su variación en el tiempo, con lo que se podría considerar la premisa de que la especie *Taxodium mucronatum* Ten. no trasloca los elementos al xilema de forma horizontal, sino que los incorpora y los mantiene en los anillos de manera individual o periódica (de acuerdo a los alcances de este estudio). En la Figura 5.15, se tienen varios elementos (Ba, Ca, Mg, Na y V, ninguno de ellos oligoelemento) que muestran ciertas tendencias similares lo que hace posible asumir que la especie puede ser utilizada para estudios dendroquímicos.*

#### 5.4.2 Dendroquímica de núcleos de *Taxodium mucronatum* Ten. de Calesa

En la figura 5.17 se puede observar en diagramas de caja y bigote los elementos que presentaron una concentración superior al límite de cuantificación en los anillos de crecimiento del *Taxodium mucronatum* Ten de Calesa. En este diagrama de caja se tiene la información sobre las concentraciones en mg/kg.

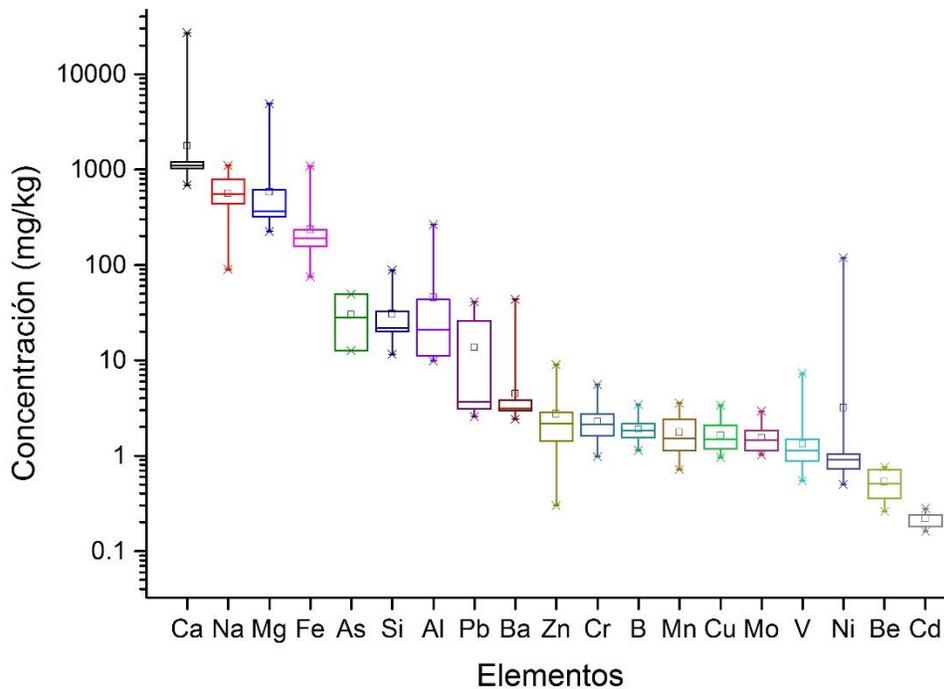


Figura 5.17. Concentraciones de los elementos del núcleo tomado en Calesa ordenado por media de concentración máxima.

En la figura 5.17 se puede observar una distribución en tres grupos de elementos así como en las gráficas previas pero en el sitio de Barranca de Amealco, aunque de manera menos clara: los elementos mayores con una concentración media superior a 100 mg/kg (Ca, Fe, Mg, Na). Los metales de transición (Cu, Cr, Mn, Mo, Ni, V y Zn) y el Al, Pb; As, B y Si; Ba (metales, no metales y alcalinotérreos respectivamente) con concentraciones medias entre 1 y 100mg/kg y los elementos trazas con una concentración media inferior a 1 mg/kg como Be (alcalinoterreo) y Cd y Ni (metales de transición). Además se puede apreciar que la variación de concentración de una a tres órdenes de magnitud, desde los elementos mayores hasta los metales trazas.

De manera similar que para Barranca de Amealco, se buscó evaluar si existía alguna relación de las concentraciones elementales con el crecimiento del árbol del sitio de Calesa.

En la tabla 5.8 se muestran los años que se utilizaron para graficar los periodos. Para este sitio, las muestras generalmente eran de un año, mientras que las que

más anillos abarcaron fueron de 4 años, a excepción de los anillos cercanos a la corteza que al igual que el sitio 1 fueron de 9 años abarcando un periodo del 2005 al 2014.

Tabla 5.8. Tabla de puntos utilizados para graficar las concentraciones elementales de las series de crecimiento de anillos de árboles en Calesa

<b>Periodo</b>	<b>Año</b>	<b>Periodo</b>	<b>Año</b>
1926	1926	1963	1963
1928	1928-1927	1965	1965-1964
1929	1929	1966	1966
1930	1930	1969	1969-1967
1931	1931	1970	1970
1932	1932	1971	1971
1933	1933	1973	1973-1972
1934	1934	1974	1974
1935	1935	1975	1975
1936	1936	1976	1976
1937	1937	1977	1977
1938	1938	1978	1978
1939	1939	1979	1979
1940	1940	1984	1984-1980
1941	1941	1988	1988-1985
1942	1942	1991	1991-1989
1943	1943	1994	1994-1992
1945	1945-1944	1995	1995
1947	1947-1946	1996	1996
1950	1950-1948	1998	1998-1997
1952	1952-1951	1999	1999
1953	1953	2001	2001-2000
1956	1956-1954	2002	2002
1960	1960-1957	2003	2003
1961	1961	2004	2004
1962	1962	2014	2014 - 2005

En cuanto a la evolución temporal de las concentraciones de B (figura 5.18) se observan concentraciones por debajo de 2mg/kg de forma general aunque se tienen incrementos importantes en los periodos en 1931, 1938, 1939, 1965, 1966, 1969, 1970, 1971, 1977 y 1999.

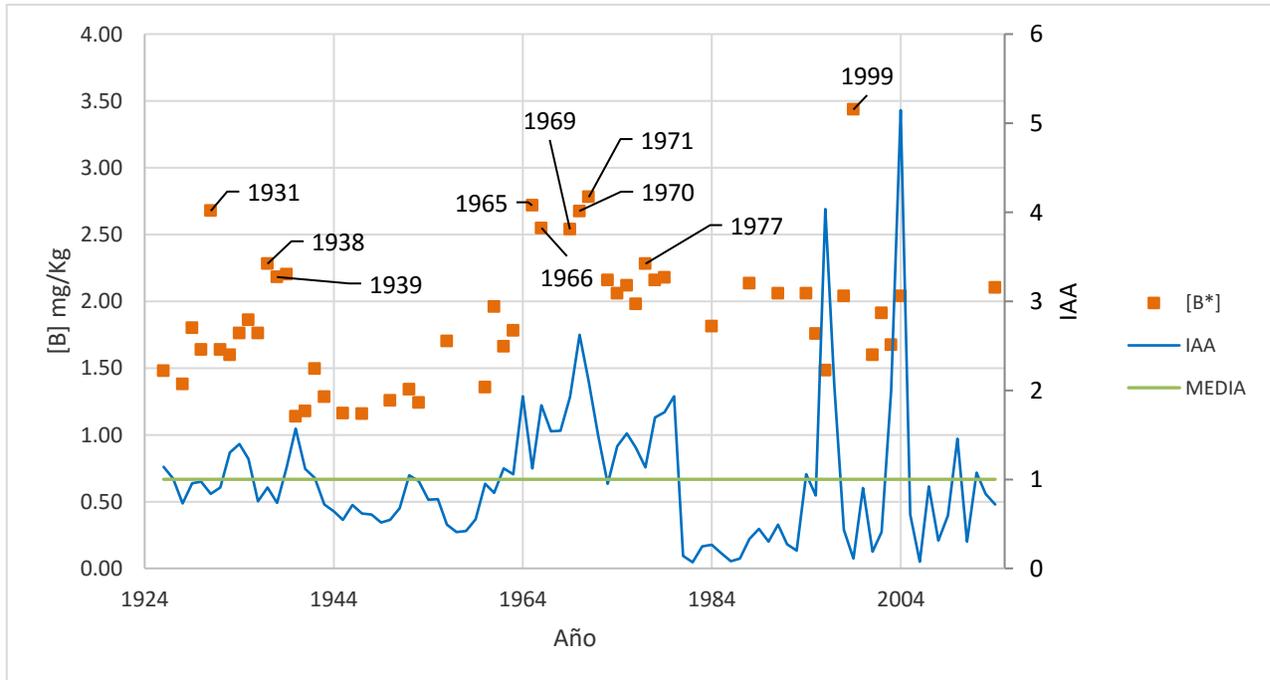


Figura 5.18. Comparativo de las tendencias elementales de boro con el índice de ancho de anillo (IAA) en el sitio de Calesa.

El Cr de la figura 5.19 presenta concentraciones entre 1 y 5.5mg/kg. Estas concentraciones alcanzaron sus máximos en los periodos de 1937, 1965, 1970, 1979, 1984, 1998, 1999, 2001, 2005 y 2014. Mientras que alcanzaron las concentraciones más bajas en 1929 y 1974.

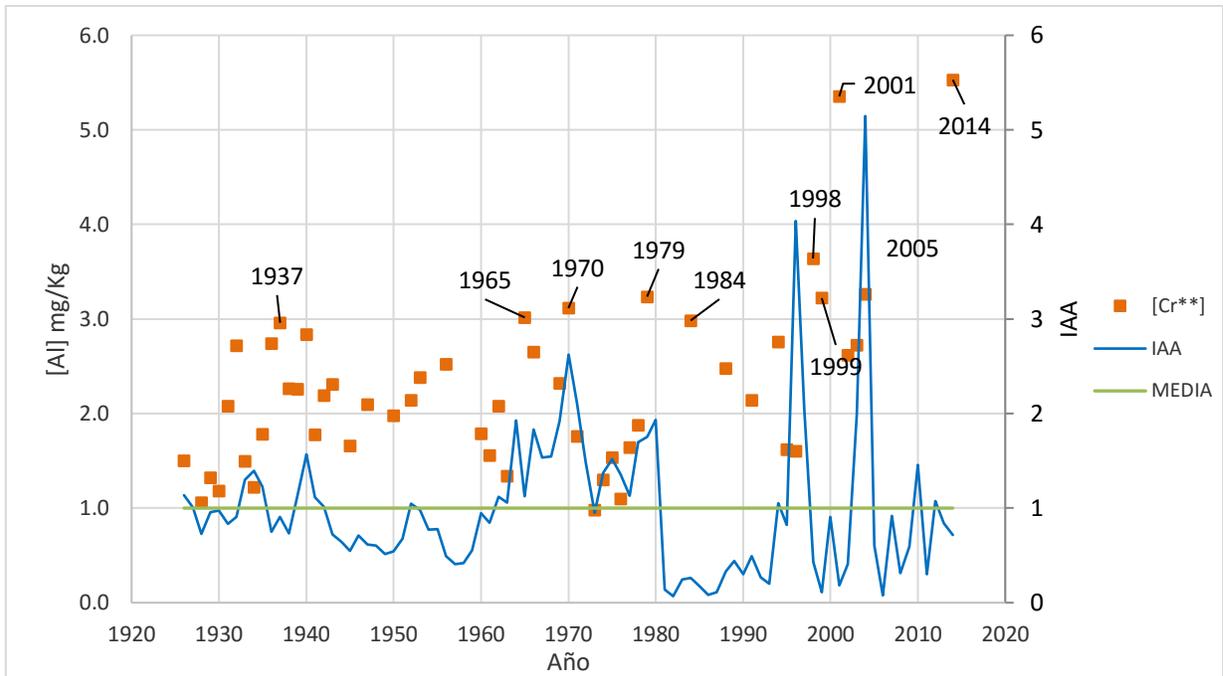


Figura 5.19. Comparativo de las tendencias elementales de cromo con el índice de ancho de anillo (IAA) en el sitio de Calesa.

En cuanto al Mg de la figura 5.20 se tienen concentraciones por debajo de 1000mg/kg hasta 1970, posteriormente se incrementa la concentración en los periodos de 1975, 1977, 1978, 1979 y 1984, alcanzando casi los 5000mg/kg en el periodo de 1979.

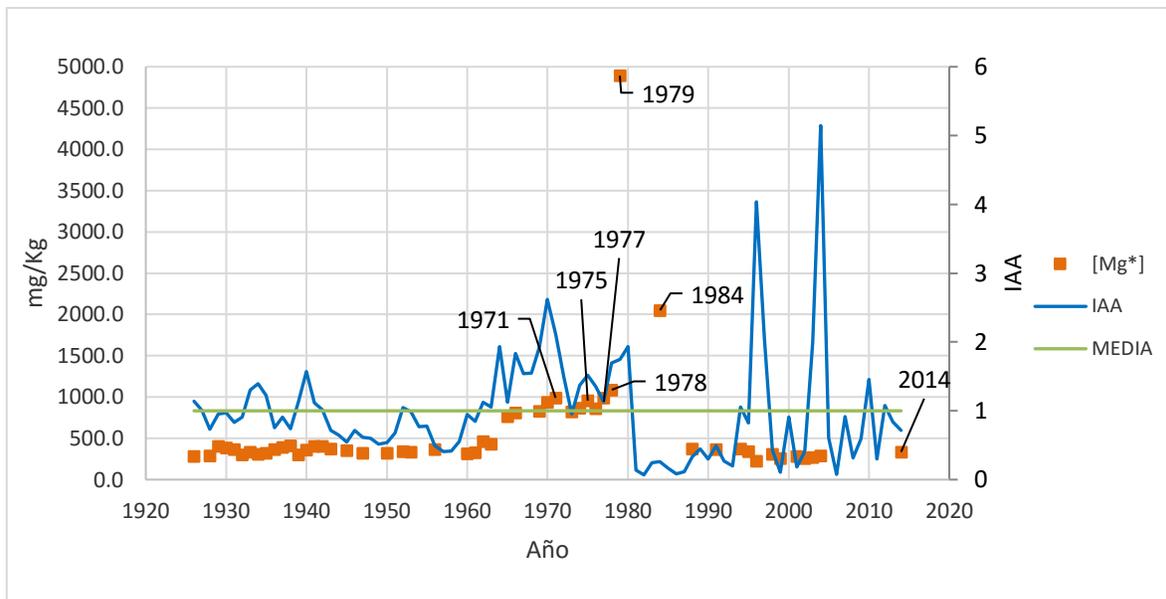


Figura 5.20. Comparativo de las tendencias elementales de magnesio con el índice de ancho de anillo (IAA) en el sitio de Calesa.

En cuanto al vanadio de la figura 5.21 se tienen concentraciones por debajo de 2.5mg/kg de 1926 hasta 1978, posteriormente se incrementa la concentración a 7.2mg/kg en 1979, y a partir del 1991 se mantiene estable entre 0.8 y 1mg/kg. Permitiendo reconocer que 1979 es una fecha donde se observan concentraciones altas en algunos elementos como el vanadio y el magnesio.

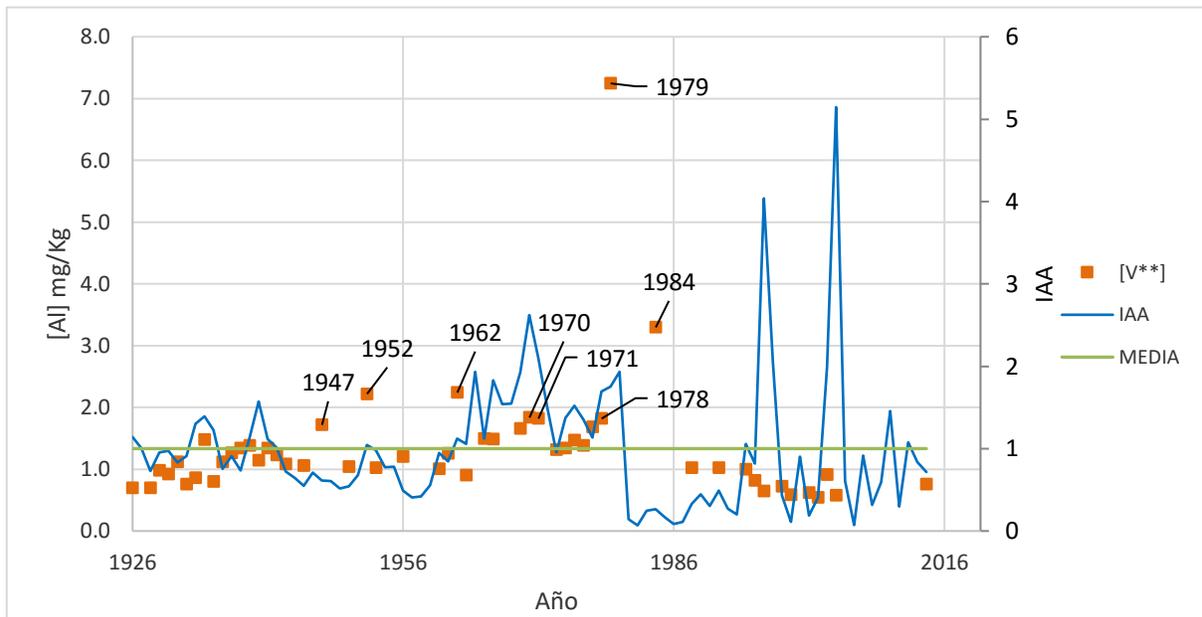


Figura 5.21. Comparativo de las tendencias elementales de vanadio, con el índice de ancho de anillo (IAA) en el sitio de Calesa.

De igual forma que en Barranca de Amealco, se buscó evaluar si existía alguna relación de las concentraciones elementales con el crecimiento del árbol del sitio de Calesa. Se encontró que elementos como el Ba, Ca, Mg y V presentan tendencias concentración comparable en algunos periodos (figura 5.22). Las gráficas adicionales se pueden observar en el Anexo III. En Calesa el Na no presenta una evolución de concentración comparable a los elementos como Ba, Ca, Mg, V al igual que el Barranca de Amealco. Eso puede deberse a una variación del entorno local o a un problema de cuantificación de Na en las muestras de Calesa.

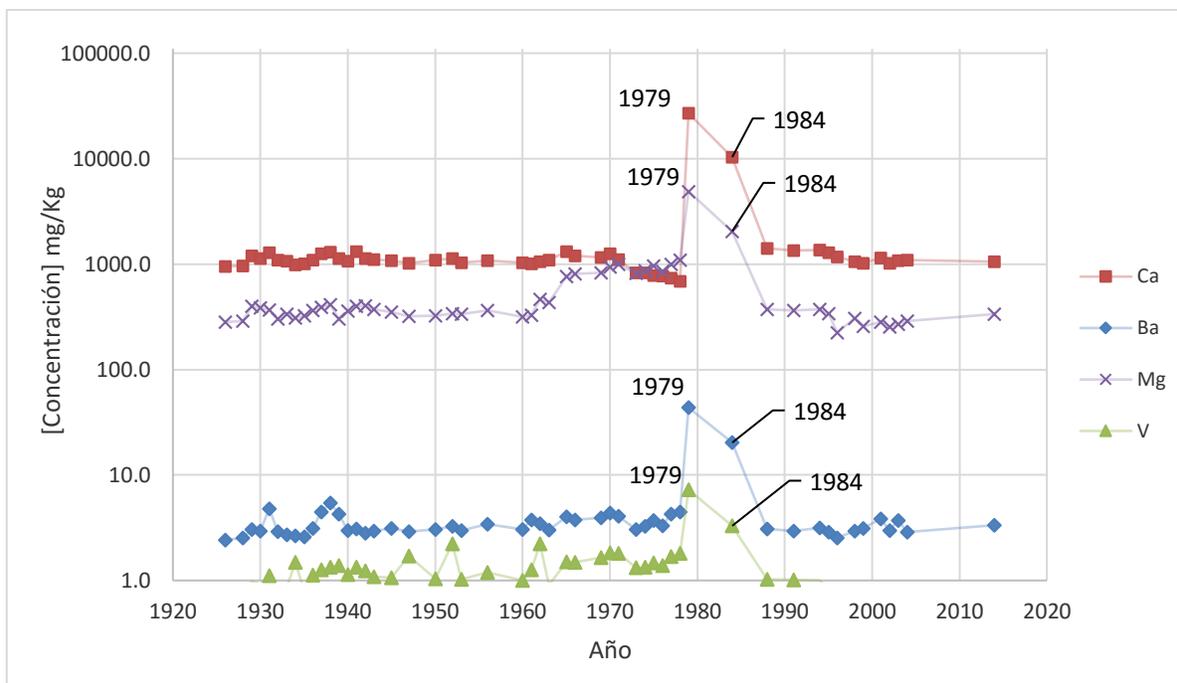


Figura 5.22. Comparativo entre la variación de Ba, Ca, Mg y V en Calesa.

En las gráficas anteriores se puede observar que la distribución temporal y la evolución de la concentración de estos elementos no tienen correlación entre ellas a excepción del Ba, Ca, Mg y V de la Figura 5.22, de la que se puede asumir que el máximo puede estar dado por la transición entre la albura y el duramen del núcleo que se analizó.

A diferencia del sitio de Barranca de Amealco, en el sitio de Calesa se tiene un súbito incremento en la concentración de Ba, Ca, Mg y V para el periodo de 1979 (correspondiente a ese año únicamente) lo que se asume puede deberse a que justamente a finales de 1970 e inicios de 1980 fue desarrollada la zona habitacional de Calesa, trayendo consigo aumento poblacional, uso de transporte y generación de residuos. Por otro lado, no se puede descartar la posibilidad de una translocación de elementos traza que provoque la diferencia de concentración debido al borde entre la albura y el duramen que coincide con 1980 para el núcleo analizado.

En el caso del Mo, no se reporta una concentración cuantificable en el agua ni en los suelos. Su fuente podría ser muy bien una contaminación de las muestras debido

al acero del taladro de Pressler utilizado. De manera similar, Sheppard y Witten (2005) reportan una posible contaminación para el Cr, Ni y W en las especies de *Pseudotsuga menziesii* Douglas-fir), *Pinus Ponderosa* (Ponderosa Pine) y *Populus Fremontii* (Cottonwood).

En el caso del Cd, Cu, Ni y Pb, pueden ser asociados al mismo proceso de contaminación que el Mo (por el taladro de Pressler), aunque estos elementos presentan una concentración cuantificable en los diferentes suelos muestreados. No obstante la ausencia de Cd y Pb en el agua en las dos campañas de muestreo sugiere que posiblemente no son elementos biodisponibles para la especie durante todo el año y que pueden ser accesibles al árbol por medio de alguna alteración que cambie las condiciones del suelo como lluvia o por ciertos eventos contaminantes que provoquen que esos metales se encuentren disponibles en el suelo y puedan ser absorbidos por el sistema radicular como deposición atmosférica.

*En los arboles muestreados del sitio de Calesa y de Barranca de Amealco, se puede distinguir algunas concentraciones elementales comparables como las de los elementos Be, Cd, Mo y V, a excepción del As que sólo se encontró en el sitio de Calesa. Algunos elementos como el Al, Ba, Mn, Si y Zn muestran diferencias de dos o más órdenes de magnitud respecto a los máximos entre el sitio de Barranca de Amealco y Calesa.*

#### 5.4.3 Índices de acumulación suelo/árbol, y agua/árbol en Barranca de Amealco y Calesa

Los índices de acumulación muestran la relación que existe entre la concentración de ciertos elementos en los anillos de crecimiento de *Taxodium mucronatum* Ten con las concentraciones de los mismos elementos en el suelo o en el agua para el año 2015. Estos índices elementales permiten evaluar el nivel de absorción

preferencial de algunos elementos por la especie estudiada al dividir la concentración de los testigos entre el sustrato de interés (López, 2009).

En la Tabla 5.9 se muestran los índices de acumulación obtenidos, los cuales representan la relación entre el árbol y el agua y el árbol y el suelo de ambos sitios de estudio. Se tomaron las concentraciones del último año de las muestras de las series de crecimiento para igualar las condiciones de los muestreos recientes tanto de agua como de los suelos. Tanto en Barranca de Amealco como en Calesa estos índices o coeficientes elementales presentan de dos a tres órdenes de magnitud de diferencia entre los índices árbol/ agua y árbol/suelo estando este último más disminuido. En el Anexo IV se pueden observar las concentraciones de las series de crecimiento de ambos sitios.

Además se observa que el árbol de Barranca de Amealco presenta coeficientes elementales significativamente más altos que en el árbol de Calesa con las excepciones de los elementos de Al y Fe. Los Índices de acumulación elementales con valores inferiores a 1 sugieren que el árbol no absorbe o acumula todos los elementos disponibles. Por el contrario, los Índices de acumulación superior a 1 sugieren que el árbol incorpora a su sistema algunos elementos que no son propiamente los nutrientes que requiere.

Los Índices de acumulación obtenidos para la relación árbol/suelo no son directamente representativos de su interacción, debido a que los valores de suelo representan la composición total del suelo y no los elementos biodisponibles por lixiviación de agua o ácidos leves (como puede ocurrir en el sistema radicular con la presencia de ácidos orgánicos). Los Índices de acumulación para la relación árbol/agua son más representativos de su interacción ya que representa una composición equilibrada del agua con el suelo del sitio de muestreo y los elementos se encuentran en solución, siendo más disponibles para las interacciones como se se observa en la Tabla 5.9.

Cabe mencionar que sólo se obtuvo el índice de aluminio para agua debido a que las concentraciones de suelo no alcanzaron un buen porcentaje de recuperación, se utilizó la concentración de boro en temporada de lluvia únicamente debido a que

no se tenía en temporada seca y no se pudieron determinar concentraciones de cromo en agua en ninguna temporada de ambos sitios.

Tabla 5.9 índices de acumulación relación árbol/agua y árbol/suelo.

<b>Muestra</b>	<b>Barranca de Amealco Árbol-Agua</b>	<b>Barranca de Amealco Árbol-Suelo</b>	<b>Calesa Árbol - Agua</b>	<b>Calesa Árbol-Suelo</b>
Al	80.2	-	647.6	-
B	244.9	0.20	6.7	0.14
Ba	187.6	0.11	52.5	0.02
Cr	-	0.18	-	0.35
Cu	1808.4	0.04	147.0	0.28
Fe	127.9	0.01	6947.0	0.02
Mn	738.8	0.01	16.0	0.01
Ni	399.1	0.24	136.1	0.51
V	239.1	0.02	40.7	0.02
Zn	885.8	0.35	5.5	0.05

Nota: - significa que los elementos no pudieron ser reportados por que están por debajo del límite de detección o por debajo o encima de los porcentajes de recuperación.

## Capítulo 6

### DISCUSIÓN

#### 6.1 Dendrocronología y climatología

Las edades encontradas tanto en Calesa ( $86\pm 2$  años) y en la Barranca de Amealco ( $253\pm 15$  años) concuerdan con las edades de estudios previos del mismo sitio llevados a cabo por Villanueva et al (2010). A su vez, confirman la longevidad de la especie *Taxodium mucronatum* Ten. y la destacan como una especie de gran potencial para registrar variaciones climatológicas en un largo periodo de tiempo.

La comparación de los diagramas de IAA en los diferentes núcleos obtenidos en los arboles de Calesa y Barranca de Amealco, presentan una correlación aceptable entre sí (mayor a 0.32) acorde a lo observado por Correa (2014) para el centro de México, que menciona que existe un crecimiento diferente de los árboles en cada sitio y estas variaciones son atribuidas a condiciones climatológicas diferentes o a factores antropológicos (variación de nivel piezométrico, nivel de disturbio, contaminación ambiental, entre otros). Aunque Correa (2014) también señala que el factor más relevante para el crecimiento es la pluviometría total anual, que representaría de manera indirecta el nivel piezométrico o la disponibilidad total de agua.

Debido a la corta distancia entre los dos sitios de estudios (Calesa y Barranca de Amealco, 40 km), y a la altura de ambos sitios es relativamente comparable (170m), la variación de condiciones atmosféricas no debería ser un factor influyente en el desarrollo de la especie *Taxodium mucronatum* Ten. En nuestro caso, ambos árboles están ubicados en el borde del cauce de un río perenne por lo cual no deberían presentar afectaciones por la disponibilidad de agua. Otros factores que es necesario tomar en cuenta son las modificaciones atmosféricas inducidas por eventos ocurridos a escala global que pudieron influir en el crecimiento del árbol (Handler y Andsager, 1994). Dentro de estos eventos, se encuentran las erupciones

volcánicas que modifican la química atmosférica de la estratósfera debido al polvo, cenizas y aerosoles que emiten, reduciendo la radiación solar; así como los eventos atmosféricos globales como son el Niño y la Niña, el Pacific Decadal Oscillation y el Atlantic multidecadal oscillation, que modifican drásticamente la hidrología en el centro de México.

Los principales volcanes que han tenido un impacto reconocido a nivel internacional (mayor índice VEI: Índice de explosividad volcánica) es el Tambora en la isla de Sumbawa en Indonesia en 1815, el Pinatubo en Filipinas hasta 1991, y el Chichón en 1982, que provocó una reducción de la radiación solar del 3 al 4% en la superficie terrestre entre los 5° y 40° Latitud Norte justo en el momento en que se calentaba el continente del hemisferio norte por el ciclo anual de temperatura entre otros (Angell, 1996).

En las Figuras 6.1 y 6.2 se observan las variaciones de IAA a lo largo de los núcleos obtenidos en los sitios de Calesa y Barranca de Amealco con algunos de los eventos volcánicos, solares y atmosféricos más relevantes a escala global y nacional (Handler y Andsager, 1994) que podrían haber afectado el desarrollo de estos árboles. En color negro y gris se encuentran los eventos que tienen una relación positiva o negativa con el IAA mientras que los de color amarillo no muestran una relación directa sobre los anillos de los sitios estudiados. En las Figuras 6.1 y 6.2, el tamaño del volcán es proporcional a su VEI (Índice de explosividad volcánica) que relaciona de manera indirecta con la intensidad de la afectación a las condiciones atmosféricas.

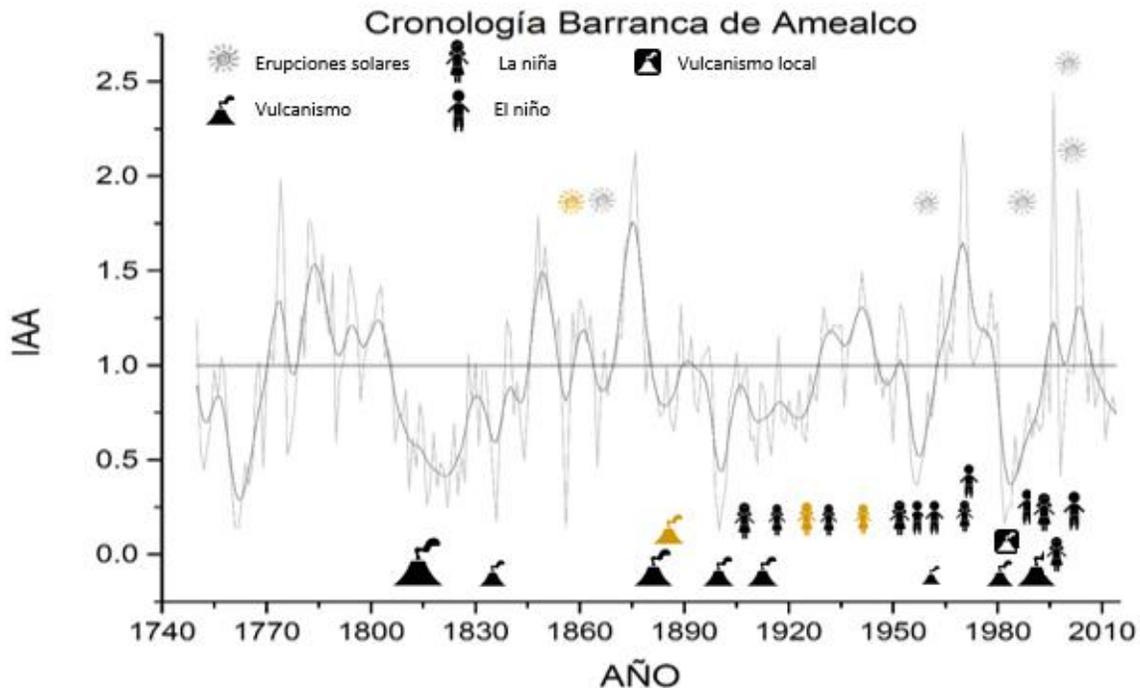


Figura 6.1 Variación de IAA en función del tiempo (dendrocronología de Barranca de Amealco) correlacionada con los eventos a escala global como vulcanismo, erupciones solares y eventos climatológicos como El Niño y La Niña. En cuanto a volcanes, en 1815 se observa el de La Tambora en Indonesia (VEI: 7), en 1835 el de Cosiguina en Nicaragua (VEI:5), en 1883 Krakatoa en Indonesia (VEI:6), en 1886 Okataina en Nueva Zelanda (VEI:5), en 1902 Santa Maria en Guatemala (VEI:6), en 1912 Novarutka en Alaska, EUA (VEI:6), en 1963 Agung Bali en Indonesia (VEI:4), en 1980 Mount St. Helens en EUA (VEI:5), en 1982 El Chichón en Chiapas, México (VEI:5) y en 1991 Monte Pinatubo en Filipinas (VEI:6). En cuanto a fenómenos como el niño, se tienen eventos intensos en 1957, 1965, 1972, 1982 y 1997. La Niña tuvo eventos intensos en 1906, 1916, 1924, 1928, 1938, 1954, 1970, 1988, 1995. Los eventos de erupciones solares más importantes se tienen en 1859, 1872, 1941, 1972, 1989 y 2003 (Cliver y Svalgaard, 2004).

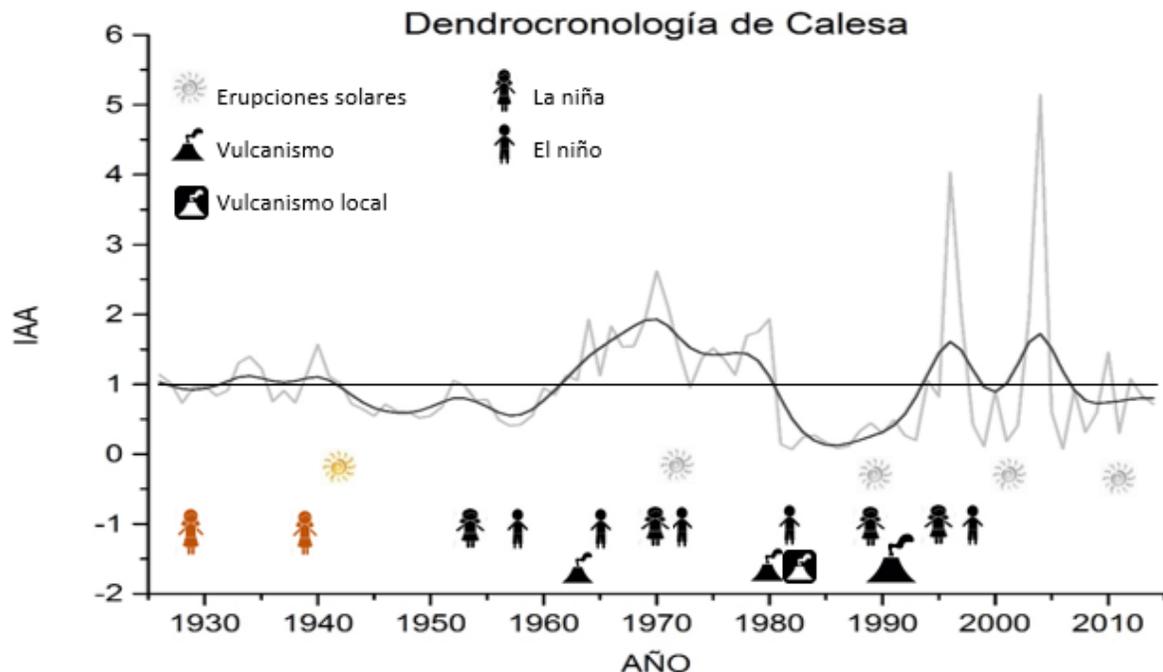


Figura 6.2 Variación de IAA en función del tiempo (dendrocronología de Calesa) correlacionada con los eventos a escala global como vulcanismo, erupciones solares y eventos climatológicos como El Niño y La Niña. En cuanto a volcanes se tiene en 1963 el de Agung Bali en Indonesia (VEI 4), en 1980 Mount St. Helens en EUA (5), en 1982 El Chichón en Chiapas, México (5) y en 1991 Monte Pinatubo en Filipinas (6). En cuanto a fenómenos como el niño, se tienen eventos intensos en 1957, 1965, 1972, 1982 y 1997. La Niña tuvo eventos intensos en 1928, 1938, 1954, 1970, 1988, 1995. Los eventos de erupciones solares más importantes se tienen en 1941, 1972, 1989 y 2003 (Cliver y Svalgaard, 2004).

En las figuras 6.1 y 6.2 se puede apreciar que los eventos volcánicos figuran como los de mayor impacto de acuerdo al IAA, es decir, que tienen una mayor influencia en el crecimiento negativo de los anillos de crecimiento ( $IAA < 1$ ). El centro eruptivo que se encuentra más cercano a la zona de estudio es el que tiene mayor influencia en el crecimiento, por ejemplo la erupción del Chichón en 1982, y las de Cosiguina en Nicaragua y Santa María en Guatemala. Las erupciones ocurridas en el Hemisferio Sur presentan las menores afectaciones o ausencia de las mismas como

ocurre para la erupción de Okataina en Nueva Zelanda. Las erupciones solares tienen una gran correlación con los IAA bajos siendo los eventos de 1965 y 1997 los más evidentes y en los que no se conjuntan con otro evento (vulcanismo o climatológico). El efecto de los eventos climatológicos como “El Niño” parecen tener un impacto negativo sobre el crecimiento debido a la generación de temporadas de sequía en el centro de México. De igual forma, en el norte de México se han llevado a cabo investigaciones recientes utilizando análisis de anillos de árboles para identificar variaciones de precipitación históricas para hacer reconstrucciones climáticas e identificación de sequías (Endfield y Fernández, 2006; Cleaveland et al, 2003)

De manera general, el crecimiento de los anillos es afectado en mayor medida por factores climatológicos y atmosféricos regionales, así como erupciones solares, teniendo menor influencia las pequeñas variaciones naturales y antrópicas locales. Handler y Andsager (1994) menciona que el clima global es el resultado de un sistema estrechamente acoplado en el que todas las regiones se ajustan una con otra en respuesta a la radiación neta que golpea la tierra.

De la misma forma se buscó evaluar si existía una relación entre el crecimiento de los anillos de ambos sitios de estudio con las condiciones de precipitación y temperatura como se muestra en las figuras 6.3 y 6.4.

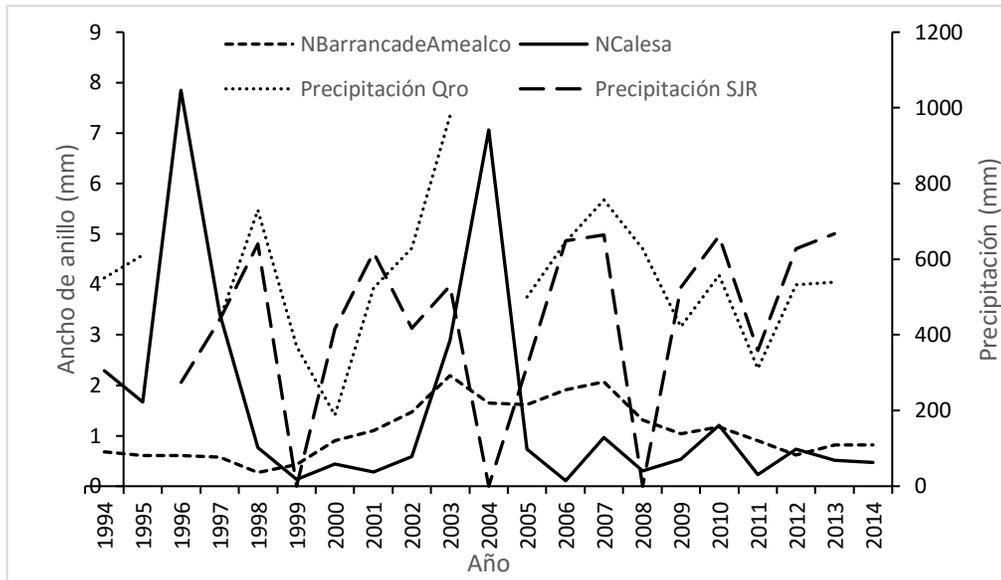


Figura 6.3 Crecimiento radial anual (grosor de anillo) para un núcleo de cada sitio (Tax1M4G para Barranca de Amealco y Tax3m6C para Calesa) en mm y la precipitación reportada a las estaciones de monitoreo correspondientes de cada sitio.

En la Figura 6.3 se puede observar que el núcleo de Calesa tiene una correlación mayor con la precipitación de la estación de monitoreo que la del sitio de Barranca de Amealco pese a que los registros están incompletos. Con esto es posible asumir que en el sitio de Calesa se observó que a mayor precipitación se tuvo mayor crecimiento de los anillos. En la Figura 6.4 se muestra el crecimiento radial anual para un núcleo de cada sitio (Tax1M4G para Barranca de Amealco y Tax3m6C para Calesa) en mm pero esta vez con la temperatura máxima y mínima de cada sitio.

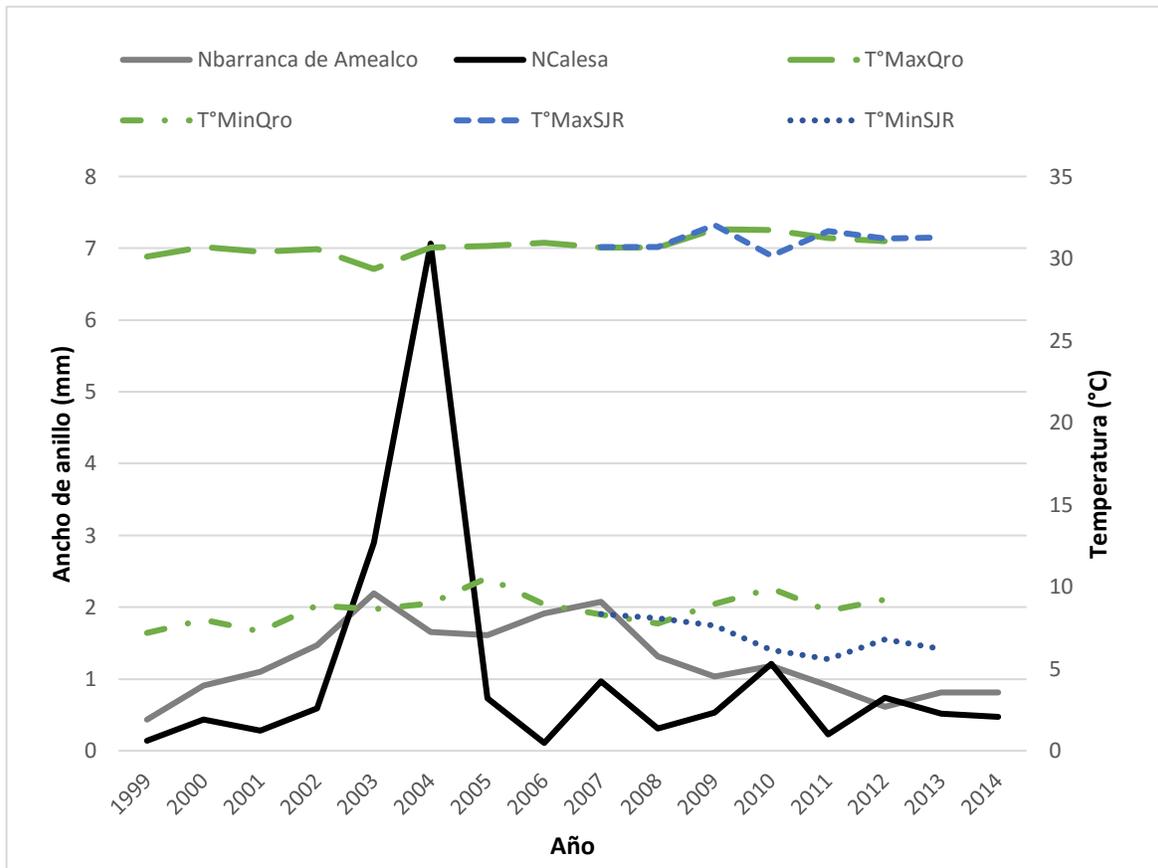


Figura 6.4 Crecimiento radial anual del núcleo de Barranca de Amealco y Calesa con las temperaturas máximas y mínimas de las estaciones de monitoreo cercanas de cada sitio.

En la Figura 6.5 se muestra el crecimiento radial anual del núcleo de Barranca de Amealco (rojo) y en azul el PDSI (Palmer Drought Severity Index) de junio para mesoamerica desarrollado por Stahle (2011), este índice identifica las sequias más severas del siglo veinte tomando en cuenta análisis de correlación con fenómenos como el ENSO (El Niño y la Oscilación del Sureste).

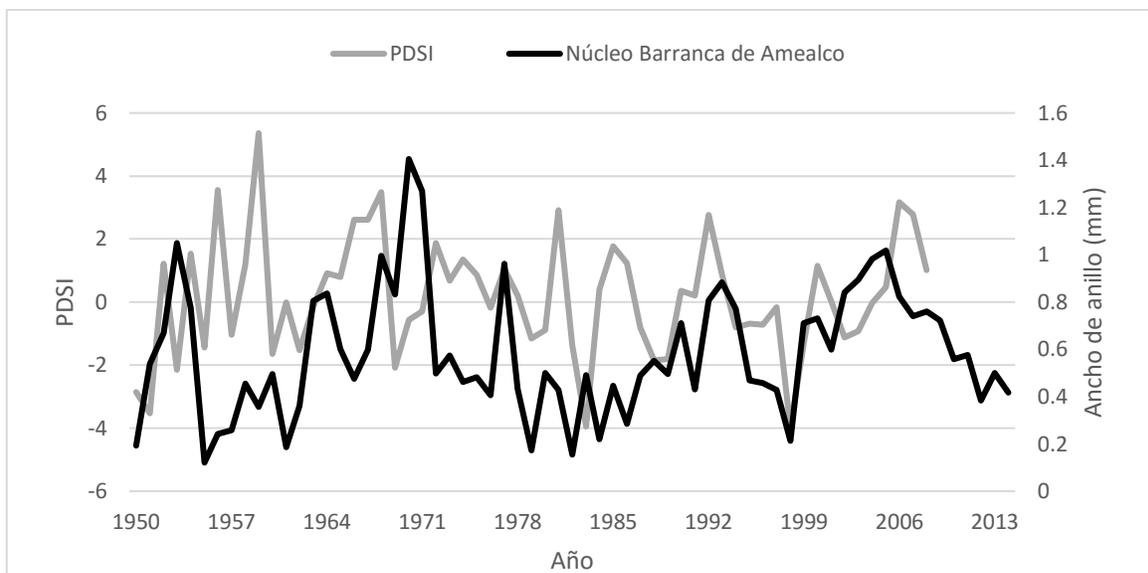


Figura 6.5 Relación PDSI para junio (Stahle, 2011) y núcleo de Barranca de Amealco (Tax1m3g).

Se llevó a cabo una gráfica del PDSI para junio reconstruido por David Stahle para Barranca de Amealco buscando relacionar los IAA con factores climáticos y erupciones tanto volcánicas como solares, encontrando una similitud entre 1989 y 2001 principalmente, sin embargo, para poder asumir una correlación con estos eventos de manera más generalizada se requiere un muestreo más extenso.

## 6.2 Dendroquímica

En esta parte hay dos temas de discusión; el primero es la presencia y la variación temporal de algunos elementos químicos en los anillos de crecimiento de los árboles de cada sitio; y la segunda es la relación entre el árbol y su sustrato (suelo y agua) como fuente potencial de contaminantes.

En ambos sitios se observa un patrón de concentración comparable de algunos elementos analizados. Se pueden reconocer tres grupos de concentraciones diferentes, los cuales son: elementos mayores, metales de transición y trazas para generalizar. No obstante, las variaciones temporales de cada elemento son muy diferentes en cada sitio de estudio. Eso se puede deber a dos factores, el primero es el sesgo analítico generado por la relación entre material muestreado y ancho de

anillo, si los anillos son muy delgados tendremos un valor de concentración promedio de varios años, lo que no permite visualizar tan detalladamente algunos rasgos de la variación temporal. El segundo factor es que el entorno local es comparable en los dos sitios, en particular referente a la composición del suelo pues las concentraciones de elementos en el agua varían. La composición del agua de los ríos (Querétaro y Barranca de Amealco) no representan un ámbito local sino de toda la cuenca hídrica.

Existe una tendencia común de la variación de las concentraciones de algunos elementos en ambos sitios, la cual consiste en el aumento de la concentración en anillos delgados.

La presencia del elemento Mo en algunas muestras de anillos de la especie *Taxodium mucronatum* Ten. es importante puesto que no se reporta una concentración cuantificable ni en el agua ni en los suelos. Por lo que una fuente potencial del Mo podría ser el acero del taladro de Pressler utilizado, lo que explicaría la correspondencia de las concentraciones medidas. La posible contaminación de las muestras debido al acero del taladro parece ser coherente a pesar de los cuidados que se tuvieron con las muestras para evitar dicha afectación. Esto puede relacionarse con lo reportado por Sheppard y Witten (2005), que reportan una posible contaminación en los anillos de crecimiento por el taladro de Pressler para elementos como Cr, Ni y W en algunas especies vegetales. Otra de las premisas podría ser que el elemento no se encontraba disponible en el suelo o agua durante las temporadas de las campañas de muestreo o se encuentra a concentraciones que no pueden ser detectadas por el equipo ICP-OES.

El Ni está presente en el suelo y en el agua, sin embargo se estima que la concentración tan alta puede tener alguna aportación por el taladro de Pressler al momento del muestreo. La identificación de algún proceso de contaminación de la muestra, nos incita a cuestionarnos sobre si es posible que se tengan concentraciones erráticas de otros elementos como Cd y Pb, aunque estos elementos estén ausentes en el agua presentan una concentración cuantificable en los diferentes suelos muestreados pudiendo ser elementos biodisponibles por el

sistema radicular. Algunos elementos analizados en los núcleos de anillos de crecimiento de árboles muestran cierta correlación entre ellos. Se muestra una correlación entre los elementos como Ba, Co, Cu, Fe, Mn, Ni, Cd y Zn esto puede deberse a que tienen la misma carga iónica de  $2^+$ . Entre los nutrientes u oligoelementos conocidos de los árboles se encuentra el B, Cu, Fe, Mn y Zn cuya carga es  $B^{3+}$ ,  $Cu^+$   $Cu^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$   $Fe^{3+}$ ,  $Mn^{2+}$  y  $Zn^{2+}$  (Guimaraes, 1982). Los demás elementos posiblemente pudieron ingresar al xilema a través de sustitución. Algunos elementos como el  $B^{3+}$ , junto con el  $Al^{3+}$ ,  $Ba^{2+}$ ,  $Pb^{4+}$  y  $S^{2-}$  corresponden a los elementos representativos, estos tienen incompletos los subniveles s o p del máximo número cuántico principal. Mientras que los metales de transición, entre los que se encuentra el  $Co^{2+}$ ,  $Cr^{3+}$ ,  $Cu^+$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $V^{5+}$  tienen incompleto el subnivel d por lo que tienden a formar cationes fácilmente. Finalmente se encuentran aquellos elementos que no son representativos ni metales de transición, el  $Cd^{2+}$  y el  $Zn^{2+}$  (Chang, 2009). La relevancia de conocer los electrones de valencia es porque permiten establecer las implicaciones que tienen los enlaces químicos, de tal manera que esta semejanza en la configuración electrónica externa (es decir que guarde similitud con el tipo y número de electrones de valencia) hace que los elementos del mismo grupo se parezcan entre sí en su comportamiento químico. Es importante considerar también la naturaleza de los elementos, es decir si se trata de metales, no metales o metaloides (Chang, 2009).

En la Figura 6.6 se observa la distribución de concentraciones de los elementos presentes a su vez en el suelo, agua y anillo de crecimiento del año 2014 en los sitios de Calesa y Barranca de Amealco.

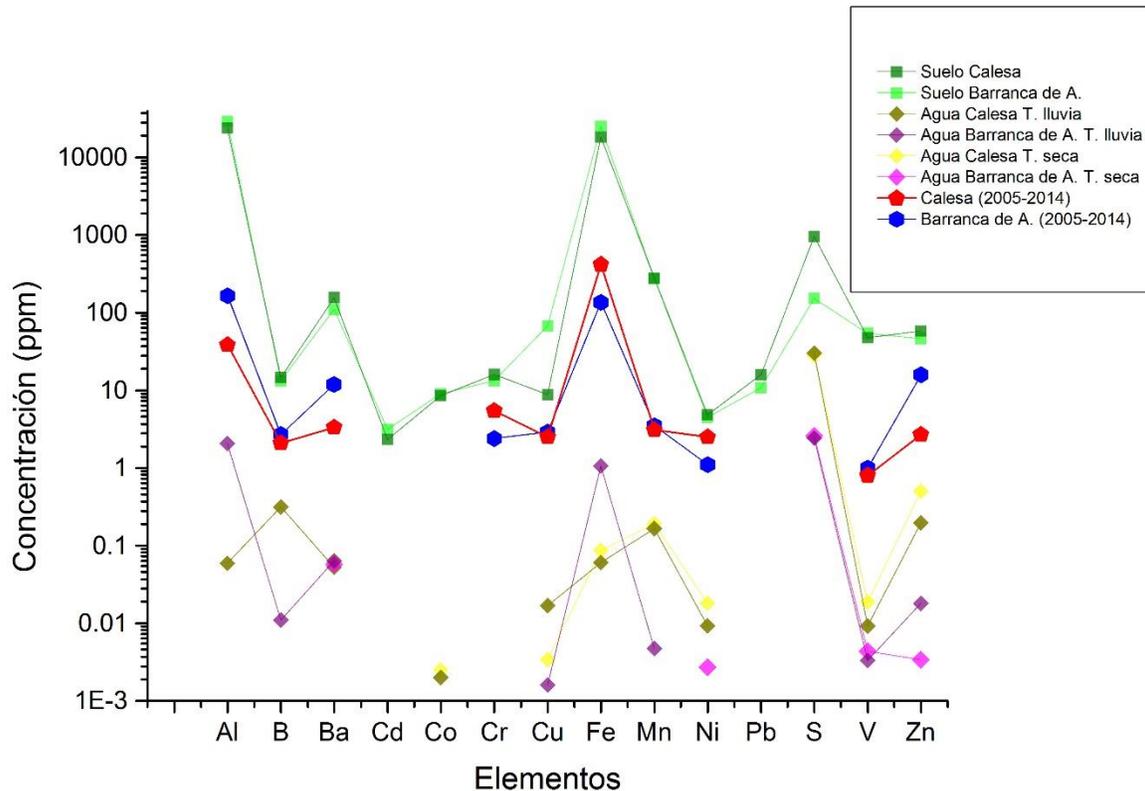


Figura 6.6. Concentración de suelo, agua (temporada seca y de lluvia) y núcleos de ambos sitios.

Una vez que se identificaron los elementos esenciales y los no biodisponibles por el *Taxodium mucronatum* Ten, así como los elementos que representan una potencial fuente de contaminación, podemos tratar de determinar cuál es la fuente predominante, es decir, si es el agua o el suelo de los mismos. Killeen et al (1993) menciona que en los bosques cercanos a ríos o cuerpos de agua, el suelo tiene mayor cantidad de humus pero menor cantidad de nutrientes debido al pH bajo, es por ello que la absorción de nutrientes y algunos elementos no asimilables del suelo, requieren de la precipitación o alguna otra forma de alteración química que permita a los elementos estar en solución. En este estudio los análisis de suelo se llevaron a cabo por digestión total. Por lo cual la relación Suelo/Árbol podría presentar un sesgo analítico.

De esta manera, la proporción en la que los elementos que puedan ser potencialmente contaminantes y fácilmente bioasimilables por la especie vegetal,

depende de la disponibilidad de estos elementos en la disolución del suelo en el agua (Galán y Romero, 2008). Se estima que la composición del agua en temporada de lluvia está relacionada con la cantidad de precipitación a nivel regional, por lo tanto no es representativa de la composición de los suelos locales (mayor escurrimiento, mayor velocidad de flujo del río, menos tiempo de residencia, mayor arrastre regional). De esta forma, la variación de la composición elemental de los árboles *Taxodium mucronatum* Ten representaría una afectación regional a nivel de cuenca y no local.

## Capítulo 7

### CONCLUSIONES

- Los suelos en Calesa y Barranca de Amealco presentan una composición química inorgánica similar dentro de los límites de las Normas Oficiales Mexicanas, sin embargo cada serie de crecimiento analizado presenta tendencias de concentraciones elementales diferentes lo que permite asumir que las condiciones ambientales en que las crecieron fueron distintas.
- La especie presenta anillos de crecimiento anuales convenientes para estudios dendrocronológicos, debido a la gran longevidad de la especie *Taxodium mucronatum* Ten (superior a 1500 años).
- El crecimiento de los anillos de los árboles de ambos sitios puede estar condicionado por factores climatológicos regionales como temperatura y principalmente precipitación e incluso eventos como erupciones volcánicas, sin embargo, se requiere un muestreo más amplio sitio para poder comprobarlo.
- La resolución del equipo ICP-OES cumplió con los requerimientos para evaluar las concentraciones de los elementos mayores y trazas para poder evaluar el potencial dendroquímico de la especie de manera congruente. No obstante, sería más conveniente poder trabajar con menor cantidad de muestra, es decir, tener una resolución a escala de análisis por anillo o una escala fija de al menos 2 o 5 anillos, por lo que se necesitaría un equipo de tipo ICP-MS con mayor resolución.
- Se asume que la especie *Taxodium mucronatum* Ten resultó tener un potencial dendroquímico debido a la variabilidad en la concentración de elementos tanto mayores como trazas a través del tiempo en la muestra analizada del sitio 1, sin embargo es necesario llevar a cabo más estudios que permitan descartar el movimiento radial y puedan corroborar las concentraciones ambientales anuales para así asegurarse de las condiciones ambientales reales durante el crecimiento del árbol.

- Los principales elementos que concentra *Taxodium mucronatum* Ten son oligoelementos, los cuales son nutrientes necesarios para su crecimiento (Cu, Fe, Mn y Zn). Dichos elementos presentan cierta variación de concentraciones comparables en el tiempo.
- Las variaciones de la composición elemental de los arboles *Taxodium mucronatum* Ten. son más representativos de afectaciones regionales a nivel de cuenca y no locales, por lo que posiblemente podrían ser indicadores de la evolución química de algunos elementos contaminantes (relativos a actividades antropogénicas como As, Cd, Cr, Ni Pb, V) a nivel regional.

## Recomendaciones

La especie presenta gran potencial para estudios dendroquímicos por lo que se recomienda utilizar un equipo con mayor resolución como PIXE o ICP-MS que requieran una cantidad menor de muestra permitiendo reconocer anualmente las concentraciones.

Es importante valorar los elementos que se analizarán y reconocer que al extraer las series de crecimiento con el taladro de Pressler se puede tener alguna contaminación o enriquecimiento de ciertos metales que lo componen. Particularmente, si se desean analizar concentraciones de Fe, Ni, Co y Cr se debe buscar otra manera de tratar las muestras como lo señalan Shepard y Witten (2005) puesto que no se tienen materiales de referencia de madera.

Se sugiere valorar que de acuerdo a los elementos que se deseen analizar, el muestreo debe realizarse en la parte más cercana al suelo debido a que si se trata de elementos que tengan mayor contacto con el sistema radicular, su concentración podría ser mayor en esta zona o incluso en la misma raíz.

## Bibliografía

- Abollino, O., Aceto, M., Malandrino, M., Mentaste, E., Sarzanini, C. y Barberis, R. (2002) Distribution and mobility of metals in contaminated sites. Chemometric investigation of pollutant profiles. *Environ. Pollut.* 119-127.
- Adriano, D. (1986) Trace elements in the terrestrial Environment. Springer, New York.
- Alonso, M., Wilkinson, M., Di Risio, C., Marqués, C. y Castro, M. (s.f.) Utilización de especies del género *Tillandsia* como biomonitores de la contaminación atmosférica utilizando técnicas radioquímicas. Facultad de ciencias exactas y naturales. Argentina.
- Angell, j, (1996) Stratospheric temperatures after Volcanic Eruptions. *Nato ASI Series*, 1 (42) 83 – 93.
- Ayers, R. y Wescot, D. (1987) La calidad del agua y su uso en la agricultura. Estudio FAO Riego y Drenaje, 29
- Basta, N. y Tabatabai, M. (1992) Effect of cropping systems on adsorption of metals by soils: II. Effect of pH. *Soil Sci.* 153:195-204.
- Bell, C. y Bidulph, O. (1963) Translocation of calcium. Exchange versus mass flow. *Plant Physiol* 38:610-614.
- Berish, C. y Ragsdale, H. (1985) Chronological sequence of element concentrations in wood of *Carya* spp. In the southern Appalachian Mountains. *Can J For Res* 15: 477-483.
- Bernal, S. y Terrazas, S. (2000) Influencia climática sobre la variación radial de caracteres anatómicos de madera en *Abies religiosa*. *Maderas y Bosques* 6 (1): 73-86.
- Bernal, S. (2004) El papel de las variables ambientales y los contaminantes atmosféricos en la actividad cambial. Tesis doctoral en ciencias. Colegio de Postgraduados. Programa de Botánica. Montecillos Texcoco. Estado de México. 106p.

- Blinder, R., Renberg, I., Klaminder, J. y Emteryd, O. (2003) Tree rings as Pb pollution archives? A comparison of  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  isotope ratios in pine and other environmental media. *Sci. Total Environ.* 319, 173-183.
- Bolaños, Federico (1990). El impacto biológico: Problema ambiental contemporáneo, UNAM. México.
- Bondiatti, E., Momoshima, N., Shortle, W. y Smith, K. (1990) A historical perspective on divalent cation trends in red spruce stemwood and the hypothetical relationship to acidic deposition. *Can J For Res* 20: 1850-1858.
- Cabrera, L. y Rodríguez, D. (s.f.) Calidad del agua en el estado de Querétaro. Centro de Estudios de Contaminación Ambiental, UAQ.
- Camacho, J. (2013) Mapeo de la calidad ambiental urbana mediante bioindicadores en la ciudad de Santiago de Querétaro, Tesis, Facultad de Ingeniería, UAQ.
- Campelo F., Nabais, C., Freitas, H. y Gutierrez, E. (2007) Climatic significance of tree-ring width and intra-annual density fluctuations in *Pinus pinea* from a Mediterranean area in Portugal. *Ann. For. Sci.* 64:229-238.
- Campelo, F., Vieira, J, y Nabais, C. (2013) Tree-ring growth and intra-annual density fluctuations of *Pinus pinaster* to climate: does size matter? *Trees* 27: 763-772.
- Carranza, E. Familia Taxodiaceae. Flora del Bajío y de Regiones Adyacentes Fascículo 4. Instituto de Ecología, A.C. Centro Regional del Bajío, Pátzcuaro, Michoacán, pp. 7
- Carrera-Hernández, J., Carreón-Freyre, D., Cerca-Martínez, M. y Levresse, G. (2016) Groundwater flow in a transboundary fault-dominated aquifer and the importance of regional modeling: the case of the city of Querétaro, México. *Hydrogeol. J* 24, 373-393. DOI: 10.1007/s10050-015-1363-x
- Carreer, M. y Urbinati, C. (2004) Age-dependent tree-ring growth responses to climate in *Larix decidua* and *Pinus cembra*. *Ecology* 85:730-740.
- Carreón- Freyre, D., Cerca, M., Ochoa-González, G., Teatini, P. y Zuñiga, F. (2016) Shearing along faults and stratigraphic joints controlled by land subsidence in the Valley of Queretaro, Mexico. *Hydrogeol J.* DOI: 10.1007/s10040-016.1384-0

- Centro Mexicano de Derecho Ambiental CEMDA, Fondo de Educación Ambiental, A.C., The Tinker Foundation, Presencia Ciudadana A.C. y National Wildlife Federation (2006) El agua en México: lo que todos y todas debemos saber. México.
- CETESB (2003) Relation of contaminated areas of Sao Paolo Estate. Sao Paolo. Brazil. P. 364.
- Chang, R. (2007) Química. China. Mc Graw Hill.
- Chun, L. y Hui-Yi, H. (1992) Tree-ring element analysis of Korean pine (*Pinus koraiensis* Sieb. Et Zucc.) and Mongolian oak (*Quercus mongolica* Fisch. Ex Turcz.) from Changbai Mountain, northeast China. *Trees* 6:103-108.
- Cleaveland, M., Stahle, D., Therrell, M, Villanueva-Diaz, J. y Burns, B. (2003) Tree-ring reconstructed winter precipitation and tropical teleconnections in Durango, México. *Clim. Change* 59, 369-388.
- Cliver, E. y Svalgaard, L. (2004) The 1859 solar-terrestrial disturbance and the current limits of extreme space weather activity. *Sol Phys* 224, 407-422.
- Correa Díaz, A. (2014) *Dendrofisiología de Taxodium mucronatum Ten. en el centro de México durante el último siglo*. (Tesis de maestría inédita). Colegio de Postgraduados, Edo. De México. México.
- Cook, E. (1987) The composition of tree ring for environmental studies. *Tree ring. Bulletin* 43:37-59.
- Cook, E., Seager, R., Cane, M. y Stahle, D. (2007) North American drought: reconstructions, causes, and consequences. *Earth Sci Rev* 81:93-134.
- Cook, E., Anchukaitis, K., Buckley, B., D'Arrigo, R., Jacoby, G., Wright, W. (2010) Asian monsoon failure and megadrought during the last millennium. *Science* 328: 486-489.
- Constante, G., Villanueva, D., Cerano, J. y Estrada, A., (2009) Fechado, control de calidad y medición de series de anillos de crecimiento con fines ecológicos y paleoclimáticos. Folleto técnico No. 14. INIFAP CENID-RASPA. Gómez Palacio, Durango. México. 48p.
- Cuervo, L., Folch, J. y Quiroz, E. (2009) Lignocelulosa como fuente de azúcares para producción de etanol. *Biotecnología*. 13 (3): 11-25.

- Davidson, G., Laine, B., Galicki, S. y Threlkeld, S. (2006) Root zone hydrology: why bald cypress in flooded wetlands grow more when it rains. *Tree-Rings Res* 62: 3-12.
- Dawson, T. y Siegwolf, T. (2007) *Stable isotopes as indicators of ecological change*. Elsevier.
- Delgado, S. (2000) Aplicaciones estadísticas en estudios dendrocronológicos. En Roig, (ed). *Dendrocronología en América Latina*. Mendoza (Argentina), EDIUNC. 79-102.
- De Micco, V., Saurer, M., Aronne, G. Tognetti, R. y Cherubini, P. (2007) Variations of wood anatomy and delta C-13 within-tree rings of coastal *Pinus pinaster* showing intra-annual density fluctuations. *IAWA J* 28:61-74.
- Dollard, G. y Lepp, N. (1977) Some factors affecting the transport of heavy metals in woody plant tissue. In: Hemphill D, editor. *Eleventh Annual Conference of Trace Substances in Environmental Health*, 7-9 July 1977, Columbia, Missouri. 433-439.
- Domec J. y Gartner, B. (2002) How do water transport and water storage differ in coniferous earlywood and latewood) *J Exp Bot* 53:2369-2379.
- Duffau, B., Rojas, F., Guerrero, I., Roa, L., Rodríguez, L., Soto, M., Aguilera, M. y Sandoval, S. (2010) Validación de métodos y determinación de la incertidumbre de la medición, aspectos generales sobre la validación de métodos. (Guía técnica No. 1). Instituto de Salud Pública. Chile.
- Endfield, G. y Fernández, I. (2006) Decades of drought, years of hunger: archival investigations of multiple year droughts in late colonial Chihuahua. *Clim. Change* 75, 391-419.
- Ernst, S. (s.f.) *Gymnosperms: characteristics of pinewood*. Recuperado el 20 de octubre del 2015 de <http://www.users.miamioh.edu/smithhn/sarapage.htm>
- FAO (2002) *Estado de Información Forestal en Colombia*, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Volumen 5, Chile.
- Farmer, J., MacKenzie, A., Kirika, A. y Bailey-Watts, T. (1996) Stable lead isotope record of lead pollution in Loch Lomond sediments since 1630 AD. *Environ. Sci. Technol.* 30, 3080-3083.

- Ferguson, I. y Bollard, E. (1976) The movement of calcium in woody stems. *Ann Bot.* 40:1057-1065.
- Franco, M., Flowers, G., Thien, L. (1998) Lead isotopes in tree rings: Chronology of Pollution in Bayou Trepagnier, Louisiana. *Environ. Sci. Technol* 32, 2371-2376.
- Fukouka, Y. y Kishi, Y. (1995) Influences of air quality on the tree ring widths. In: FFPRI (Ed.), *International Workshop on Asian and Pacific Dendrochronology*. Tsukuba, Japan, pp. 120-127.
- Fritts, H. (1976) *Tree rings and climate*. Academic Press. London. 567 p.
- Fritts, H. (2001) *Tree rings and climate*. The Blackburn Press, London.
- Galán, E. y Romero, A. (2008) Contaminación de suelos por metales Pesados. *Revista de la sociedad española de mineralogía* 10, 48-61.
- Gamboa, M., Reyes, R. y Arrivillaga, J. (2008) Macroinvertebrados bentónicos como bioindicadores de la salud ambiental. *Boletín de Malariología y salud ambiental*. 48 (2) 109-120.
- Guimaraes, P. (1982) Nutricao e adubacao da mangueira. *Informe Agropecuario (Brasil)* 8: 28-35.
- Hagemeyer, J. (1993) Monitoring trace metal pollution with tree rings: a critical reassessment. In: Markert, B. (Ed.), *Plants as Biomonitors: Indicators for Heavy Metals in the Terrestrial Environment*. VCH Weinheim, New York, pp. 541-563.
- Hagemeyer, J. y Schäfer, H. (1995) Seasonal variations in concentrations and radial distributions patterns of Cd, Pb and Cu in stem wood of beech trees (*Fagus sylvatica* L.). *Sci Total Environ* 166:77-87.
- Hagemeyer, J. (2000) Trace metals in tree rings: what do they tell us? In: Markert, B., Friese, K. (Eds.), *Trace Elements: Their distribution and effects in the environment*. Elsevier, New York, pp. 375-385.
- Halliwell, D., Turoczy, N. y Stagnitti, F. (2000) Lead concentrations in *Eucalyptus* sp. In a Small Coastal Town. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 65, 583-590.
- Handler, P. y Andsager, K. (1994) El niño, Volcanism, and Global Climate, *Human Ecology*, 22 (1), 37 – 57.

- Hernández, E. (2014) Caracterización hidrogeoquímica, calidad del agua e identificación de áreas de recarga en los acuíferos Amazcala-Buenavista mediante geoquímica e isótopos estables (Tesis de maestría). Centro de Geociencias, UNAM, México.
- Holmes, R. (1994) DPL- Dendrochronology Program Library. University of Arizona, Tucson, AZ.
- Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática INEGI (1995) Anuario Estadístico Querétaro de Arteaga. México.
- Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática INEGI (1996) Anuario Estadístico Querétaro de Arteaga. México.
- Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática INEGI (1997) Anuario Estadístico Querétaro de Arteaga. México.
- Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática INEGI (1998) Anuario Estadístico Querétaro de Arteaga. México.
- Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática INEGI (1999) Anuario Estadístico Querétaro de Arteaga. México.
- Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática INEGI (2000) Anuario Estadístico Querétaro de Arteaga. México.
- Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática INEGI (2001) Anuario Estadístico Querétaro de Arteaga. México.
- Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática INEGI (2002) Anuario Estadístico Querétaro de Arteaga. México.
- Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática INEGI (2003) Anuario Estadístico Querétaro de Arteaga. México.
- Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática INEGI (2004) Anuario Estadístico Querétaro de Arteaga. México.
- Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática INEGI (2005) Anuario Estadístico Querétaro de Arteaga. México.
- Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática INEGI (2006) Anuario Estadístico Querétaro de Arteaga. México.

- Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática INEGI (2007) Anuario Estadístico Querétaro de Arteaga. México.
- Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática INEGI (2008) Anuario Estadístico Querétaro de Arteaga. México.
- Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática INEGI (2009) Anuario Estadístico Querétaro de Arteaga. México.
- Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática INEGI (2010) Anuario Estadístico Querétaro de Arteaga. México.
- Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática INEGI (2013) Anuario Estadístico Querétaro de Arteaga. México.
- Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática y Comisión Nacional del Agua INEGI-CONAGUA (2015) Anuario Estadístico Querétaro de Arteaga. México.
- Jimenez C.B. (2010) La contaminación ambiental en México, Ed. Limusa. México.
- Jonsson, A., Eklund, M. y Hakansson, K. (1997) Heavy metals of the 20th century recorded in oak tree rings. *J Environ Qual* 26: 1638-1643.
- Kheboian, C. y Bouer, C. (1987) Accuracy of selective extraction procedures for metal speciation in model aquatic sediments. *Anal. Chem.* 59, 1417-1423.
- Killeen, T., García, E. y Beck, S. (1993) Guía de árboles de Bolivia. Herbario Nacional de Bolivia Missouri Botanical Garden
- Kitzberger, T., Veblen, T. y Villalba, R. (1995) Tectonic influences on tree growth in northern Patagonia, Argentina: the roles of substrate stability and climatic variation. *Can. J. Res.* 25: 1684-1696.
- Kuniholm, P. (2001) Dendrochronology and other applications of tree-ring studies in Archaeology. *The Handbook of Archaeological Sciences*, John Wiley & Sons.
- Larson, P. (1994) *The vascular cambium: development and structure*. Springer, Berlin.
- Legge, A., Kaufmann, H. y Winchester, J. (1984) Tree ring analysis by PIXE for a historical record of soil chemistry response to acidic air pollution. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*3, 507-510.

- Lepp, N. y Dollar, G. (1974) Studies on the behavior of lead in wood. Binding of free and complexed  $^{210}\text{Pb}$  to xylem tissue. *Oecologia* 16: 369-373.
- Lepp, N. (1975) The potential of tree-ring analysis for monitoring heavy metal pollution patterns. *Environ. Pollut.* 9, 49-60.
- Linares, J., Camarero, J. y Carreira, J. (2009) Plastic responses of *Abies pinsapo* xilogenesis to drought and competition. *Tree Physiol* 29:1525-1536.
- López Dominguez, M. (2009) *Distribución y fitodisponibilidad de metales pesados (Sb, Hg, As) en los jales de la mina de antimonio de Wadley, Estado de San Luis Potosí.* (Tesis de maestría inédita). Centro de Geociencias. Querétaro. México.
- López, P. (2015) Suelo contaminado. *Diario de Querétaro*. Recuperado de <http://www.oem.com.mx/diariodequeretaro/notas/n3941329.htm>
- Lukaszewski, Z., Siwecki, R., Opydo, J. y Zembruski, W. (1988) The effect of industrial pollution on zinc, cadmium, and copper concentration in the xylem ring of Scot's pine and in the soil. *Trees* 2: 1-6.
- Lupi, C., Morin, H., Deslauriers, A. y Rossi, S. (2010) Xilem phenology and wood production; resolving the chicken-or-egg dilemma. *Plant Cell Environ* 33:1721-1730.
- Medeiros, J., Tomazello, M., Krug, F. y Vives, A. (2008) Tree-ring characterization of *Araucaria columnaris* Hook and its applicability as a lead indicator in environmental monitoring. *Dendrochronologia* 26: 165-171.
- Mancilla-Villa, O., Ortega-Escobar, H., Ramírez-Ayala, C., Uscanga-Mortera, E., Ramos-Bello, R. y Reyes-Ortigoza, A. (2012) Metales pesados totales y arsénico en el agua para riego en Puebla y Veracruz, México. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 28, 39-48.
- Manziona, M. y Merrill, D. (1989) Trace metal removal by iron co-precipitation: Field evaluation. Electric Power Research Institute. Report GS-6438.
- Martin, T., Brockhoff, J., Creed, J. y EMMC Method Work Group (1994) Method 200.7 Revision 4.4. Ohio. U.S.
- Martínez, A. 1999. El ahuehuete. *Biodiversitas* 5(25):12-14.

- Martinez-Meier, A., Sanchez, L., Pastorino, M., Gallo, L. y Rozenberg, P. (2008) What is hot in tree rings? The wood density of surviving Douglas-firs to the 2003 drought and heat wave. *For Ecol Manag* 256:837-843.
- Masiokas, M. y Villalva, R. (2004) Climatic significance of intra-annual bands in the Wood of *Nothofagus pumilio* in southern Patagonia. *Trees (Berl)* 18:696-704. doi: 10.1007/s00468-004-0355-6
- McCarrol, D. y Loader, N. (2004) Stable isotopes in tree rings. *Quaternary Science Reviews* 23, 771-801.
- Meisch H., Kessler, M., Reinle, W. y Wagner, A. (1986) Distribution of metals in annual rings of the beech (*Fagus sylvatica*) as an expression of environmental changes. *Experientia* 42: 537-542.
- Meya, D., Gonzalez, J. y Avnos, A. (2001) Evolución del crecimiento radial en un rodal adulto de *Pinus nigra* Arn. De la provincia de Lleida. *Inv. Agrar. Sist. Recur. For.* 10(1) 96-110.
- Momoshima, N. y Bondietti, E. (1990) Cation binding in Wood: applications to understanding historical changes in divalent cation availability to red spruce. *Can J For Res* 20: 1840-1849.
- Morton-Bermea, O., Beramendi-Orosco, L., Martínez-Reyes, A., Hernández-Álvarez, E. y González-Hernandez, G. (2015) Increase in platinum group elements in Mexico City as revealed from growth rings of *Taxodium mucronatum* Ten. *Environ Geochem Health.* 38, 195-202.
- Mughini, G., Alianiello, F., Benedetti, A., Mughini, L., Gras, M. y Salvati, L (2013) Clonal variation in growth, arsenic and heavy metal uptakes of hybrid *Eucalyptus* clones in a Mediterranean environment. *Agroforest Sys* 87, 755-766
- Nabais, C., Freitas, H. y Hagemeyer, J. (1999) Dendroanalysis: a tool for biomonitoring environmental pollution? *Sci. Total Environ.* 232: 33-37.
- Nebel, B., y Wright, R. (1999) *Ciencias ambientales. Ecología y desarrollo sostenible*, Ed. Pearson, México.
- Nicault A., Rathgeber, C., Tessier, L. y Thomas, A. (2001) Intra-annual variations of radial growth and ring structure. *Ann For Sci* 58: 769-784.

- Novak, M., Mikova, J., Krachler, M., Kosler, J., Erbanova, L., Prechova, E., Jackova, I. y Fottova, D. (2010) Radial distribution of lead and lead isotopes in stem wood of Norway spruce: A reliable archive of pollution trends in Central Europe. *Geochim. Cosmochim. Acta* 74, 4207-4218.
- Nicholson, K. y Branson, J. (1993) Lead concentration in UK urban air. *Atmos. Environ.* 27, 265-268.
- Okada, N., Katayama, Y., Nobuchi, T., Ishimaru, Y. y Aoki, A. (1990) Trace elements in the stems of trees IV. Radial distribution in mizunara (*Quercus mongolica* var. *grosseserrata*). *Mokuzai Gakkaishi* 36:93-97.
- PNUMA, CONCYTEQ y SEDESU (2008) *Perspectivas del Medio Ambiente Urbano: GEO Zona Metropolitana Querétaro*. 58 -65.
- Prasad, M. (2001) *Metals in the Environment: Analysis by Biodiversity*. Marcel Dekker. Estados Unidos de América.
- Ponchner, S., Rojas, R. y Bornemisza, E. (1993) Variación estacional de nutrientes en árboles de mango (*Mangifera indica*) en tres suelos del Pacífico seco de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 17 (2), 31-27.
- Prenzel, J. (1979) Mass flow to the root system and mineral uptake of a beech stand calculated from 3-year field data. *Plant and soil* 51: 39-49.
- Prohaska, T., Stadlbauer, C., Wimmer, R., Stinger, G., Latkoczy, C. (1998) Investigation of element variability in tree rings of Young Norway spruce by laser-ablation-ICPMS. *Sci. Total Environ* 219, 1, 29-39.
- Punshon, T. (2003) Geochemical signature of contaminated sediment remobilization revealed by spatially resolved X-ray microanalysis of annual rings of *Salix nigra*. *Environ. Sci. and Technol.* 37, 1766-1774.
- Rathgeber, C., Rossi, S. y Bontemps, J. (2011) Cambial activity related to tree size in a mature silver-fir plantation. *Ann. Bot.* 108:429-438.
- Rossi, S., Deslauriers, A., Anfodillo, T. y Carrer, M. (2008) Age-dependent xylogenesis in timberline conifers. *New Phytol.* 177:199-208.
- Riechman, M. (2002) The responses of plants to metal toxicity: A review focusing on copper, manganese and zinc. *Austral. Min. En. Environ. Found.* 54 p.

- Rooney, C., Zhao, F. y McGrath, S. (2006) Soil factors controlling the expression of copper toxicity to plants in a wide range of European soils. *Environ. Toxicol. Chem.* 25, 726-732.
- Robitaille, G. (1981) Heavy-metal accumulation in the annual rings of balsam fir. *Environ. Pollut. (Series B)* 2: 193-202.
- Rosemberg, D. y Resh, V. (1993) Freshwater Biomonitoring and Benthic Macroinvertebrate. *Publicación.* 420: 330-354.
- Rzedowski, J. 1978. *Vegetación de México.* Limusa, México, D.F. 432 p.
- Sauter, J. y Van Cleve, V. (1992) Seasonal variation of amino acids in the xylem sap of *Populus x Canadensis* and its relation to protein body mobilization. *Trees* 7: 26-32.
- SEMARNAT (2009) Programa especial del cambio climático 2008-2012. Poder Ejecutivo Federal.
- Sheppard, J. y Funk, W. (1975) Trees as environmental sensors monitoring long-term heavy metal contaminations of Spokane River, Idaho. *Environ. Sci. Technol.* 9, 638-642.
- Sheppard, P. y Witten, M. (2005) Lasser trimming tree-ring cores for dendrochemistry of metals. *Tree-ring Res.* 61 (2), 87-92.
- Silveira, M., Alleoni, L. y Guilherme, L. (2003) Biosolids and heavy metals in soils. *Sci. Agr.* 60, 793-806.
- Smith, K. y Shortle, W. (1996) Tree biology and dendrochemistry. *Radiocarbon* 629-635.
- Stahle, D. y Cleaveland, M. (1992) Reconstruction and analysis of spring rainfall over the Southeastern U.S. for the past 1000 years. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 73: 1947-1961
- Stahle, D. (1999) Useful strategies for the development of tropical tree-ring chronologies. *IAWA Journal* 20(3):249-253.
- Stahle, D., Burnette, D., Villanueva, J., Heim, R., Fye, F., Cerano, J, Acuna, R. y Cleaveland, M. (2011) Pacific and atlantic influences on Mesoamerican

- climate over the past millennium. *Clim. Dyn.* DOI 10.1007/s00382-011-1205-z
- Stahle, D., Villanueva, J., Burnette, D., Cerano, J. y Heim, R. (2011) Major Meosamerican droughts of the past millennium. *Geophys. Res. Lett.* 38. doi: 10.1029/2010GL046472
- Stokes, M. y Smiley, T. (1968) *An introduction to tree-ring dating.* Tucson: University Arizona Press. 73 p.
- Taniguchi, N. (1995) Effects of air pollution on ring-width of sugi (*Cryptomeria japonica*) in Hokuriku area. In: FFPRI (Ed.), *International Workshop on Asian and Pacific Dendrochronology.* Tsukuba, Japan, pp. 222-227.
- Tendel, J. y Wolf, K. (1988) Distribution of nutrients and trace elements in annual rings of pine trees (*Pinus silvestris*) as an indicator of environmental changes. *Experientia* 44:975:980.
- Tommasini, S., Davis, G. y Elliott, T. (1999) Lead isotope composition of tree rings as bio-geochemical tracers of heavy metal pollution: a reconnaissance study from Firenze, Italy. *Appl. Geochem.* 15, 891-900.
- Uggla, C., Magel, E., Moritz, T. y Sundberg, B. (2001) Function and dynamics of auxin and carbohydrates during earlywood/latewood transition in Scots pine. *Plant Physiol.* 125:2029-2039.
- Vaganov, E., Vysotskaya, L. y Shashkin, A. (1996) Using cell chronologies in seasonal tree growth analysis and dendroclimatology. *Tree rings, environmental and humanity.* Eds. Dean JS, Meko DM, Swetnam TW. *Radiocarbon*, Tucson, pp 95-106.
- Vieira, J., Campelo, F. y Nabais, C. (2009) Age-dependent responses of tree-ring growth and intra-annual density fluctuations of *Pinus pinaster* to Mediterranean climate. *Trees* 23: 257-265.
- Villalva, R. y Veblen, T. (1994) A tree-ring record of dry spring wet summer events in the dorest-steppe ecotone northern Patagonia, Arentina. In: Dean JS, Meko DM, Swetnam TW (eds) *Tree rings environment and humanity.* *Radiocarbon.* Spec. issue, pp 107-116.

- Villanueva, J., Cerano, J., Stahle, D., Therrell, M., Cleaveland, M. y Sánchez, I., (2004) Elementos básicos de la dendrocronología y sus aplicaciones en México. Folleto técnico No. 2. INIFAP CENID-RASPA. Gómez Palacio, Durango, 37p
- Villanueva, J., Luckman, B., Stahle, D., Therrell, M., Cleaveland, J., Cerano, J., Gutierrez, G., Estrada, J. y Jasso, R. (2005) Hydroclimatic variability of the upper Nazas basin: Water management implications for the irrigated area of the Comarca Lagunera, México. *Dendrochronologia*. 22: 215-223.
- Villanueva, J., Cerano, J., Stahle, D., Constante, V., Estrada, J. (2010) Estandarización y desarrollo de series dendrocronológica en México. Folleto técnico No.16 INIFAP CENID-RASPA. Gómez Palacio, Durango. 55p.
- Watmough, S. y Hutchinson, T. (1999) Analysis of tree rings using inductively coupled plasma mass spectrometry to record fluctuations in a metal pollution episode. *Environ. Pollut.* 93, 93-102.
- Wiedenhoef, A. (2010) Structure and Function of Wood. In: Forest Products Laboratory. Wood handbook. Wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory: 3-1—3-18. Chapter 3.
- Wimmer, R., Strumia, G. y Holawe, F. (2000) Use of false rings in Austrian pine to reconstruct early growing season precipitation. *Can. J. For. Res.* 30:1691-1697.
- Witte, K., Wanty, R. y Ridley, W. (2004) Engelmann Spruce (*Picea engelmannii*) as a biological monitor of changes in soil metal loading related to past mining activity. *Appl. Geochem.* 19, 1367-1276.
- Yanosky, T. y Vroblesky, D. (1992) Relation of nickel concentration in tree rings to groundwater contamination. *Water resources Res* 28: 2077-2083.

## ANEXOS

### Anexo I – Método de Morton-Bermea

Se llevó a cabo el método usado por Morton-Bermea et al. (2015) en el artículo *Increase in platinum group elements in Mexico City as revealed from growth rings of Taxodium mucronatum Ten.*

Para el procedimiento de pre-digestión, cerca de 0.5g de madera se colocaron en vasos de Teflón donde se adicionaron 10ml de HNO<sub>3</sub>. Después de tres horas se agregaron 3ml de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y la mezcla se dejó toda la noche.

La mezcla fue sometida a digestión con ayuda de un microondas Ethos One (Millipore) equipado con un sistema de rotor para 10 vasos de teflón (PRO-24). El proceso de digestión alcanzó una temperatura de 180°C en 25 minutos y después se mantuvo por 15 minutos. Después del enfriamiento, la solución restante fue transferida a un volumen de 100ml con 2% de HNO<sub>3</sub> (v/v).

La concentración de metales fue cuantificada por el equipo ICP-MS (Icap Q Thermo Scientific, Germany) en el Instituto de Geofísica de la UNAM.

Los límites de detección fueron calculados como tres veces la desviación estándar de diez réplicas del blanco para Pt, Pd y Rh. Se utilizó material de referencia BCR-723 de polvo de carretera (road dust reference material) por su verificación analítica dada por las tasas de recuperación de PGE (platinum group elements) debido a que no existe un material de referencia para madera.

Los núcleos se obtuvieron con un taladro de 12mm, se colocaron en tubos de vidrio y se transportaron. Se secaron durante 48 horas a 60°C y se montaron en bases de madera y se lijaron usando lijas de (400 a 1500) para exponer las estructuras celulares. Se dividieron en segmentos de cinco años con un cincel de acero inoxidable, las muestras secadas fueron introducidas en un molino fino de bolas de ágata micro mili.

## Anexo II.

### Gráficas de concentraciones en Barranca de Amealco

Cabe mencionar que se elaboraron gráficos de todos los elementos que tuvieron una concentración mayor a los L.D. y L.C., sin embargo, decidieron incluirse en el anexo porque no representaban tendencias comparables entre ambos sitios como en el caso del Al y Ba que solo estaban en Barranca de Amealco o Si que sólo estaba en Calesa.

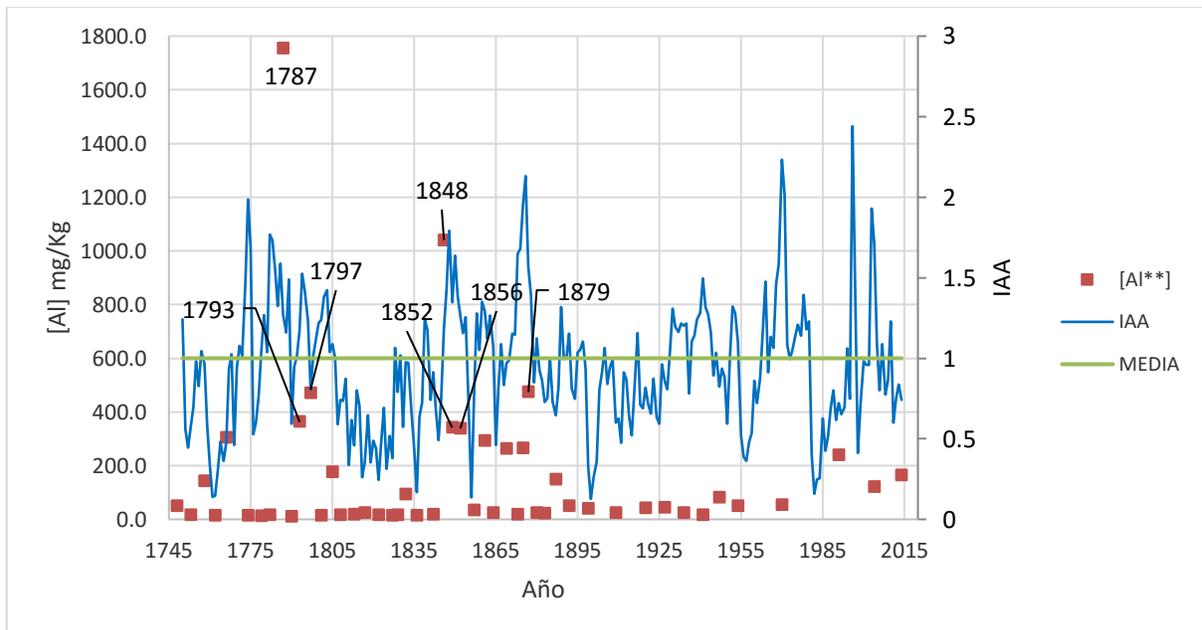


Figura A.1. Comparativo de las tendencias elementales de Al, con el índice de ancho de anillo (IAA) en el sitio de Barranca de Amealco

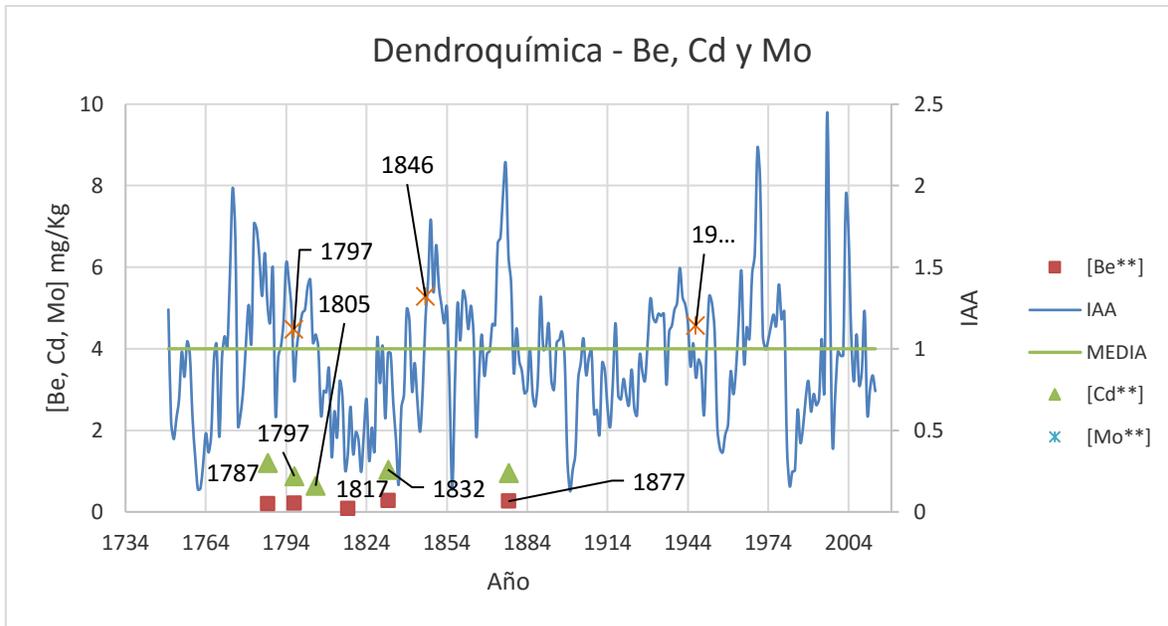


Figura A.2. Comparativo de las tendencias elementales de Be, Cd, Mo con el índice de ancho de anillo (IAA) en el sitio de Barranca de Amealco

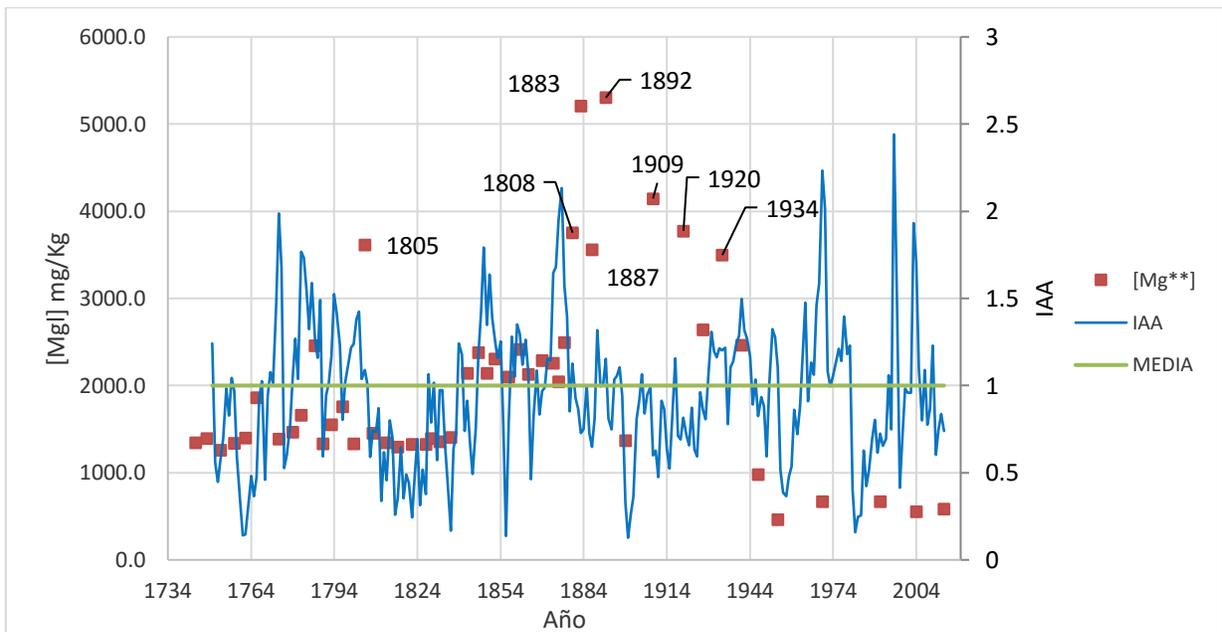


Figura A.3. Comparativo de las tendencias elementales de Mg, con el índice de ancho de anillo (IAA) en el sitio de Barranca de Amealco

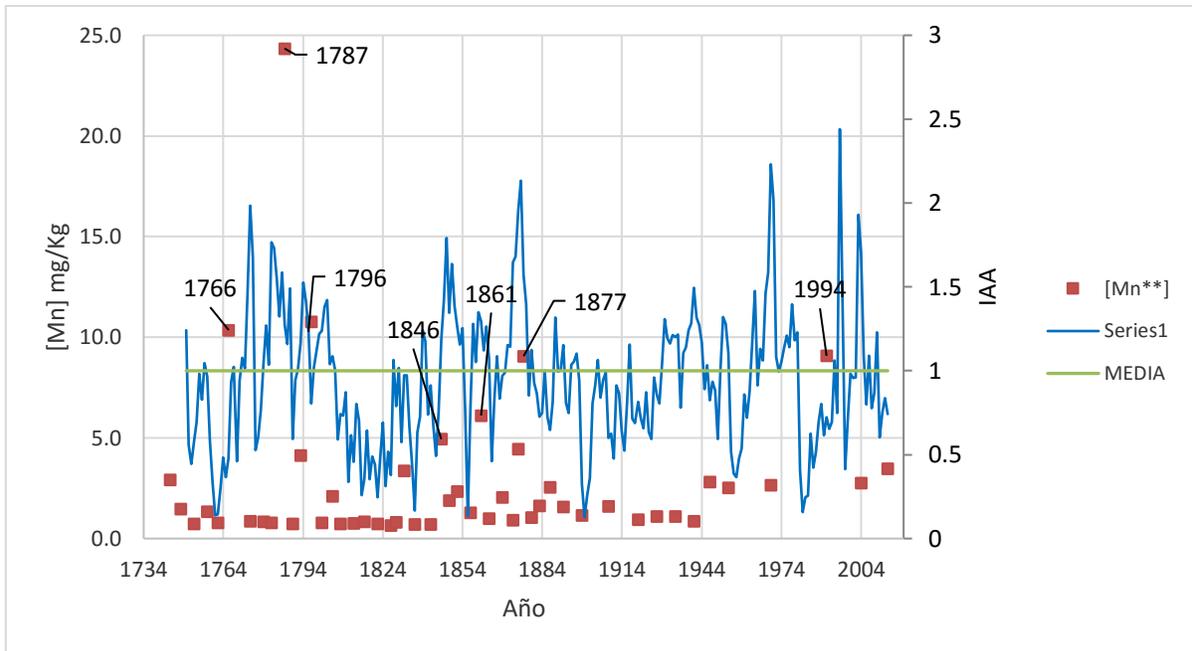


Figura A.4. Comparativo de las tendencias elementales de Mn, con el índice de ancho de anillo (IAA) en el sitio de Barranca de Amealco

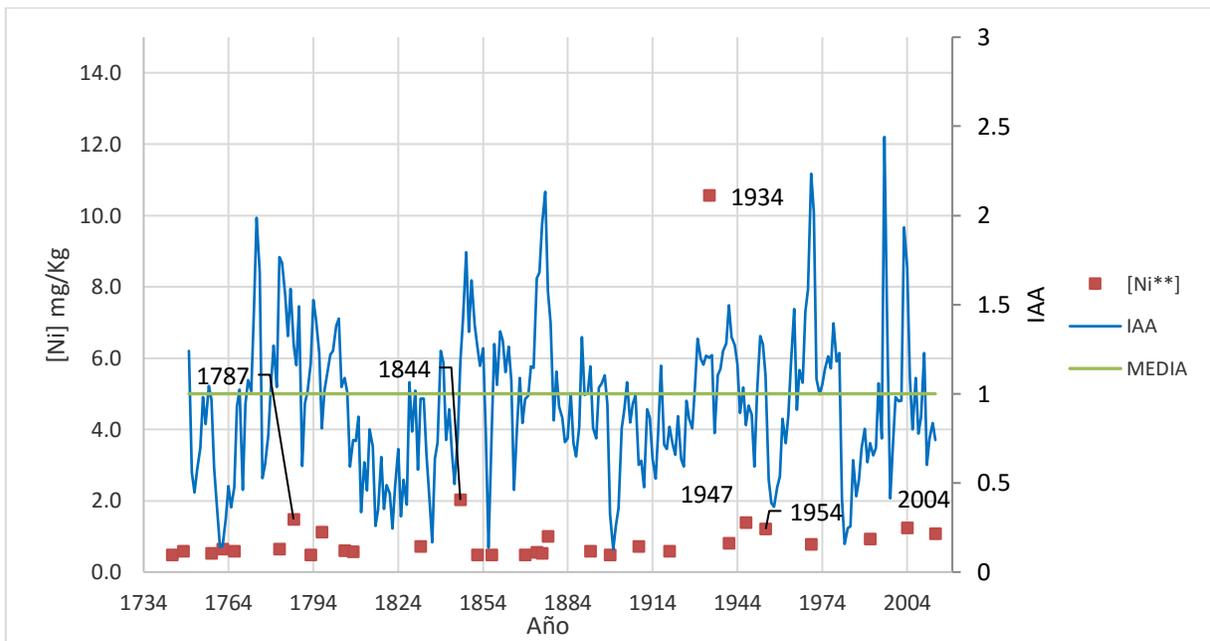


Figura A.5. Comparativo de las tendencias elementales de Ni, con el índice de ancho de anillo (IAA) en el sitio de Barranca de Amealco.

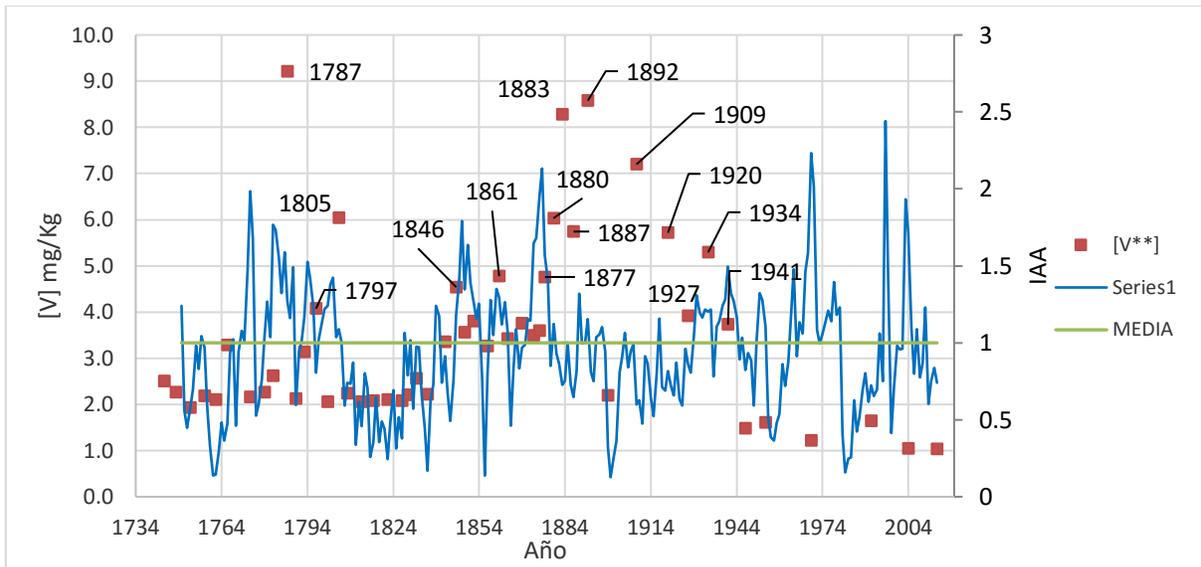


Figura A.6. Comparativo de las tendencias elementales de V, con el índice de ancho de anillo (IAA) en el sitio de Barranca de Amealco

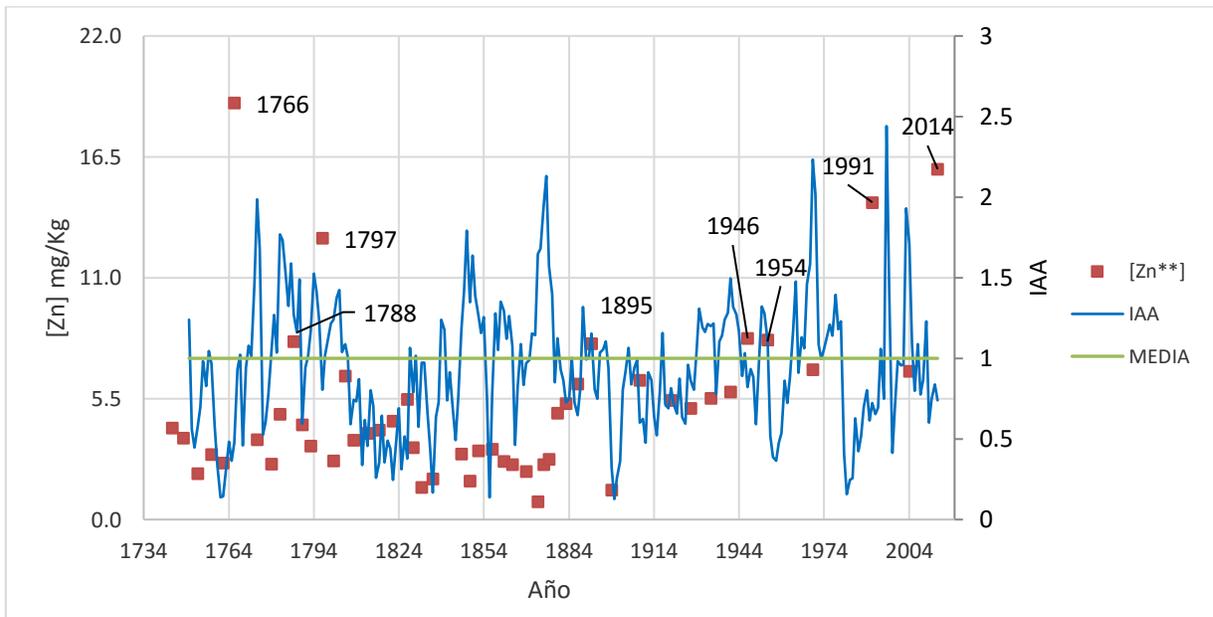
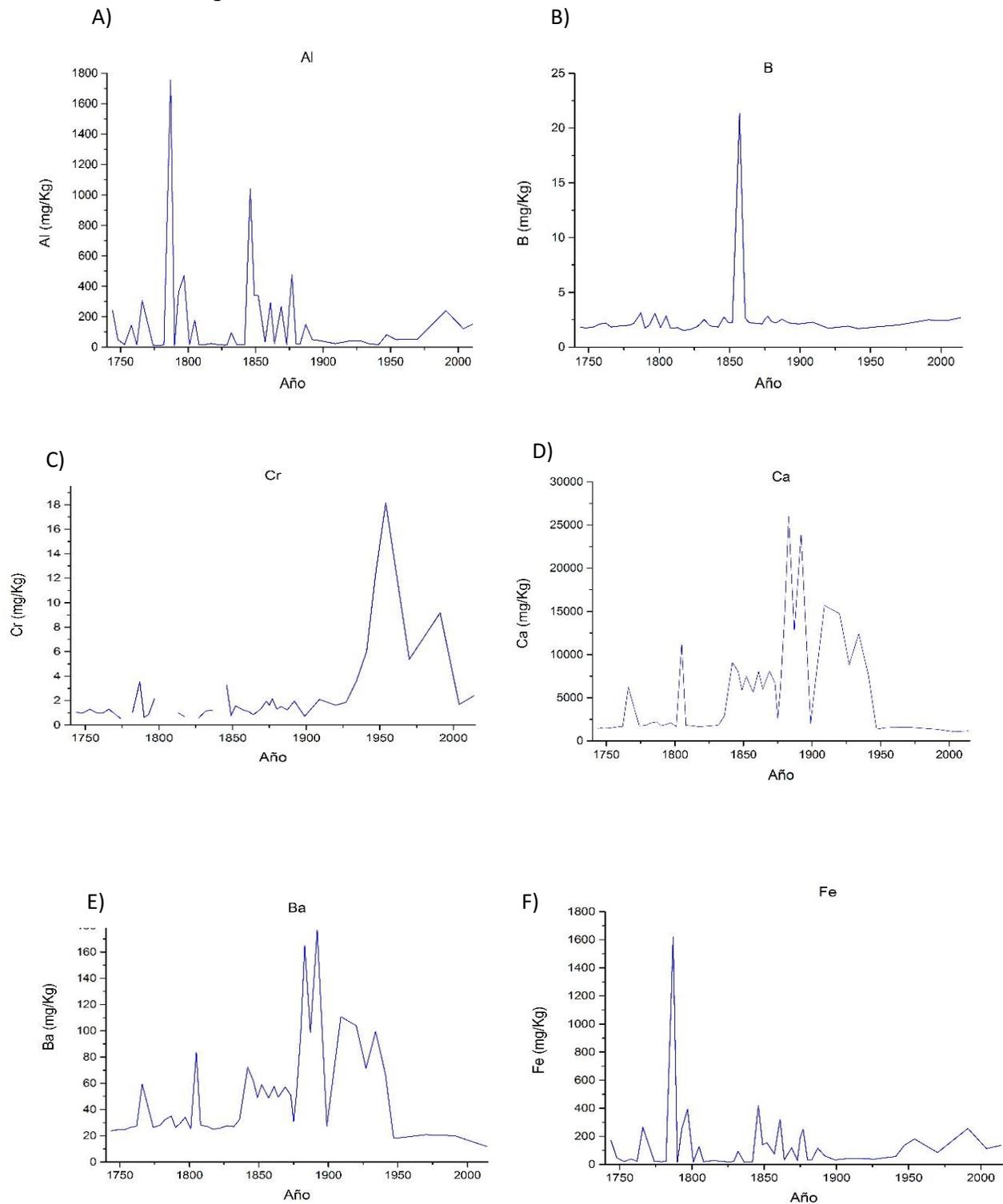


Figura A.7. Comparativo de las tendencias elementales de Zn, con el índice de ancho de anillo (IAA) en el sitio de Barranca de Amealco

Posteriormente, se colocaron únicamente las concentraciones obtenidas para evaluar las tendencias de estos a través del tiempo. Como se puede observar en las figuras A.8



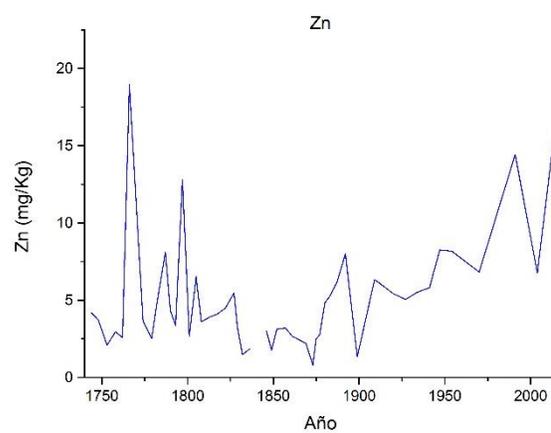
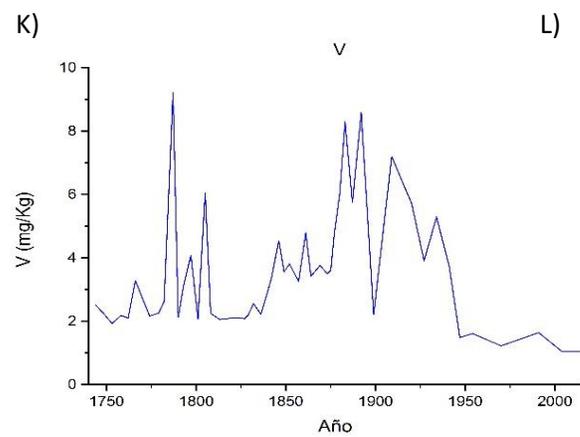
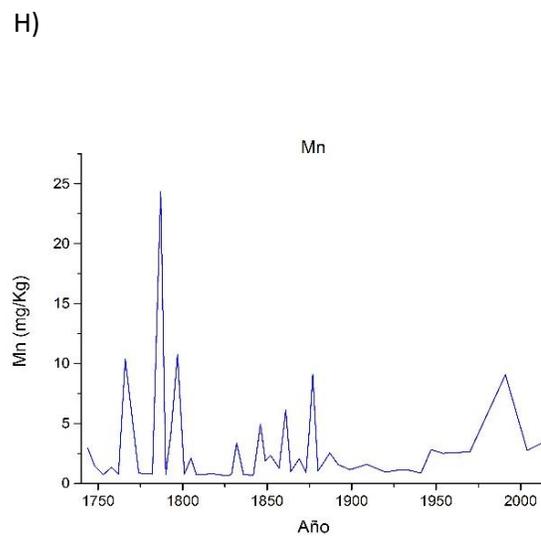
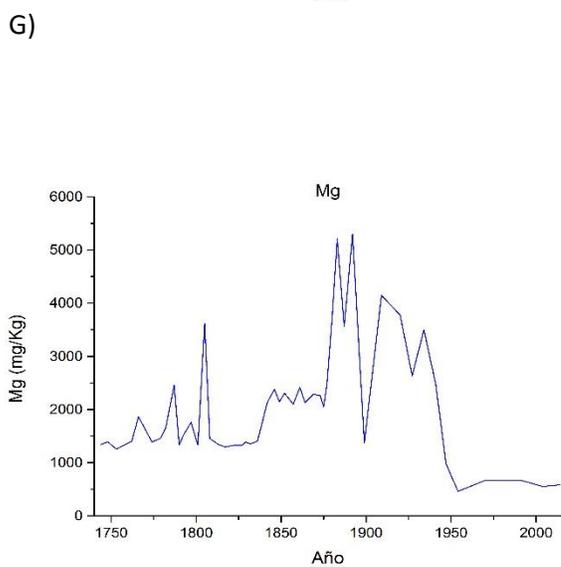
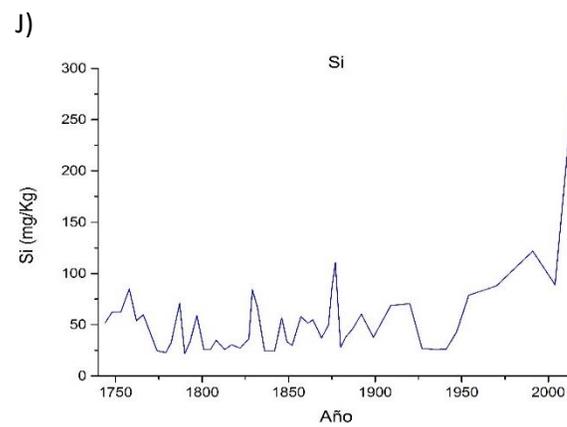
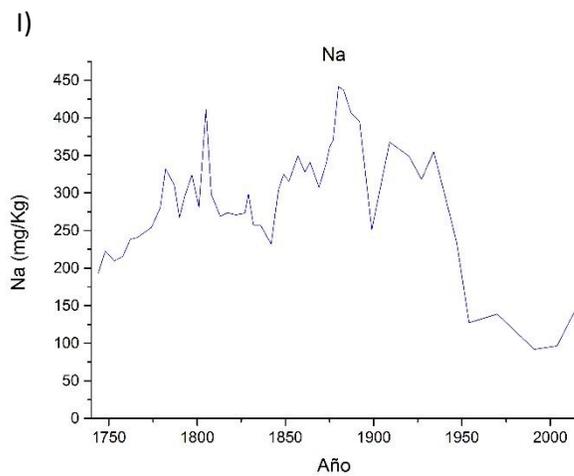


Figura A.8 Concentraciones elementales de Barranca de Amealco. A) Aluminio, B) Boro, C) Bario, D) Calcio, E) Cromo, F) Hierro, G) Magnesio, H) Manganeso, I) Sodio, J) Silicio, K) Vanadio y L) Zinc.

En las gráficas de la figura A.8 se observan las concentraciones elementales obtenidas mediante el ICP-OES, la figura A) muestra la variación de Al a través del tiempo desde 1744 hasta el 2014 y se tiene que las concentraciones más altas corresponden a los periodos de 1787, 1793, 1797, 1848, 1852, 1856 y 1879. La figura B) muestra la variación del B, se observa una tendencia lineal con ciertos incrementos ligeros en la concentración en los periodos de 1787, 1797 y 1805 y un pico de muy alta concentración en los años correspondientes al 1857 (1853 – 1857), después de eso es lineal. La figura C) muestra la tendencia del Ba, esta tiene grandes variaciones y las concentraciones fluctúan entre 11.9 y 176.6mg/kg, los periodos que tienen mayores concentraciones son 1805, 1842, 1883, 1892, 1909 y 1934.

En cuanto al Ca del inciso D) se observa una tendencia muy similar que el Ba, con concentraciones variables a lo largo de la cronología, los picos más importantes son los de los periodos de 1776, 1805, 1942, 1946, 1852, 1861, 1869, 1880, 1883, 1887, 1892, 1909, 1920 y 1934. En el inciso E) se muestra la tendencia del Cr, las concentraciones están incompletas antes de 1899 debido a que las no todos los datos obtenidos sobrepasaron los límites de detección y cuantificación, sin embargo se puede recuperar que las concentraciones más altas corresponden a los periodos 1787, 1846, 1934, 1947, 1954 y 1991.

El inciso F) muestra la tendencia del Fe, la cual tiene importantes variaciones hasta 1900 (1900-1909) donde solo se aprecian dos incrementos en la concentración después de 1947. Las concentraciones más altas corresponden a los periodos de 1766, 1787, 1797, 1846, 1861, 1877, 1954 y 1991. En el inciso G), la concentración del Mg se encuentra entre 461 y 5,303mg/kg, se tienen variaciones marcadas y sus concentraciones más altas son en los periodos de 1787, 1805, 1846, 1861, 1877, 1880, 1883, 1887, 1892, 1909, 1920, 1927, 1934 y 1941, a partir de 1947 se tiene una baja importante que permanece estable hasta el 2014.

El inciso H) muestra la tendencia del Mn, esta tiene variaciones importantes en las concentraciones que van desde 0.6 hasta 24.3mg/kg, siendo las mayores las representativas de los periodos 1766, 1787, 1797, 1832, 1846, 1861, 1875, 1877 y 1991. El inciso I) muestra la concentración del Na, no se tiene alguna tendencia y las concentraciones se encuentran entre 91 y 441mg/kg, los puntos más relevantes están en los periodos de 1805, 1880, 1883, 1887, 1892 y 1920. En cuanto al Si del inciso J) se tienen concentraciones por debajo de 150mg/kg de 1749 hasta 1990, los periodos de 1758, 1787, 1829, 1832, 1877, 1920, 1991, 2004 y 2014 tienen las concentraciones más altas.

### Anexo III.

#### Gráficas de concentraciones en Calesa

Se muestran en la figura A.9- A.12 los gráficos faltantes del capítulo 5 correspondientes a las concentraciones del sitio de calesa con el IAA.

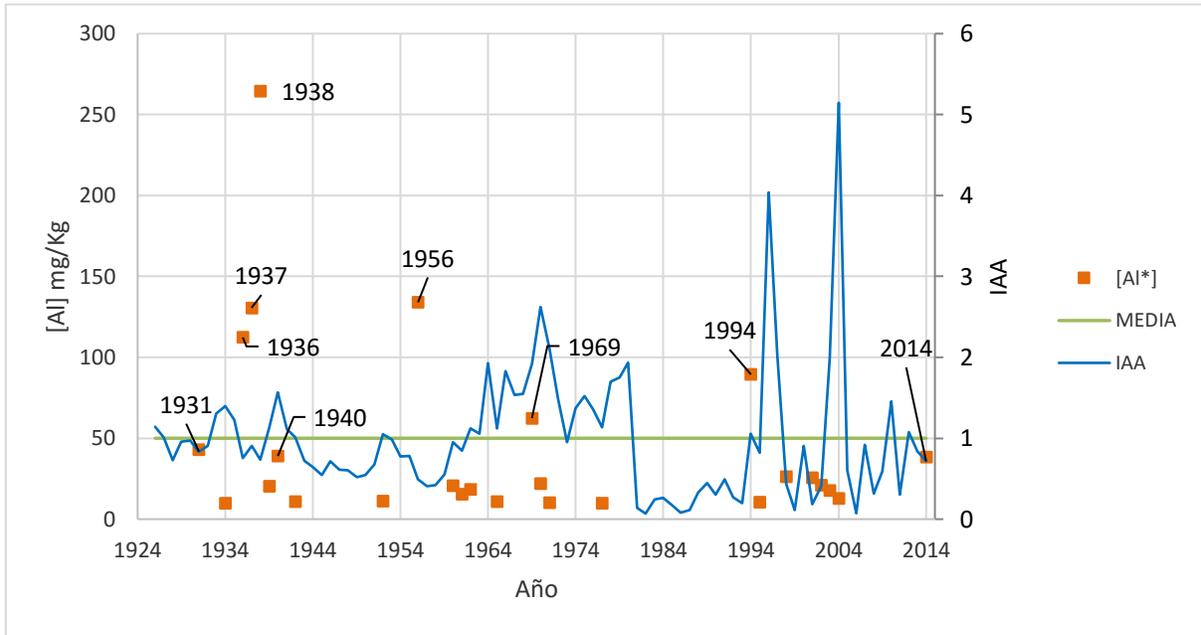


Figura A.9. Comparativo de las tendencias elementales de Al, con el índice de ancho de anillo (IAA) en el sitio de Calesa.

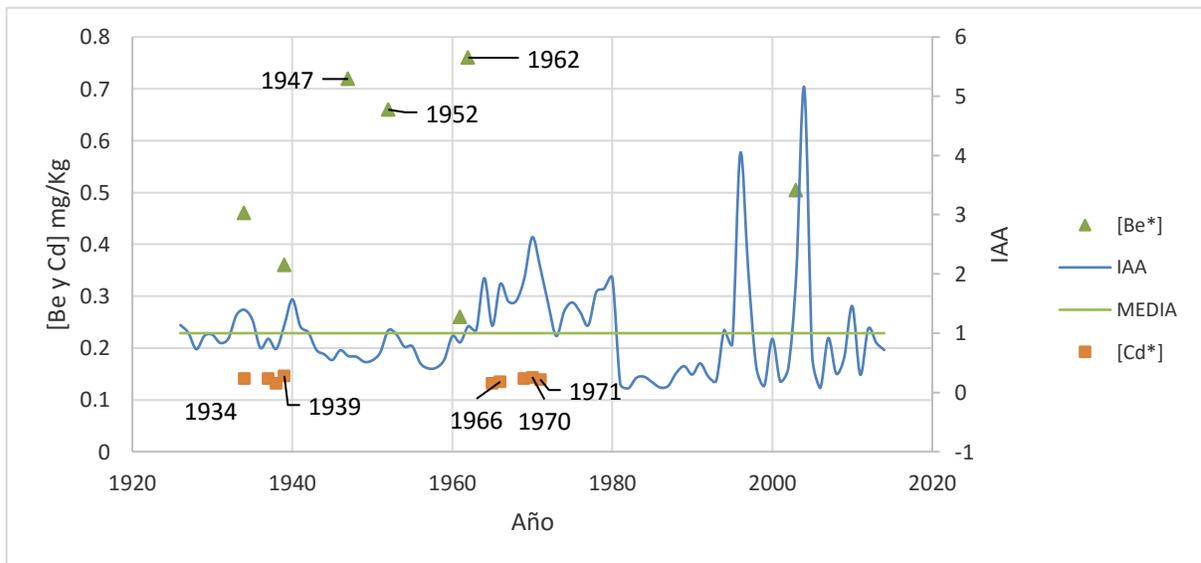


Figura A.10. Comparativo de las tendencias elementales de Be y Cd, con el índice de ancho de anillo (IAA) en el sitio de Calesa.

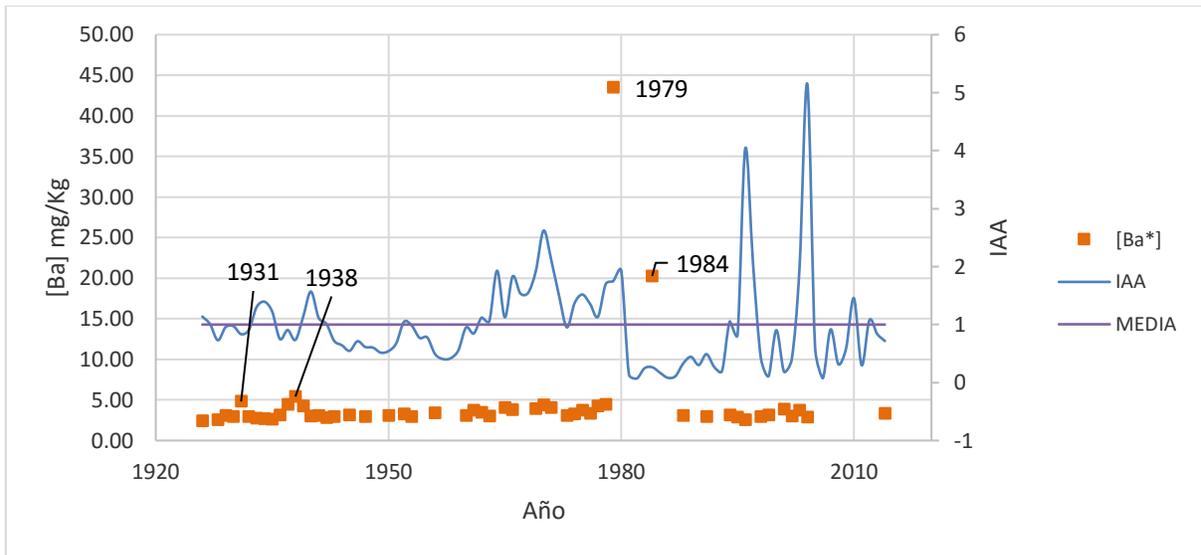


Figura A.11. Comparativo de las tendencias elementales de Ba, con el índice de ancho de anillo (IAA) en el sitio de Calesa.

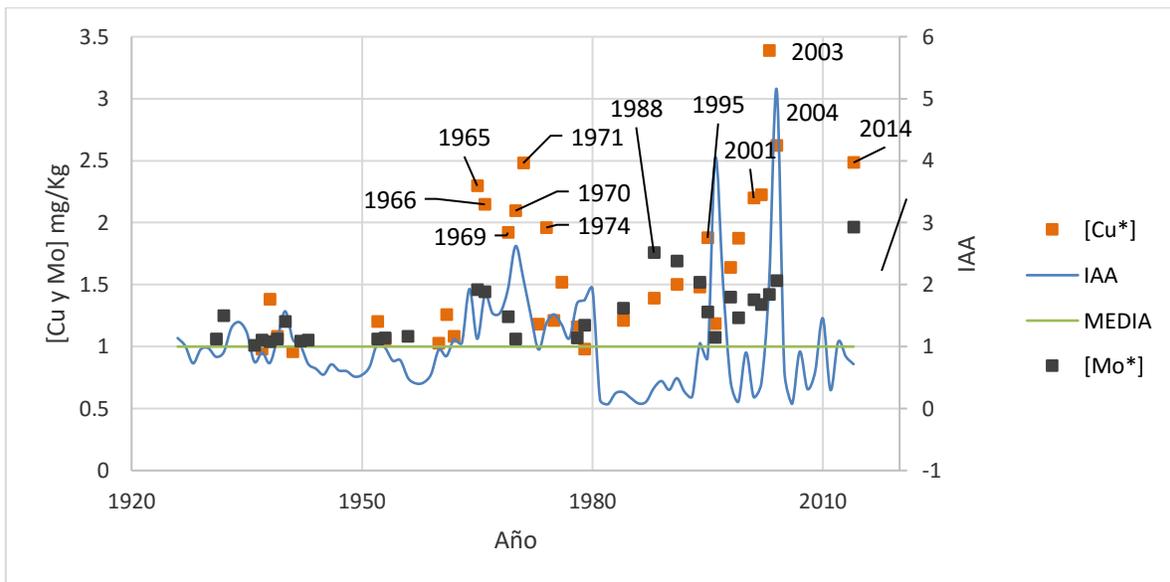


Figura A.12. Comparativo de las tendencias elementales de Cu y Mo, con el índice de ancho de anillo (IAA) en el sitio de Calesa.

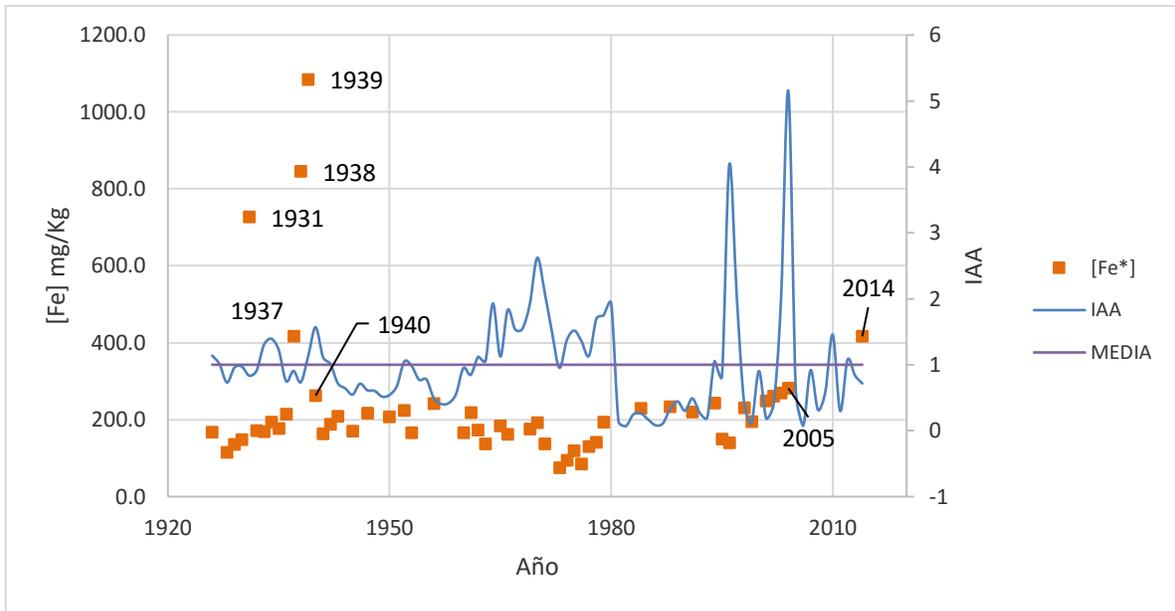


Figura A.13. Comparativo de las tendencias elementales de Fe, con el índice de ancho de anillo (IAA) en el sitio de Calesa.

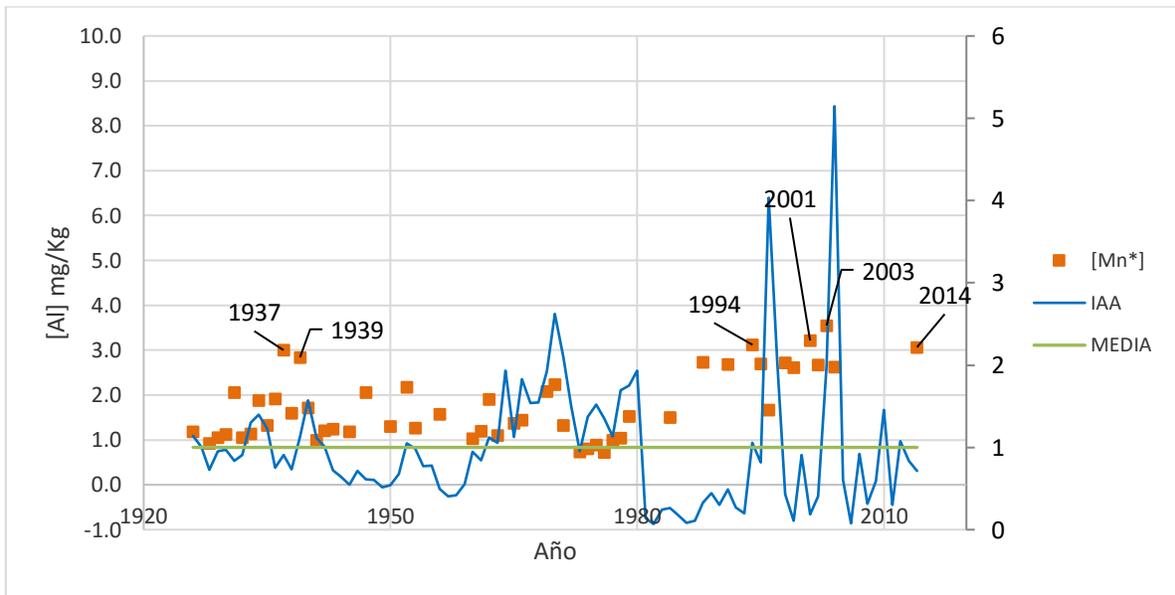


Figura A.14. Comparativo de las tendencias elementales de Mn, con el índice de ancho de anillo (IAA) en el sitio de Calesa.

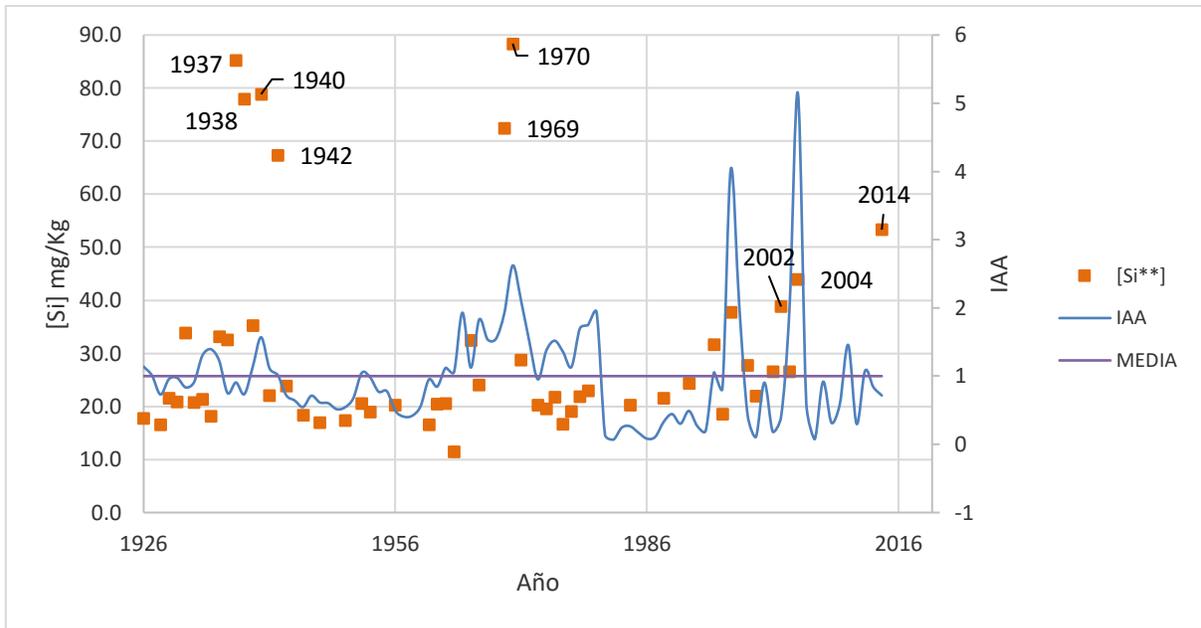


Figura A.15. Comparativo de las tendencias elementales de Si, con el índice de ancho de anillo (IAA) en el sitio de Calesa.

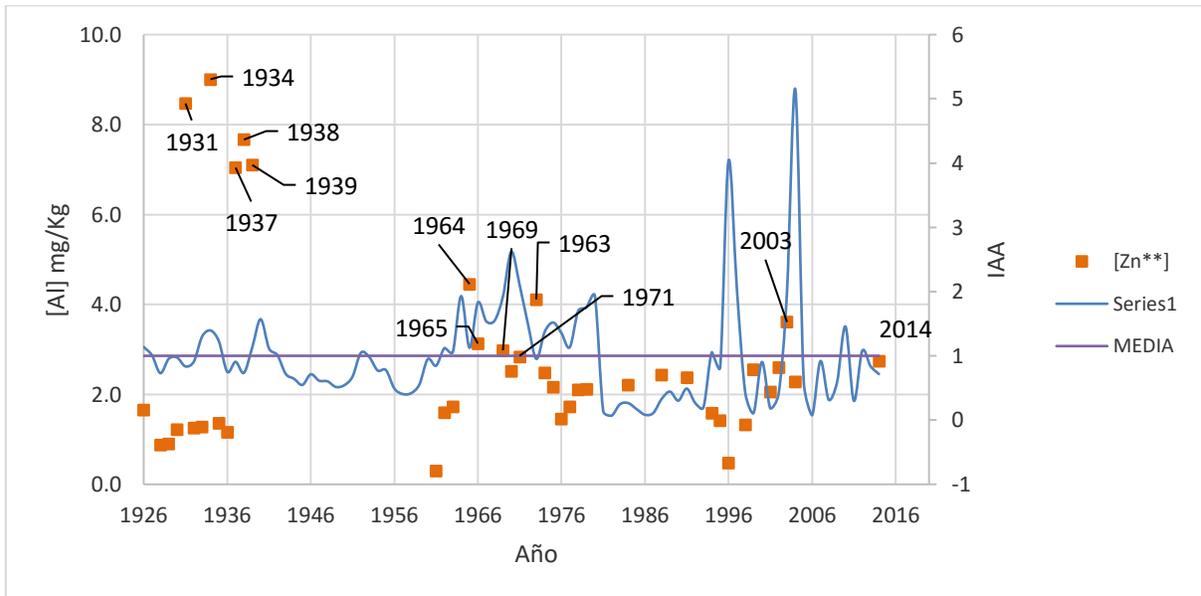
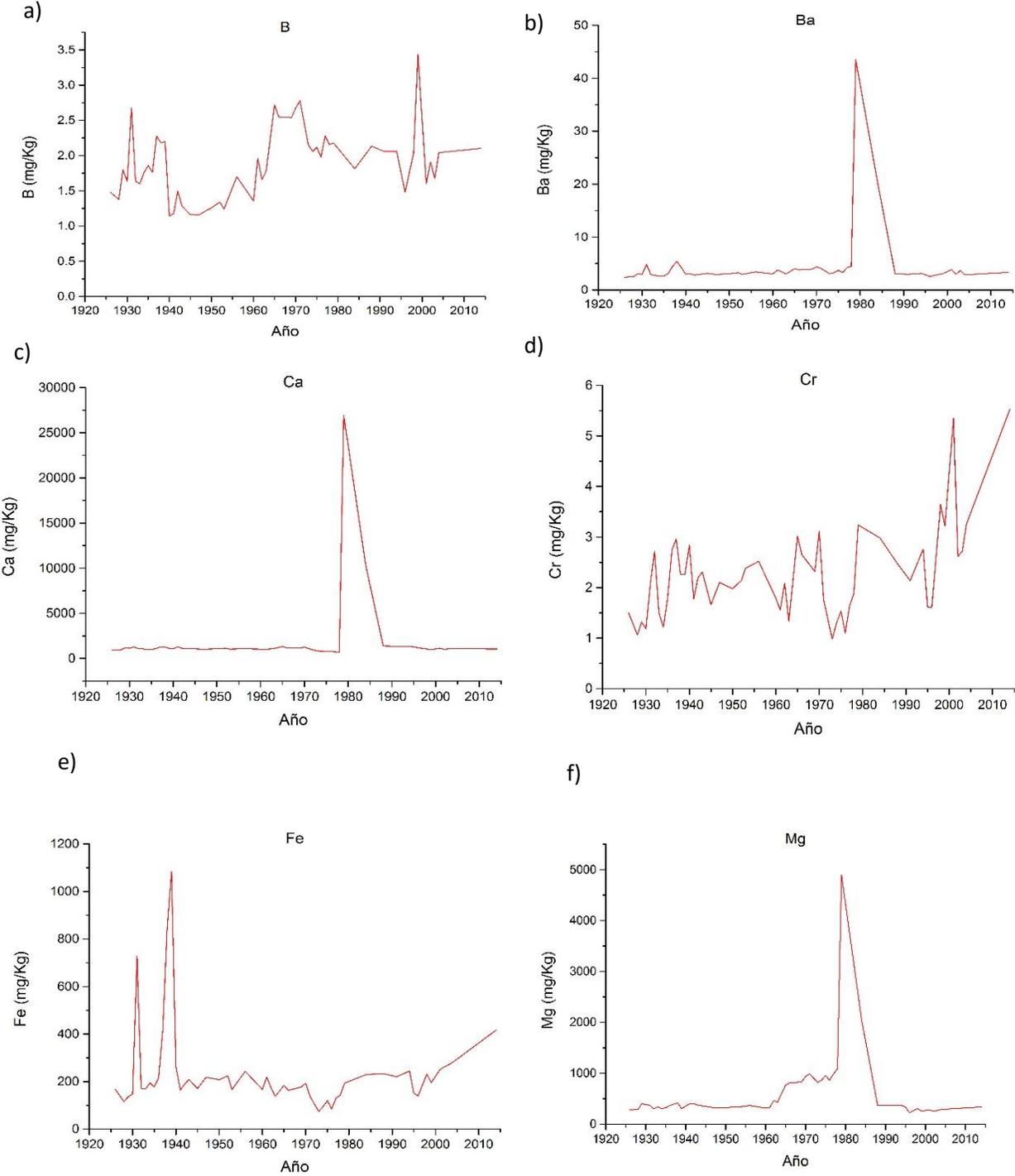


Figura A.16. Comparativo de las tendencias elementales de Zn, con el índice de ancho de anillo (IAA) en el sitio de Calesa.

Se buscaron analizar las tendencias de los elementos pero sin el IAA del sitio de Calesa para determinar el comportamiento por otras causales. Esto se puede observar en la figura A.17.



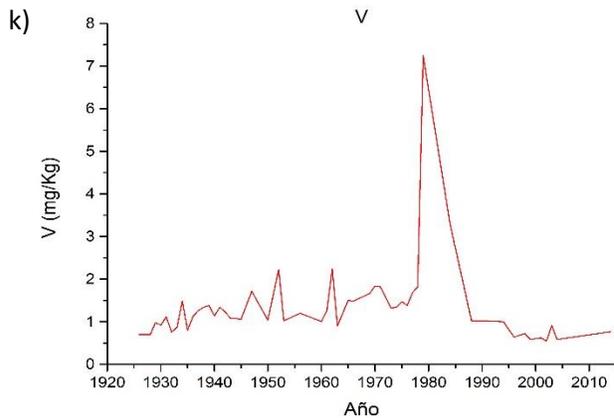
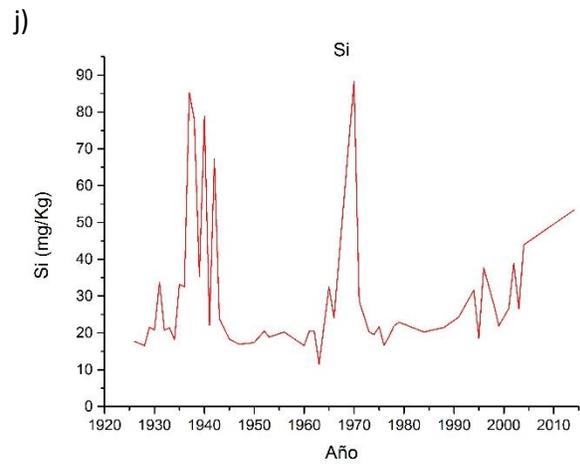
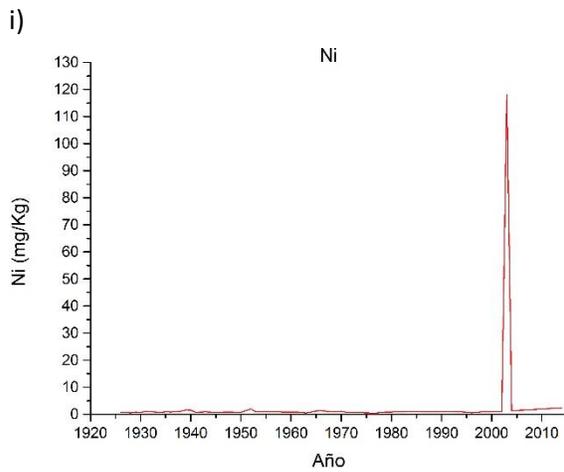
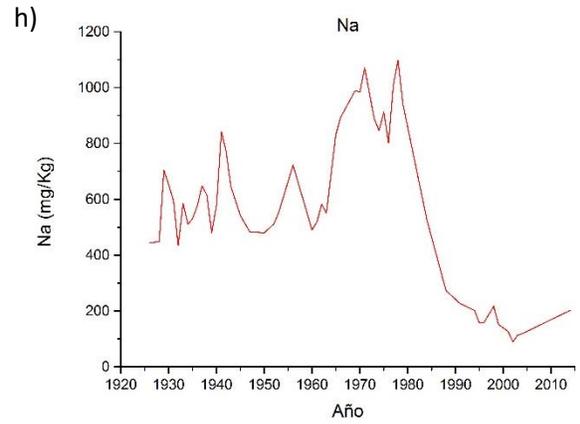
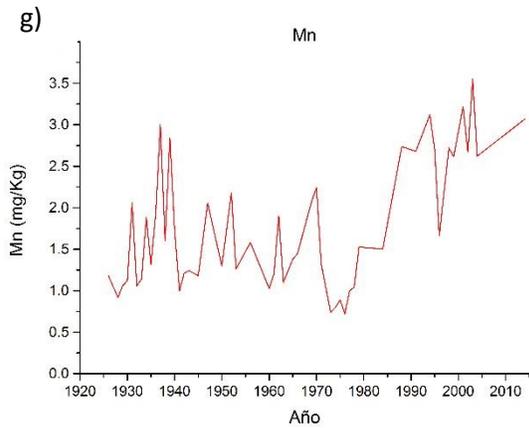


Figura A.17 Concentraciones elementales de Calesa. A) Boro, B) Bario, C) Calcio, D) Cromo, E) Hierro, F) Magnesio, G) Manganese, H) Sodio, I) Níquel, J) Silicio, K) Vanadio.

En las gráficas de la figura A.17 se observan las concentraciones elementales obtenidas mediante el ICP-OES, la figura A) muestra la variación de B a través del tiempo desde 1926 hasta el 2014 y se tiene que las concentraciones más altas están en el periodo de 1931, 1971 y 1999, la variación entre la concentración más baja y más alta va desde 1.1 a 3.4mg/kg. La figura B) muestra la variación del Ba, se observa una tendencia constante con un pico muy alto correspondiente a dos periodos 1979 y 1984 (1980-1984). La figura C) muestra la tendencia del Ca, de igual manera que con el Ba, se tiene tendencia lineal antes de 1979 y después de 1984, la concentración máxima es de 26,945mg/kg.

En cuanto al Cr del inciso D) no se observa una tendencia concreta pero si un aumento gradual con altas y bajas en periodos relativamente cortos, las concentraciones más altas se encuentran en los periodos de 1998, 2001 y 2014 y estas se encuentran entre 1 y 5.5mg/kg.

En el inciso E) se muestra la tendencia del Fe, la cual muestra concentraciones altas en los periodos de 1931, 1938 y 1939 y posteriormente se vuelve más lineal con concentraciones promedio de 200mg/kg.

El inciso F) muestra la tendencia del Mg, que al igual que el Ca y el Ba, su comportamiento es lineal hasta el periodo bianual 1965 (1964-1965), que empieza a aumentar ligeramente pero en 1979 y 1984 (1980-1984) crece súbitamente con una concentración de 4,890mg/kg, posteriormente desciende hasta 224mg/kg y se mantiene constante. En el inciso G), la concentración del Mn no muestra ninguna tendencia más que el aumento gradual con altas y bajas importantes, las concentraciones más altas ocurren en los periodos de 1994, 2001, 2003 y 2014 con 3.5mg/kg.

El inciso H) muestra la tendencia del Na, en la cual se tienen concentraciones entre 400 y 800mg/kg hasta 1964. Posteriormente tiene un aumento que alcanza los 1100mg/kg entre el periodo de 1966 y 1979 y finalmente disminuye progresivamente desde el periodo 1980 hasta el año 2003. El inciso I) muestra la concentración del Ni, la cual es lineal hasta el 2003 que tiene un aumento súbito alcanzando los 118mg/kg, para volver posteriormente a la concentración promedio de 1.

En cuanto al Si del inciso J) se tienen concentraciones por debajo de 90mg/kg, los picos más relevantes representan los periodos de 1937, 1938, 1940, 1942, 1969 y 1970. A partir de 1989 comenzó un aumento paulatino con altas y bajas. Finalmente, se tiene la tendencia del V en el inciso k), el cual muestra una tendencia muy similar al Ba, Ca, y Mg con una concentración promedio de 1mg/kg para aumentar súbitamente en el periodo de 1980, alcanzando una concentración de 7mg/kg.

## Anexo IV.

### Tabla A.1 Concentraciones del núcleo de Barranca de Amealco (Al – Cu)

<u>Año</u>	<u>Periodo</u>	<u>Al</u>	<u>B</u>	<u>Ba</u>	<u>Be</u>	<u>Ca</u>	<u>Cd</u>	<u>Cr</u>	<u>Cu</u>	<u>Fe</u>
		mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg
1744	1744-1743	242.5	1.8	23.8	-	1436.9	-	1.0	-	171.9
1748	1748-1745	49.1	1.8	24.5	-	1533.1	-	1.0	1.1	48.9
1753	1753-1749	16.9	1.8	24.6	-	1498.3	-	1.3	-	20.3
1758	1758-1754	143.6	2.1	26.4	-	1625.4	-	1.0	-	39.0
1762	1762-1759	15.0	2.2	27.3	-	1671.0	-	1.0	-	22.7
1766	1766-1763	304.9	1.8	59.4	-	6208.6	-	1.3	15.0	264.4
1774	1774-1767	13.9	2.0	26.6	-	1755.9	-	0.5	-	21.8
1779	1779-1775	11.8	2.0	28.0	-	1811.6	-	-	-	19.0
1782	1782-1780	15.5	2.2	32.1	-	2071.5	-	1.1	-	21.7
1787	1787-1783	1754.4	3.1	35.0	0.2	2203.3	0.3	3.5	1.8	1621.3
1790	1790-1788	11.0	1.8	26.5	-	1777.7	-	0.6	1.3	17.0
1793	1793-1791	363.0	2.0	29.0	-	1868.2	-	0.9	-	254.6
1797	1797-1794	470.9	3.1	34.0	0.2	2101.3	0.2	2.2	6.9	393.0
1801	1801-1798	14.6	1.8	25.3	-	1678.7	-	-	-	17.5
1805	1805-1802	177.0	2.8	83.7	-	11303.4	0.2	2.7	2.5	127.5
1808	1808-1806	15.7	1.7	28.2	-	1812.5	-	-	-	18.8
1813	1813-1809	18.2	1.8	27.0	-	1734.2	-	1.0	-	24.9
1817	1817-1814	24.4	1.5	25.0	0.1	1654.3	-	0.7	1.8	25.3
1822	1822-1818	16.5	1.6	25.9	-	1686.1	-	-	-	20.3
1827	1827-1823	13.5	1.9	27.6	-	1758.9	-	0.6	-	18.0
1829	1829-1828	15.9	2.1	27.3	-	1770.7	-	0.8	-	21.3
1832	1832-1830	93.8	2.5	27.1	0.3	1836.5	0.3	1.2	-	93.9
1836	1836-1833	14.4	1.9	32.3	-	2919.7	-	1.2	-	19.3
1842	1842-1837	17.9	1.8	72.1	-	9076.3	-	-	-	17.9
1846	1846-1843	1039.7	2.8	61.8	-	8037.3	-	3.2	-	418.9

1849	1849-1847	<b>341.8</b>	<b>2.3</b>	<b>49.1</b>	-	<b>5870.9</b>	-	<b>0.8</b>	-	<b>141.2</b>
1852	1852-1850	<b>338.4</b>	<b>2.2</b>	<b>59.0</b>	-	<b>7453.3</b>	-	<b>1.6</b>	-	<b>153.5</b>
1857	1857-1853	<b>34.1</b>	<b>21.3</b>	<b>48.8</b>	-	<b>5599.7</b>	-	<b>1.2</b>	-	<b>74.4</b>
1861	1861-1858	<b>292.1</b>	<b>2.7</b>	<b>57.6</b>	-	<b>8030.6</b>	-	<b>1.1</b>	-	<b>321.0</b>
1864	1864-1862	<b>24.7</b>	<b>2.2</b>	<b>49.3</b>	-	<b>5970.6</b>	-	<b>0.8</b>	-	<b>33.1</b>
1869	1869-1965	<b>264.1</b>	<b>2.2</b>	<b>57.2</b>	-	<b>8082.0</b>	-	<b>1.3</b>	-	<b>119.1</b>
1873	1873-1870	<b>17.7</b>	<b>2.1</b>	<b>50.9</b>	-	<b>6663.6</b>	-	<b>2.0</b>	-	<b>28.3</b>
1875	1875-1874	<b>265.3</b>	<b>2.5</b>	<b>31.1</b>	-	<b>2621.0</b>	-	<b>1.6</b>	-	<b>191.2</b>
1877	1877-1876	<b>474.6</b>	<b>2.8</b>	<b>51.2</b>	<b>0.3</b>	<b>6053.7</b>	<b>0.2</b>	<b>2.2</b>	-	<b>249.8</b>
1880	1880-1878	<b>23.5</b>	<b>2.3</b>	<b>96.8</b>	-	<b>14704.5</b>	-	<b>1.3</b>	<b>2.4</b>	<b>32.4</b>
1883	1883-1881	<b>21.6</b>	<b>2.2</b>	<b>164.8</b>	-	<b>25978.2</b>	-	<b>1.5</b>	<b>2.0</b>	<b>33.7</b>
1887	1887-1884	<b>148.9</b>	<b>2.5</b>	<b>98.6</b>	-	<b>12677.8</b>	-	<b>1.2</b>	<b>1.8</b>	<b>115.5</b>
1892	1892-1888	<b>49.3</b>	<b>2.2</b>	<b>176.6</b>	-	<b>23999.8</b>	-	<b>2.0</b>	<b>3.7</b>	<b>60.5</b>
1899	1899-1893	<b>40.9</b>	<b>2.1</b>	<b>27.4</b>	-	<b>2047.7</b>	-	<b>0.7</b>	-	<b>32.3</b>
1909	1909-1800	<b>23.6</b>	<b>2.3</b>	<b>110.8</b>	-	<b>15686.1</b>	-	<b>2.1</b>	<b>2.2</b>	<b>42.3</b>
1920	1920-1910	<b>41.2</b>	<b>1.7</b>	<b>103.8</b>	-	<b>14745.2</b>	-	<b>1.6</b>	<b>1.6</b>	<b>40.0</b>
1927	1927-1921	<b>43.5</b>	<b>1.8</b>	<b>71.4</b>	-	<b>8820.1</b>	-	<b>1.9</b>	<b>1.2</b>	<b>39.4</b>
1934	1934-1928	<b>23.8</b>	<b>1.9</b>	<b>99.4</b>	-	<b>12410.2</b>	-	<b>3.6</b>	<b>65.8</b>	<b>48.5</b>
1941	1941-1935	<b>15.7</b>	<b>1.7</b>	<b>67.2</b>	-	<b>7649.3</b>	-	<b>6.0</b>	-	<b>56.4</b>
1947	1947-1942	<b>81.7</b>	<b>1.7</b>	<b>18.1</b>	-	<b>1361.0</b>	-	<b>12.3</b>	<b>3.9</b>	<b>137.2</b>
1954	1954-1948	<b>49.3</b>	<b>1.9</b>	<b>18.8</b>	-	<b>1534.5</b>	-	<b>18.1</b>	<b>1.8</b>	<b>180.8</b>
1970	1970-1955	<b>53.8</b>	<b>2.0</b>	<b>20.7</b>	-	<b>1586.0</b>	-	<b>5.4</b>	<b>1.7</b>	<b>84.6</b>
1991	1991-1971	<b>239.0</b>	<b>2.5</b>	<b>20.0</b>	-	<b>1344.3</b>	-	<b>9.2</b>	<b>11.2</b>	<b>256.3</b>
2004	2004-1992	<b>121.2</b>	<b>2.4</b>	<b>15.4</b>	-	<b>1058.1</b>	-	<b>1.7</b>	<b>6.4</b>	<b>112.9</b>
2014	2014 - 2005	<b>165.4</b>	<b>2.7</b>	<b>11.9</b>	-	<b>1161.2</b>	-	<b>2.4</b>	<b>2.9</b>	<b>135.9</b>

Nota: “-“ significa que está por debajo de los límites de detección y/o cuantificación.

**Tabla A.2 Concentraciones del núcleo de Barranca de Amealco (Mg – Zn)**

<b>Año</b>	<b>Periodo</b>	<b>Mg</b>	<b>Mn</b>	<b>Mo</b>	<b>Na</b>	<b>Ni</b>	<b>Pb</b>	<b>Si</b>	<b>V</b>	<b>Zn</b>
		mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg						
1744	1744-1743	1343.5	2.9	-	193.9	0.5	-	51.9	2.5	4.2
1748	1748-1745	1392.2	1.5	-	222.8	0.6	-	62.1	2.3	3.7
1753	1753-1749	1258.3	0.7	-	209.6	-	-	62.3	1.9	2.1
1758	1758-1754	1336.2	1.3	-	215.8	0.5	-	84.9	2.2	3.0
1762	1762-1759	1402.0	0.8	-	238.2	0.6	-	53.8	2.1	2.6
1766	1766-1763	1864.6	10.4	-	240.8	0.6	12.8	59.7	3.3	19.0
1774	1774-1767	1386.2	0.9	-	253.9	-	-	24.4	2.2	3.6
1779	1779-1775	1463.8	0.8	-	279.9	-	-	23.0	2.3	2.5
1782	1782-1780	1660.2	0.8	-	332.1	0.6	-	32.4	2.6	4.8
1787	1787-1783	2459.8	24.3	-	310.6	1.5	-	70.8	9.2	8.1
1790	1790-1788	1332.5	0.7	-	267.1	-	-	22.0	2.1	4.3
1793	1793-1791	1552.1	4.1	-	296.1	0.5	-	33.4	3.1	3.4
1797	1797-1794	1757.3	10.8	1.1	324.1	1.1	10.3	58.9	4.1	12.8
1801	1801-1798	1333.8	0.8	-	281.2	-	-	26.0	2.1	2.7
1805	1805-1802	3616.1	2.1	-	410.9	0.6	-	26.0	6.0	6.5
1808	1808-1806	1453.0	0.7	-	297.6	0.6	-	34.8	2.2	3.6
1813	1813-1809	1343.1	0.8	-	269.1	-	-	25.9	2.1	3.9
1817	1817-1814	1295.3	0.8	-	273.5	-	-	30.4	2.1	4.1
1822	1822-1818	1329.2	0.7	-	271.0	-	-	27.3	2.1	4.5
1827	1827-1823	1328.8	0.6	-	273.1	-	-	36.3	2.1	5.5
1829	1829-1828	1391.4	0.8	-	298.4	-	-	84.3	2.2	3.3
1832	1832-1830	1356.1	3.4	-	256.7	0.7	-	67.2	2.6	1.5
1836	1836-1833	1407.1	0.7	-	256.5	-	-	24.4	2.2	1.8
1842	1842-1837	2143.0	0.7	-	231.9	-	-	24.5	3.4	-
1846	1846-1843	2378.5	4.9	1.3	303.9	2.0	-	56.8	4.5	3.0
1849	1849-1847	2144.2	1.9	-	324.7	-	-	33.8	3.6	1.8
1852	1852-1850	2306.2	2.3	-	315.6	0.5	-	29.7	3.8	3.1
1857	1857-1853	2099.8	1.3	-	349.4	0.5	-	57.8	3.3	3.2
1861	1861-1858	2417.0	6.1	-	327.9	-	-	51.6	4.8	2.7

1864	1864-1862	<b>2130.8</b>	<b>1.0</b>	-	<b>340.6</b>	-	-	<b>54.7</b>	<b>3.4</b>	<b>2.5</b>
1869	1869-1965	<b>2287.5</b>	<b>2.1</b>	-	<b>307.4</b>	<b>0.5</b>	-	<b>37.1</b>	<b>3.8</b>	<b>2.2</b>
1873	1873-1870	<b>2259.3</b>	<b>0.9</b>	-	<b>339.0</b>	<b>0.6</b>	-	<b>49.6</b>	<b>3.5</b>	<b>0.8</b>
1875	1875-1874	<b>2045.7</b>	<b>4.5</b>	-	<b>361.0</b>	<b>0.5</b>	-	<b>86.2</b>	<b>3.6</b>	<b>2.5</b>
1877	1877-1876	<b>2494.5</b>	<b>9.1</b>	-	<b>369.9</b>	<b>1.0</b>	-	<b>110.4</b>	<b>4.8</b>	<b>2.7</b>
1880	1880-1878	<b>3753.5</b>	<b>1.0</b>	-	<b>441.9</b>	-	-	<b>28.1</b>	<b>6.0</b>	<b>4.8</b>
1883	1883-1881	<b>5209.3</b>	<b>1.6</b>	-	<b>436.9</b>	-	-	<b>38.1</b>	<b>8.3</b>	<b>5.3</b>
1887	1887-1884	<b>3562.6</b>	<b>2.5</b>	-	<b>407.1</b>	-	-	<b>46.3</b>	<b>5.7</b>	<b>6.2</b>
1892	1892-1888	<b>5303.5</b>	<b>1.6</b>	-	<b>394.6</b>	<b>0.6</b>	-	<b>60.3</b>	<b>8.6</b>	<b>8.0</b>
1899	1899-1893	<b>1369.9</b>	<b>1.2</b>	-	<b>251.0</b>	<b>0.5</b>	-	<b>37.8</b>	<b>2.2</b>	<b>1.3</b>
1909	1909-1800	<b>4146.3</b>	<b>1.6</b>	-	<b>367.6</b>	<b>0.7</b>	-	<b>68.8</b>	<b>7.2</b>	<b>6.3</b>
1920	1920-1910	<b>3773.2</b>	<b>0.9</b>	-	<b>348.9</b>	<b>0.6</b>	-	<b>70.5</b>	<b>5.7</b>	<b>5.4</b>
1927	1927-1921	<b>2639.0</b>	<b>1.1</b>	-	<b>318.0</b>	-	-	<b>26.7</b>	<b>3.9</b>	<b>5.0</b>
1934	1934-1928	<b>3496.4</b>	<b>1.1</b>	-	<b>354.6</b>	<b>10.6</b>	-	<b>26.1</b>	<b>5.3</b>	<b>5.5</b>
1941	1941-1935	<b>2466.0</b>	<b>0.9</b>	-	<b>290.3</b>	<b>0.8</b>	-	<b>26.3</b>	<b>3.7</b>	<b>5.8</b>
1947	1947-1942	<b>979.8</b>	<b>2.8</b>	<b>1.1</b>	<b>234.1</b>	<b>1.4</b>	<b>7.0</b>	<b>42.9</b>	<b>1.5</b>	<b>8.2</b>
1954	1954-1948	<b>461.7</b>	<b>2.5</b>	-	<b>127.3</b>	<b>1.2</b>	-	<b>78.8</b>	<b>1.6</b>	<b>8.2</b>
1970	1970-1955	<b>667.0</b>	<b>2.6</b>	-	<b>138.7</b>	<b>0.8</b>	-	<b>87.9</b>	<b>1.2</b>	<b>6.8</b>
1991	1991-1971	<b>671.6</b>	<b>9.1</b>	-	<b>91.8</b>	<b>0.9</b>	<b>9.0</b>	<b>121.9</b>	<b>1.6</b>	<b>14.4</b>
2004	2004-1992	<b>552.5</b>	<b>2.8</b>	-	<b>96.6</b>	<b>1.2</b>	-	<b>89.0</b>	<b>1.0</b>	<b>6.8</b>
2014	2014 - 2005	<b>583.5</b>	<b>3.5</b>	-	<b>143.2</b>	<b>1.1</b>	-	<b>272.5</b>	<b>1.0</b>	<b>15.9</b>

Nota: “-“ significa que está por debajo de los límites de detección y/o cuantificación.

**Tabla A.3 Concentraciones del núcleo de Calesa (Al – Fe)**

<u>Año</u>	<u>Periodo</u>	<u>Al</u> mg/Kg	<u>As</u> mg/Kg	<u>B</u> mg/Kg	<u>Ba</u> mg/Kg	<u>Be</u> mg/Kg	<u>Ca</u> mg/Kg	<u>Cd</u> mg/Kg	<u>Cr</u> mg/Kg	<u>Cu</u> mg/Kg	<u>Fe</u> mg/Kg
1926	1926	-	-	1.48	2.42	-	950.1	-	1.5	-	167.2
1928	1928-1927	-	-	1.38	2.52	-	967.3	-	1.1	-	115.4
1929	1929	-	-	1.80	3.04	-	1199.3	-	1.3	-	135.7
1930	1930	-	-	1.64	2.96	-	1131.2	-	1.2	-	148.2
1931	1931	43.1	12.6	2.68	4.81	-	1281.9	-	2.1	-	727.2
1932	1932	-	-	1.64	2.92	-	1086.8	-	2.7	-	171.7
1933	1933	-	-	1.60	2.72	-	1062.0	-	1.5	-	168.9
1934	1934	9.8	-	1.76	2.66	0.5	984.2	0.2	1.2	-	194.3
1935	1935	-	-	1.86	2.60	-	1007.8	-	1.8	-	177.9
1936	1936	112.3	-	1.76	3.12	-	1093.9	-	2.7	-	214.5
1937	1937	130.6	-	2.28	4.46	-	1258.5	0.2	3.0	1.0	417.8
1938	1938	264.6	49.4	2.18	5.42	-	1294.5	0.2	2.3	1.4	845.6
1939	1939	20.5	28.0	2.20	4.24	0.4	1133.0	0.3	2.3	1.1	1084.5
1940	1940	39.0	-	1.14	2.98	-	1064.0	-	2.8	-	262.6
1941	1941	-	-	1.18	3.08	-	1310.1	-	1.8	1.0	163.8
1942	1942	10.9	-	1.49	2.83	-	1134.1	-	2.2	-	188.0
1943	1943	-	-	1.28	2.95	-	1105.4	-	2.3	-	208.6
1945	1945-1944	-	-	1.16	3.12	-	1075.1	-	1.7	-	170.9
1947	1947-1946	-	-	1.16	2.92	0.7	1023.6	-	2.1	-	218.0
1950	1950-1948	-	-	1.26	3.05	-	1093.2	-	2.0	-	207.3
1952	1952-1951	11.1	-	1.34	3.28	0.7	1133.1	-	2.1	1.2	224.1
1953	1953	-	-	1.24	2.96	-	1034.4	-	2.4	1.1	166.7
1956	1956-1954	134.0	-	1.70	3.42	-	1083.9	-	2.5	-	242.5
1960	1960-1957	20.6	-	1.35	3.04	-	1032.2	-	1.8	1.0	166.3
1961	1961	15.6	-	1.96	3.74	0.3	1002.1	-	1.6	1.3	218.8
1962	1962	18.5	-	1.66	3.46	0.8	1052.9	-	2.1	1.1	172.8
1963	1963	-	-	1.78	3.00	-	1090.8	-	1.3	-	137.8

1965	1965-1964	10.7	-	2.72	4.02	-	1313.6	0.2	3.0	2.3	184.0
1966	1966	-	-	2.55	3.77	-	1193.7	0.2	2.6	2.1	162.8
1969	1969-1967	62.4	-	2.54	3.92	-	1155.3	0.2	2.3	1.9	176.8
1970	1970	22.0	-	2.68	4.35	-	1252.3	0.3	3.1	2.1	193.0
1971	1971	10.3	-	2.78	4.06	-	1106.9	0.2	1.8	2.5	137.3
1973	1973-1972	-	-	2.16	3.06	-	829.0	-	1.0	1.2	74.8
1974	1974	-	-	2.06	3.28	-	823.8	-	1.3	2.0	95.0
1975	1975	-	-	2.12	3.71	-	776.8	-	1.5	1.2	119.5
1976	1976	-	-	1.98	3.30	-	771.4	-	1.1	1.5	85.1
1977	1977	9.9	-	2.28	4.24	-	738.3	-	1.6	-	130.7
1978	1978	-	-	2.16	4.46	-	685.6	-	1.9	1.2	142.3
1979	1979	-	-	2.18	43.53	-	26945.8	-	3.2	1.0	193.6
1984	1984-1980	-	-	1.81	20.28	-	10334.3	-	3.0	1.2	229.9
1988	1988-1985	-	-	2.13	3.08	-	1401.8	-	2.5	1.4	233.6
1991	1991-1989	-	-	2.06	2.96	-	1338.1	-	2.1	1.5	220.1
1994	1994-1992	89.4	-	2.06	3.14	-	1353.7	-	2.8	1.5	244.3
1995	1995	10.5	-	1.76	2.88	-	1290.5	-	1.6	1.9	150.5
1996	1996	-	-	1.48	2.55	-	1178.0	-	1.6	1.2	139.6
1998	1998-1997	26.3	-	2.04	2.94	-	1053.7	-	3.6	1.6	231.3
1999	1999	-	-	3.44	3.10	-	1014.4	-	3.2	1.9	196.1
2001	2001-2000	25.5	-	1.60	3.86	-	1139.6	-	5.4	2.2	249.2
2002	2002	21.2	-	1.9	3.0	-	1023.2	-	2.6	2.2	262.0
2003	2003	17.8	-	1.67	3.69	0.5	1074.1	-	2.7	3.4	270.4
2004	2004	12.9	-	2.04	2.86	-	1098.7	-	3.3	2.6	281.6
2014	2014 - 2005	38.4	-	2.10	3.33	-	1052.9	-	5.5	2.5	416.8

Nota: “-“ significa que está por debajo de los límites de detección y/o cuantificación.

**Tabla A.4 Concentraciones del núcleo de Calesa (Mg – Zn)**

<b>Año</b>	<b>Periodo</b>	<b>Mg</b>	<b>Mn</b>	<b>Mo</b>	<b>Na</b>	<b>Ni</b>	<b>Pb</b>	<b>Si</b>	<b>V</b>	<b>Zn</b>
		mg/Kg	mg/Kg	mg/Kg						
1926	1926	282.9	1.2	-	443.8	0.8	-	17.7	0.7	1.7
1928	1928-1927	287.0	0.9	-	448.6	0.5	-	16.6	0.7	0.9
1929	1929	400.6	1.1	-	703.4	0.8	-	21.6	1.0	0.9
1930	1930	387.3	1.1	-	652.5	0.7	-	20.8	0.9	1.2
1931	1931	368.1	2.1	1.1	592.9	1.1	28.4	33.8	1.1	8.5
1932	1932	303.1	1.1	1.5	433.3	1.0	3.7	20.8	0.8	1.3
1933	1933	335.5	1.1	-	586.2	0.8	-	21.4	0.9	1.3
1934	1934	308.3	1.9	-	511.0	0.6	-	18.2	1.5	9.0
1935	1935	322.4	1.3	-	529.9	1.0	-	33.2	0.8	1.4
1936	1936	365.2	1.9	1.0	577.5	0.9	3.4	32.5	1.1	1.2
1937	1937	391.4	3.0	1.1	648.0	1.0	3.6	85.2	1.3	7.0
1938	1938	412.3	1.6	1.1	614.6	1.1	41.2	77.9	1.3	7.7
1939	1939	302.7	2.8	1.1	479.7	1.6	23.6	35.3	1.4	7.1
1940	1940	357.6	1.7	1.4	580.6	1.5	-	78.8	1.1	-
1941	1941	401.2	1.0	-	842.0	0.7	-	22.1	1.3	-
1942	1942	405.4	1.2	1.1	772.1	0.9	-	67.4	1.2	-
1943	1943	373.9	1.2	1.1	645.8	0.9	-	23.8	1.1	-
1945	1945-1944	350.7	1.2	-	541.6	0.7	-	18.3	1.1	-
1947	1947-1946	320.3	2.1	-	483.4	0.9	-	16.9	1.7	-
1950	1950-1948	323.0	1.3	-	479.8	0.8	-	17.3	1.0	-
1952	1952-1951	337.9	2.2	1.1	511.8	2.0	-	20.5	2.2	-
1953	1953	333.5	1.3	1.1	551.7	0.9	-	18.9	1.0	-
1956	1956-1954	364.7	1.6	1.2	721.8	1.0	-	20.2	1.2	-
1960	1960-1957	315.2	1.0	-	490.4	0.8	-	16.6	1.0	-
1961	1961	329.1	1.2	-	518.5	0.9	2.6	20.4	1.3	0.3
1962	1962	462.0	1.9	-	581.5	0.8	-	20.5	2.2	1.5
1963	1963	431.2	1.1	-	550.0	0.5	-	11.5	0.9	1.7
1965	1965-1964	762.4	1.4	1.9	831.1	1.2	-	32.5	1.5	4.5
1966	1966	808.4	1.4	1.9	893.3	1.3	2.8	24.1	1.5	3.1

1969	1969-1967	829.7	2.1	1.5	988.3	0.9	-	72.5	1.7	3.0
1970	1970	937.6	2.2	1.1	984.1	1.2	-	88.4	1.8	2.5
1971	1971	990.9	1.3	-	1070.0	0.8	-	28.7	1.8	2.8
1973	1973-1972	822.2	0.7	-	889.2	0.6	-	20.3	1.3	4.1
1974	1974	865.5	0.8	-	846.5	0.6	-	19.6	1.3	2.5
1975	1975	956.5	0.9	-	911.7	0.6	-	21.7	1.5	2.2
1976	1976	861.2	0.7	-	801.9	0.5	-	16.7	1.4	1.5
1977	1977	990.7	1.0	-	1009.0	0.5	-	19.0	1.7	1.7
1978	1978	1087.7	1.0	1.1	1098.2	0.7	-	21.9	1.8	2.1
1979	1979	4890.8	1.5	1.3	941.7	0.8	-	22.9	7.2	2.1
1984	1984-1980	2050.7	1.5	1.6	527.3	1.0	-	20.2	3.3	2.2
1988	1988-1985	370.4	2.7	2.5	273.0	1.0	-	21.5	1.0	2.4
1991	1991-1989	362.0	2.7	2.4	226.2	1.0	-	24.3	1.0	2.4
1994	1994-1992	370.9	3.1	2.0	201.5	0.9	-	31.6	1.0	1.6
1995	1995	337.6	2.7	1.6	157.0	0.8	-	18.6	0.8	1.4
1996	1996	224.9	1.7	1.1	158.6	0.6	-	37.7	0.6	0.5
1998	1998-1997	305.7	2.7	1.8	216.7	0.9	-	27.8	0.7	1.3
1999	1999	256.4	2.6	1.5	151.2	0.9	-	21.9	0.6	2.6
2001	2001-2000	282.2	3.2	1.8	127.0	1.0	-	26.6	0.6	2.1
2002	2002	254.8	2.7	1.7	89.5	1.1	-	38.8	0.5	2.6
2003	2003	269.8	3.5	1.8	113.0	118.2	-	26.6	0.9	3.6
2004	2004	288.2	2.6	2.1	119.3	1.3	-	43.9	0.6	2.3
2014	2014 - 2005	336.1	3.1	2.9	202.0	2.5	-	53.3	0.8	2.7

Nota: “-“ significa que está por debajo de los límites de detección y/o cuantificación.