

# Capítulo VI

## Estudio de los factores que establecen la tonalidad en la escala de grises

"Думал все то же о вреде избрания внешней цели для жизни. Моряк, руководись тем компасом, который в твоём корабле, - крошечной стрелкой, которая меньше в тысячу раз твоего корабля, - а не видимым предметом, даже не звездами: все обманывает, кроме того, что в тебе"<sup>1</sup>

*Лев Николаевич Толстой*

Con los datos que a continuación aportaremos, en particular la relación Mg/Ca presente a lo largo de la estalagmita, se podrán refutar o apoyar las primeras hipótesis. No sólo determinaremos los factores que establecen la tonalidad en la estalagmita, sino si es un archivo paleoclimático y si es un archivo válido.

### 6.1 Resultados del análisis multi-elemental por LA-ICP-MS y Generación de la serie de tiempo de Mg/Ca

Debido a que las cantidades presentes en los elementos traza, de los que se indagó su existencia no eran considerablemente distinguibles del ruido, se terminó por realizar sólo el análisis químico por LA- ICP MS- de los isótopos <sup>44</sup>Ca, <sup>46</sup>Ca, <sup>47</sup>Ca, <sup>48</sup>Ca <sup>24</sup>Mg, <sup>26</sup>Mg, de los cuales al ser calibrados con el estándar NIST 612, se obtuvo la cantidad de Calcio y Magnesio presente, sin importar para ello cuál isótopo se estudió en primera instancia. Hay que tener en cuenta que la región analizada se encuentra dentro de la zona estudiada por escala de grises. Debido a la manera como se programó la corrida, la serie de tiempo generada, es un orden de magnitud más grande, es decir el número de datos es 10 veces mayor.

Para generar la serie de tiempo a partir de los datos geoquímicos, se estableció primero la relación Mg/Ca, para cada punto analizado a lo largo del eje de crecimiento. Esto genera en sí una matriz columna asociada a una distancia de la base. De nuevo el dominio de tiempo se generó con el modelo de edades. De manera que este vector columna es la serie de tiempo.

---

<sup>1</sup> "He pensado que todo el daño. es por qué se eligen propósitos ajenos a la vida. El marino se guía con la brújula, la cual está dentro de su barco, (una diminuta flecha, la cual es miles de veces más pequeña que su navío), sin objetos a la vista, incluso sin estrellas; todo engaña menos lo que está dentro de ti".



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.

Así, a esta serie de tiempo le realizamos el mismo procedimiento que le hicimos a la serie generada por escala de grises, Los resultado de la prueba de Kendall arrojaron para nuestra serie de tiempo una  $\tau = 1$ , lo que implica la existencia de una tendencia, por lo que realizamos una regresión lineal, que nos dio la tendencia. La pendiente de la tendencia indica su carácter positivo, señalando una tendencia a condiciones de menor humedad a lo largo de los últimos seis milenios para la zona donde está ubicada la cueva.

Tenemos que recordar que la relación Mg/Ca es un indicador de humedad, inversamente proporcional a esta variable ambiental. Después, como parte del proceso de refinación de la señal eliminamos la tendencia, para luego filtrar la misma utilizando ventanas relativamente pequeñas hasta que el número de máximos locales sea igual al número de años presentes en el tramo analizado.

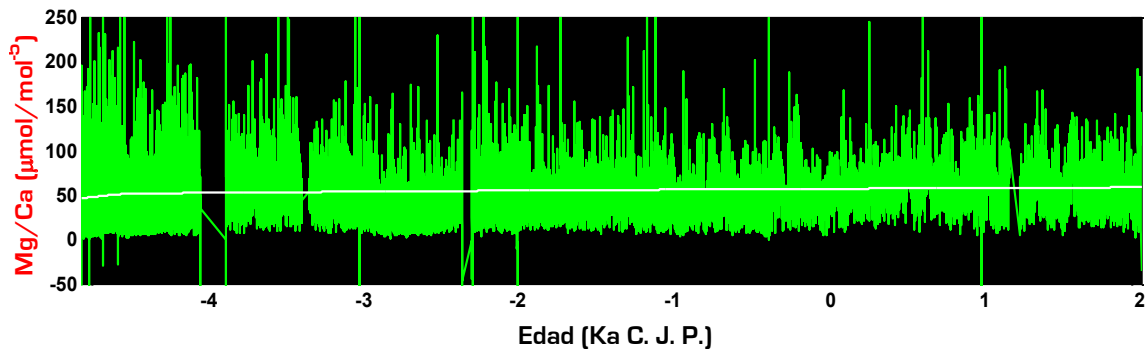


Figura 6.1. Serie de tiempo de JR1a a partir de el cociente Mg/Ca (verde), donde se muestra la tendencia general obtenida por regresión lineal (blanco).

### 6.2 El cociente Mg/Ca y su relación con la escala de grises

Con el fin de comparar con la serie de tiempo generada a partir de la escala de grises, la serie generada a partir de los datos de la relación Mg/Ca es presentada junto con ésta en diferentes intervalos de tiempo (Fig. 6.2-6.25).

Ya que la relación Mg/Ca es inversamente proporcional a la humedad, el eje de las ordenadas de esta serie es graficado invertido, para la fácil visualización de las similitudes entre esta serie y la serie generada a partir de la escala de grises. (La conveniencia de esto se verá en el siguiente párrafo). Las líneas interlineadas, indican la correspondencia entre señales de ambas series. De esta manera, la correlación que esta comparación sugiere, es la de una correlación negativa.

## Estudio de los factores que establecen la tonalidad en la escala de grises

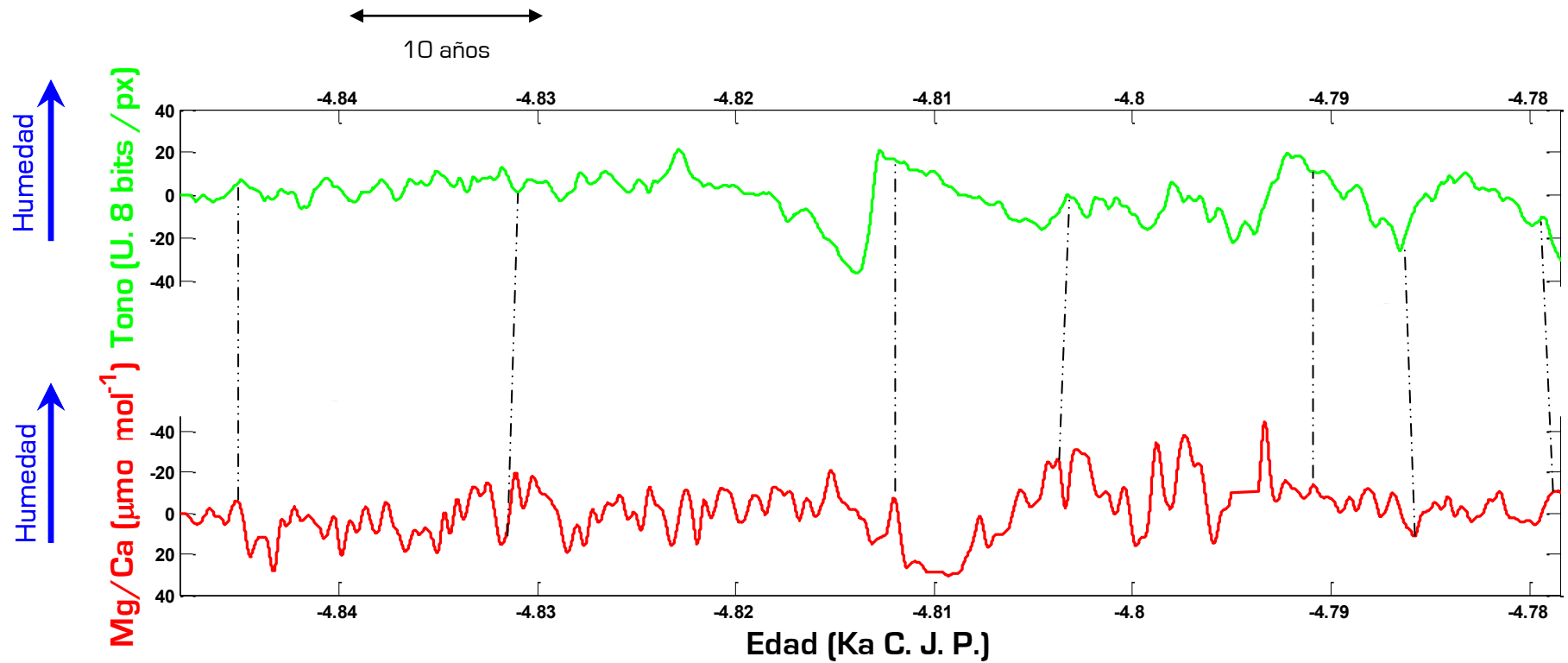


Figura 6.2. Comparación de las series de tiempo para los primeros 80 años del tramo 1 de JR1a producidas a partir de la escala de grises (en verde) y de la relación Mg/Ca (en rojo, el eje “y” está invertido). La línea punteada indica la correspondencia entre las señales de ambas series. Este tramo cuya longitud es de 7.4 cm al cubrir un tiempo de 140 años muestra resoluciones prácticamente iguales en ambas series.

## Análisis espectral de una estalagmita bandeada como indicador paleoclimático

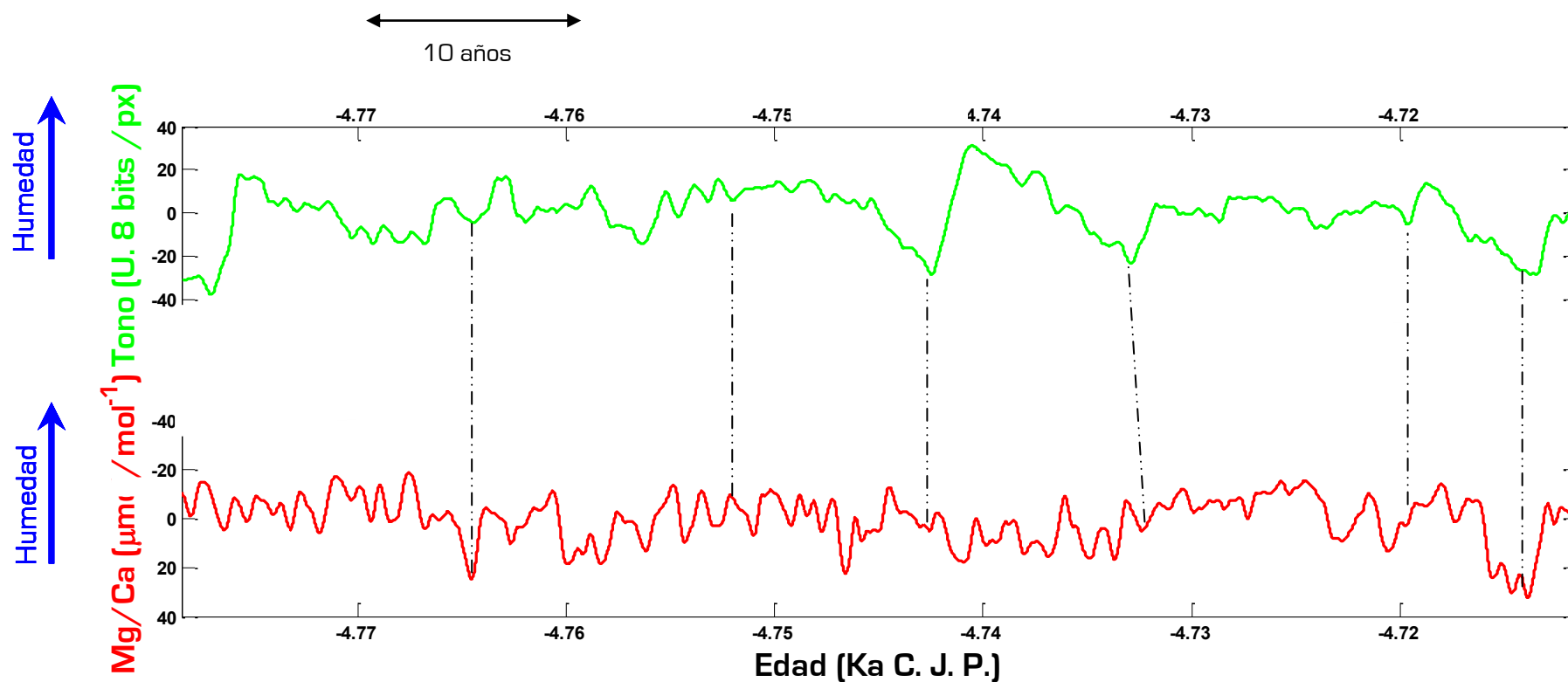


Figura 6.3. Comparación de las series de tiempo para los últimos 70 años del tramo 1 de JR1a producidas a partir de la escala de grises (en verde) y de la relación Mg/Ca (en rojo, el eje “y” está invertido). La línea punteada indica la correspondencia entre las señales de ambas series. Ya que la grafica pertenece al mismo tramo que la figura anterior, las resoluciones en ambas series son prácticamente iguales.

## Estudio de los factores que establecen la tonalidad en la escala de grises

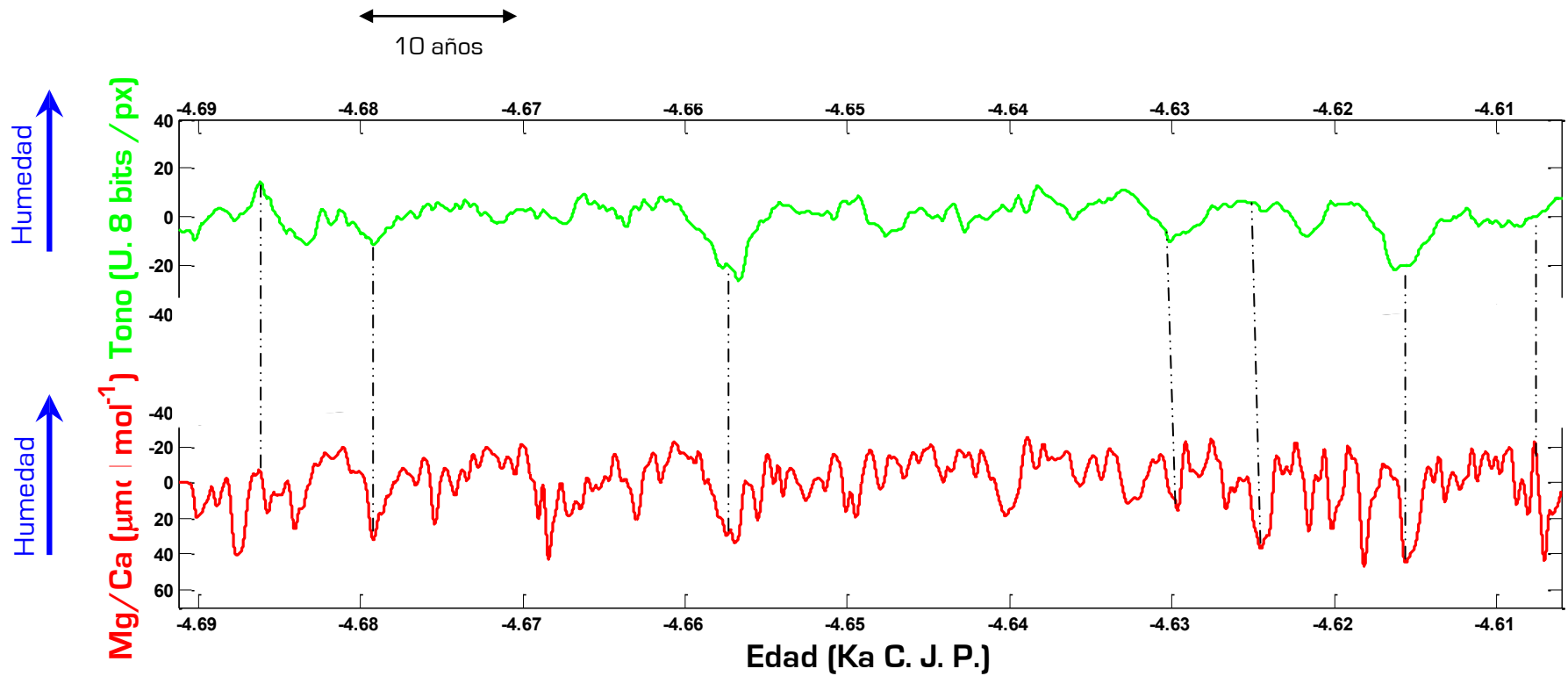


Figura 6.4. Comparación de las series de tiempo para el tramo 2 de JR1a producidas a partir de la escala de grises (en verde) y de la relación Mg/Ca (en rojo, el eje “y” está invertido). La línea punteada indica la correspondencia entre las señales de ambas series. Nótese cómo la resolución de ambas series ya no es la misma, siendo mayor la que tiene la serie de Mg/Ca.

### Análisis espectral de una estalagmita bandeada como indicador paleoclimático

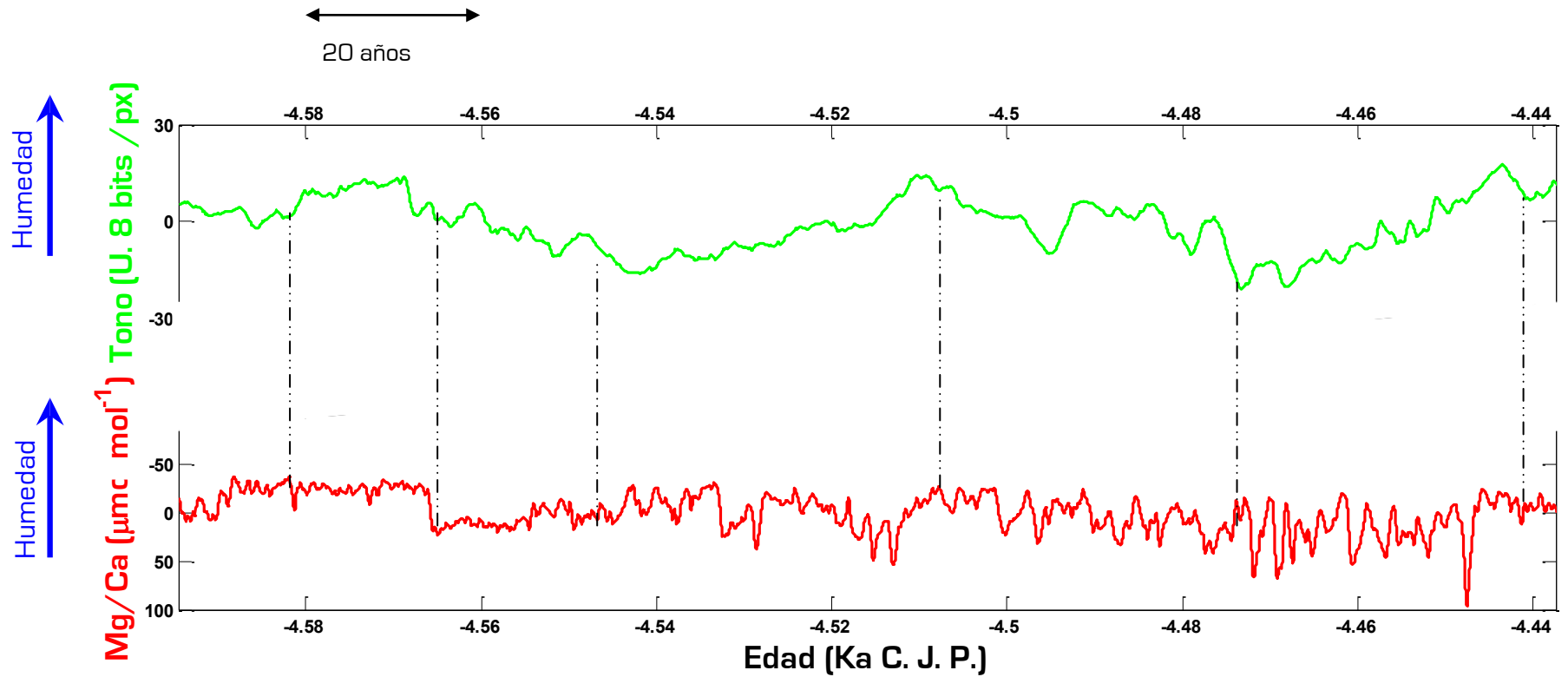


Figura 6.5. Comparación para los primeros 140 años de las series de tiempo para el tramo 3 de JR1a producidas a partir de la escala de grises (en verde) y de la relación Mg/Ca (en rojo, el eje “y” está invertido). La línea punteada indica la correspondencia entre las señales de ambas series. La resolución de la serie de Mg/Ca es mayor que la de la escala de grises.

## Estudio de los factores que establecen la tonalidad en la escala de grises

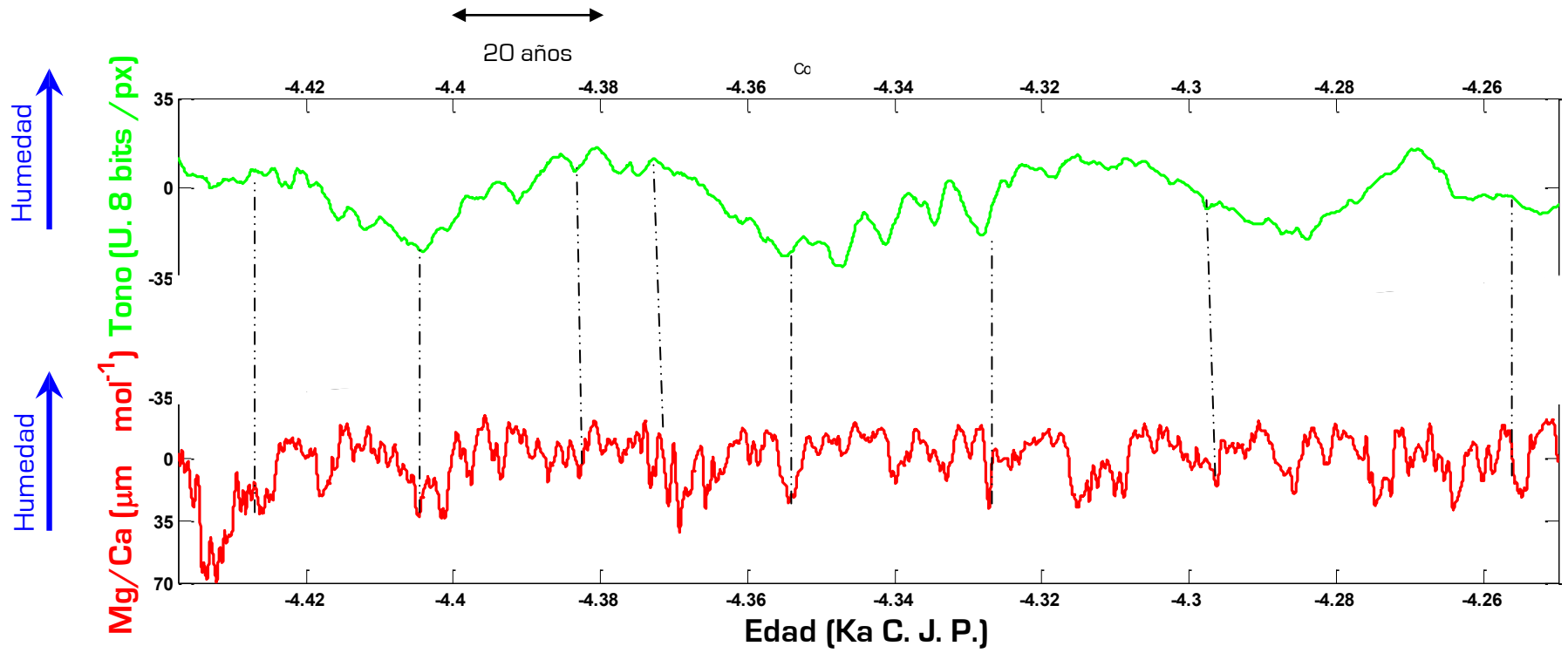


Figura 6.6. Comparación de las series de tiempo para los siguientes 140 años del tramo 3 de JR1a producidas a partir de la escala de grises (en verde) y de la relación Mg/Ca (en rojo, el eje “y” está invertido). La línea punteada indica la correspondencia entre las señales de ambas series.



## Análisis espectral de una estalagmita bandeada como indicador paleoclimático

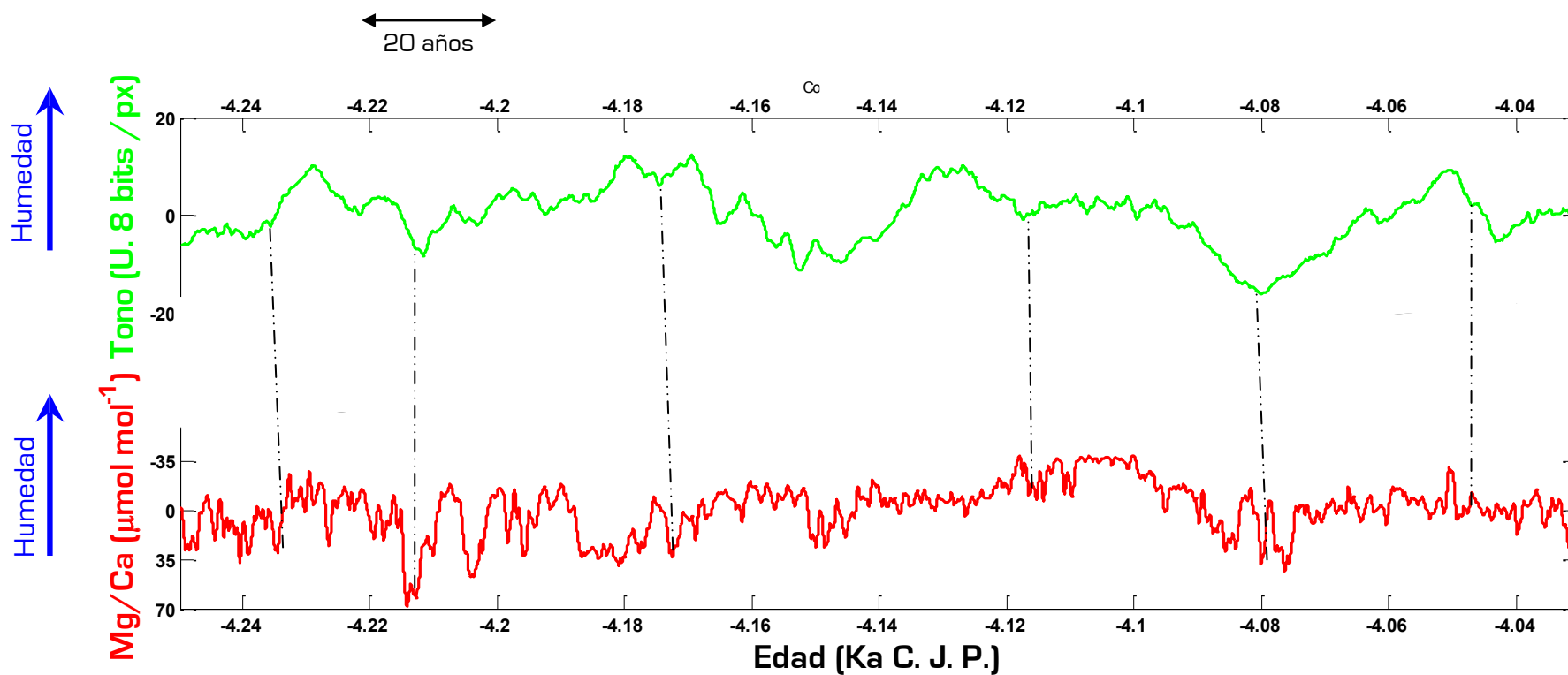


Figura 6. 7. Comparación de las series de tiempo para los últimos 200 años del tramo 3 de JR1a producidas a partir de la escala de grises (en verde) y de la relación Mg/Ca (en rojo, el eje “y” está invertido). La línea punteada indica la correspondencia entre las señales de ambas series.

# Estudio de los factores que establecen la tonalidad en la escala de grises

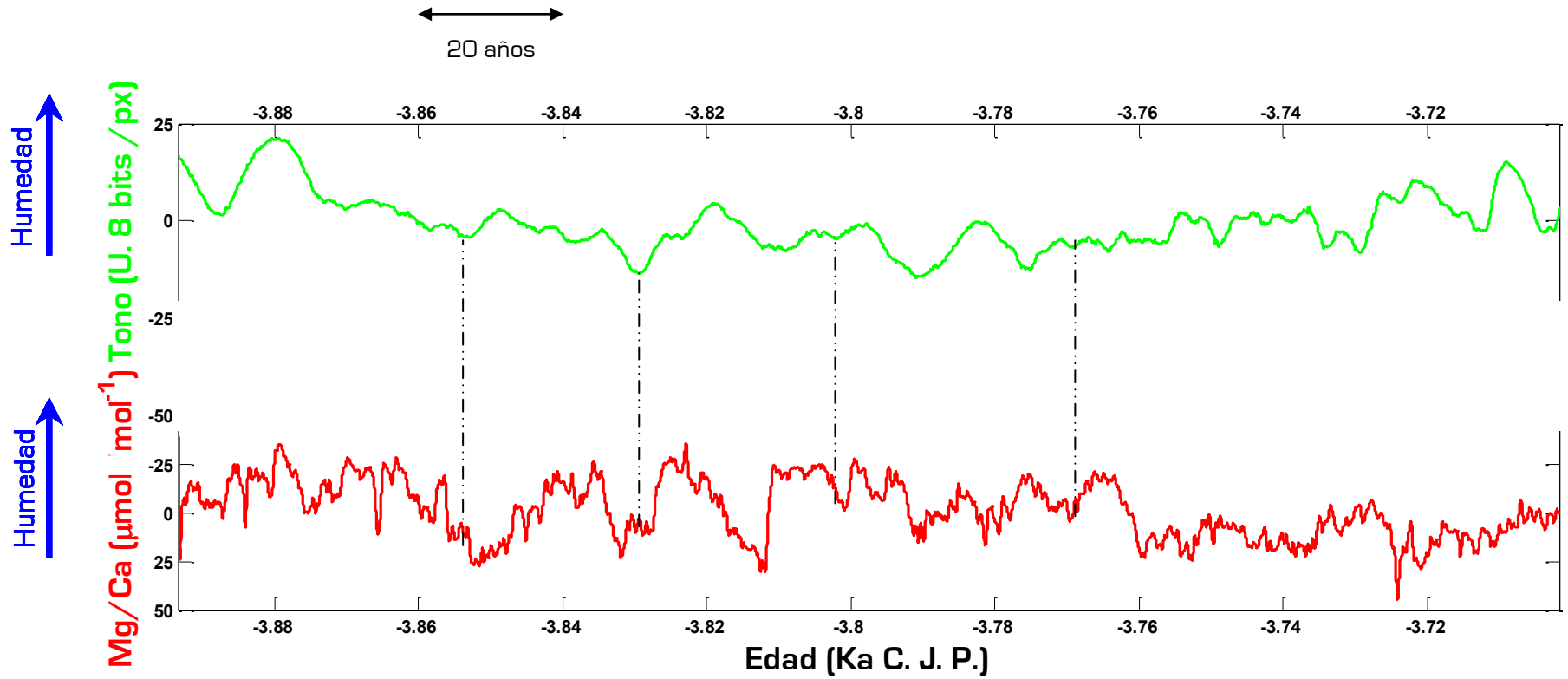


Figura 6.8. Comparación de las series de tiempo para los primeros 150 años del tramo 4 de JR1a producidas a partir de la escala de grises (en verde) y de la relación Mg/Ca (en rojo, el eje “y” está invertido). La línea punteada indica la correspondencia entre las señales de ambas series.

### Análisis espectral de una estalagmita bandeada como indicador paleoclimático

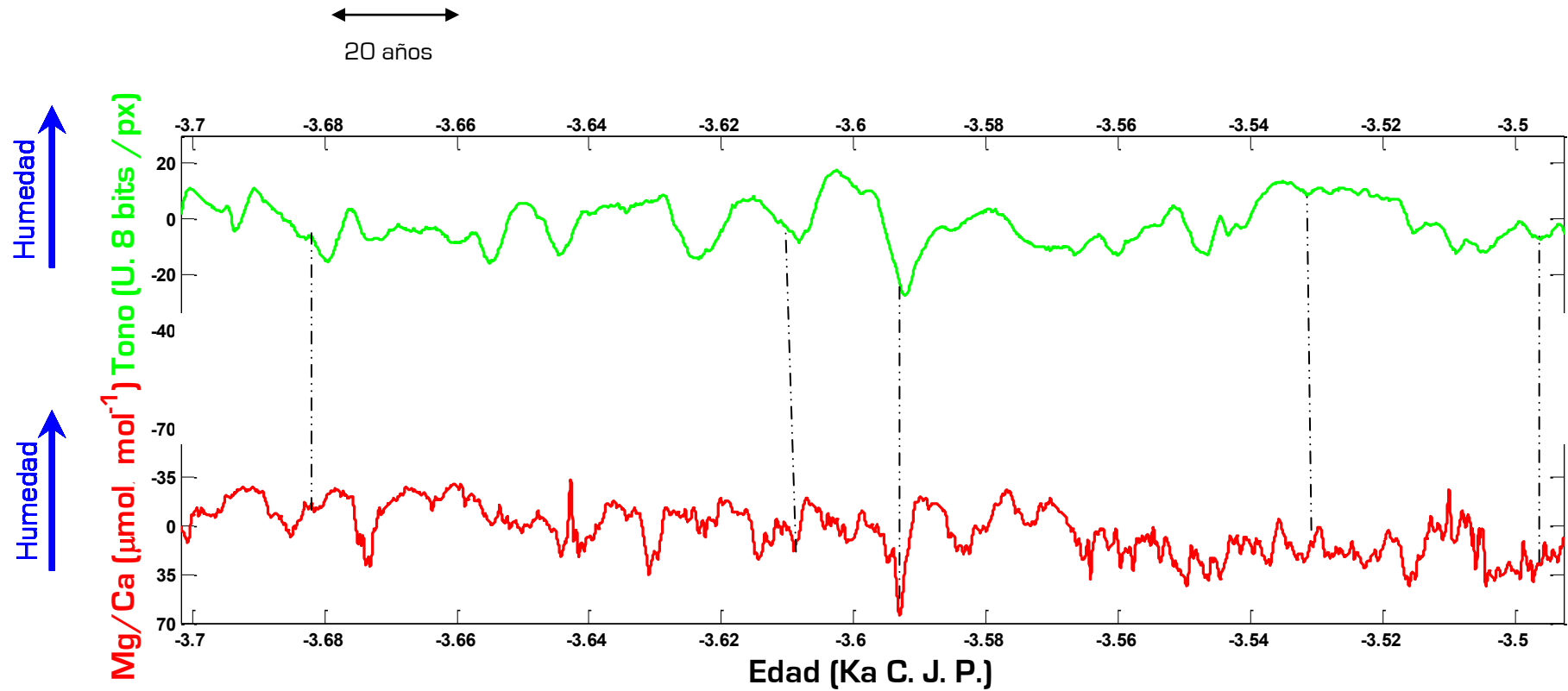


Figura 6.9. Comparación de las series de tiempo para los siguientes 200 años del tramo 4 de JR1a producidas a partir de la escala de grises (en verde) y de la relación Mg/Ca (en rojo, el eje “y” está invertido). La línea punteada indica la correspondencia entre las señales de ambas series.

## Estudio de los factores que establecen la tonalidad en la escala de grises

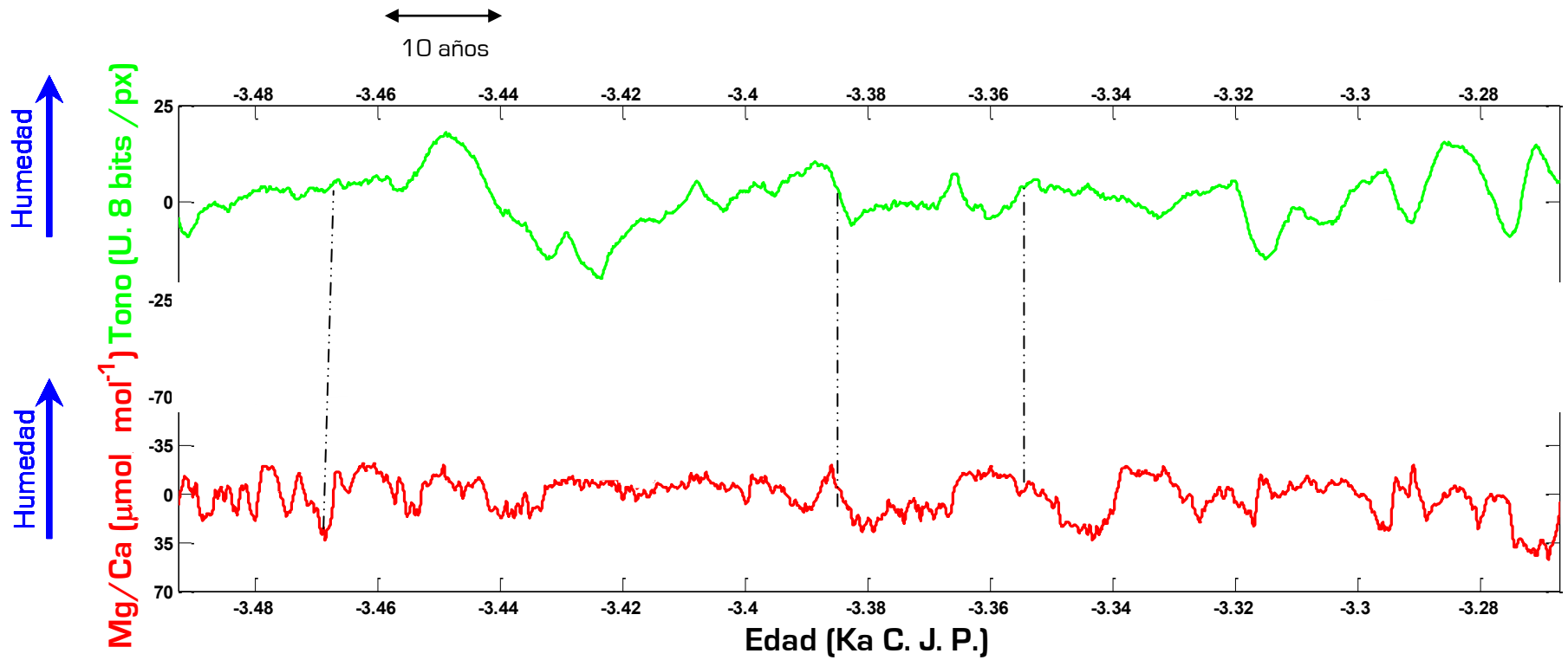


Figura 6.10. Comparación de las series de tiempo para los siguientes 300 años del tramo 4 de JR1a producidas a partir de la escala de grises (en verde) y de la relación Mg/Ca (en rojo, el eje “y” está invertido). La línea punteada indica la correspondencia entre las señales de ambas series.

### Análisis espectral de una estalagmita bandeada como indicador paleoclimático

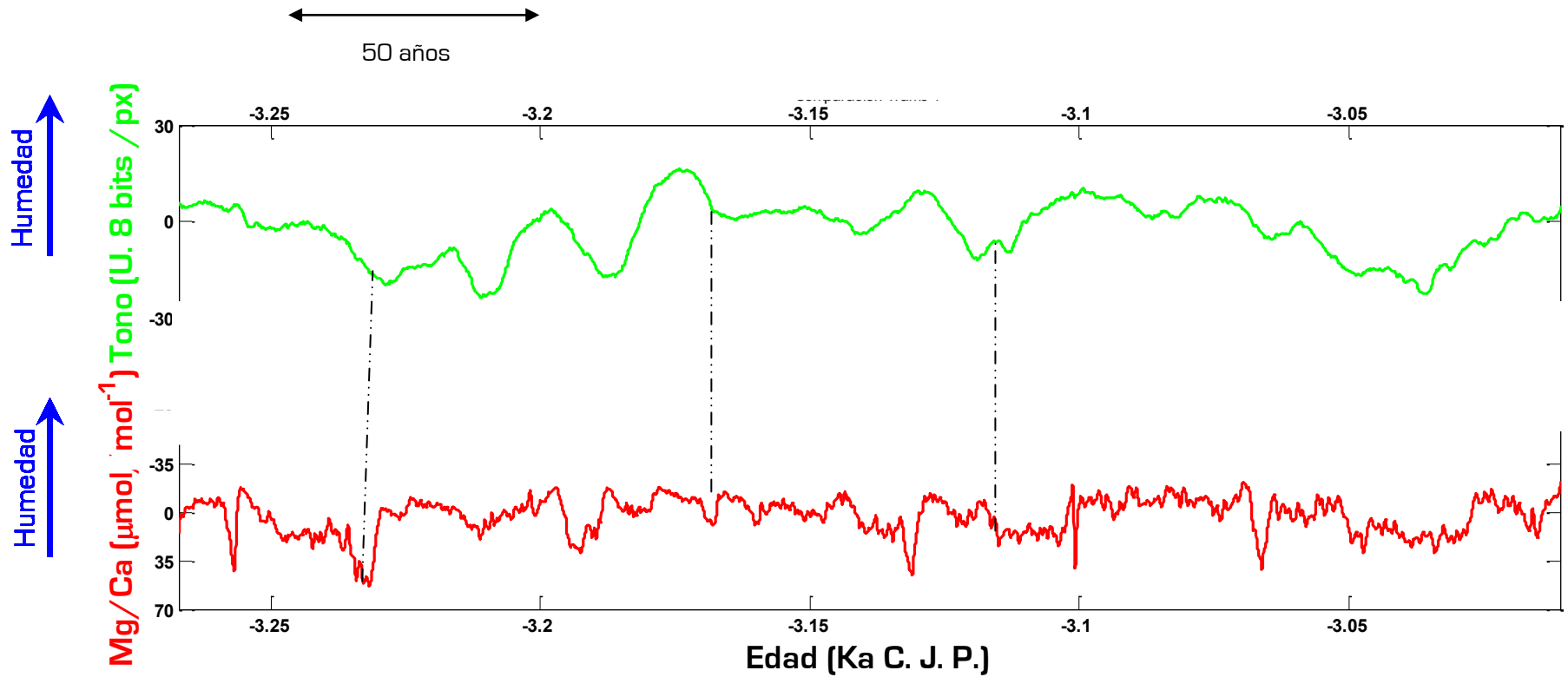


Figura 6.11. Comparación de las series de tiempo para los últimos 250 años del tramo 4 de JR1a producidas a partir de la escala de grises (en verde) y de la relación Mg/Ca (en rojo, el eje “y” está invertido). La línea punteada indica la correspondencia entre las señales de ambas series.

### Estudio de los factores que establecen la tonalidad en la escala de grises

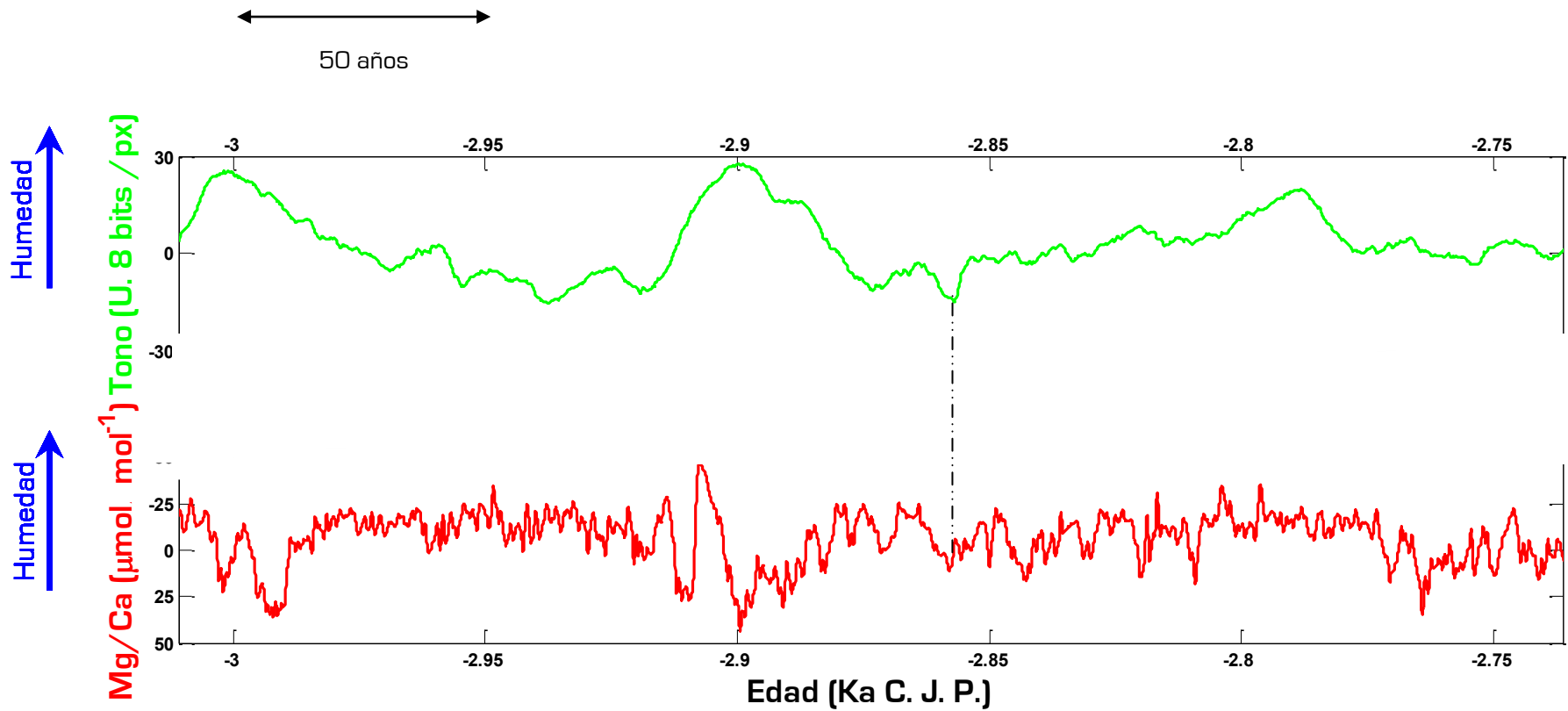


Figura 6.12. Comparación de las series de tiempo para los siguientes 250 años del tramo 4 de JR1a producidas a partir de la escala de grises (en verde) y de la relación Mg/Ca (en rojo, el eje “y” está invertido). La línea punteada indica la correspondencia entre las señales de ambas series.

### Análisis espectral de una estalagmita bandeada como indicador paleoclimático

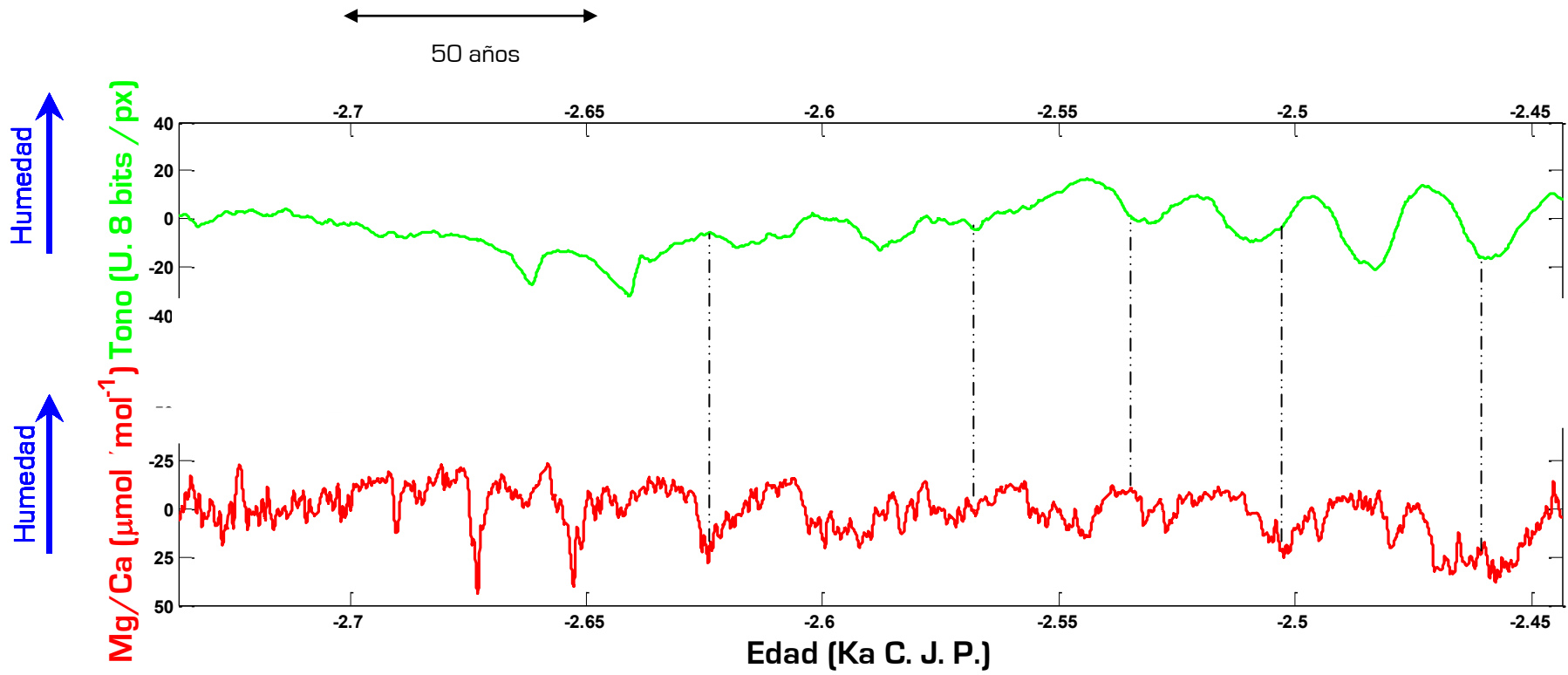


Figura 6.13. Comparación de las series de tiempo para los últimos 250 años del tramo 4 de JR1a producidas a partir de la escala de grises (en verde) y de la relación Mg/Ca (en rojo, el eje “y” está invertido). La línea punteada indica la correspondencia entre las señales de ambas series.

# Estudio de los factores que establecen la tonalidad en la escala de grises

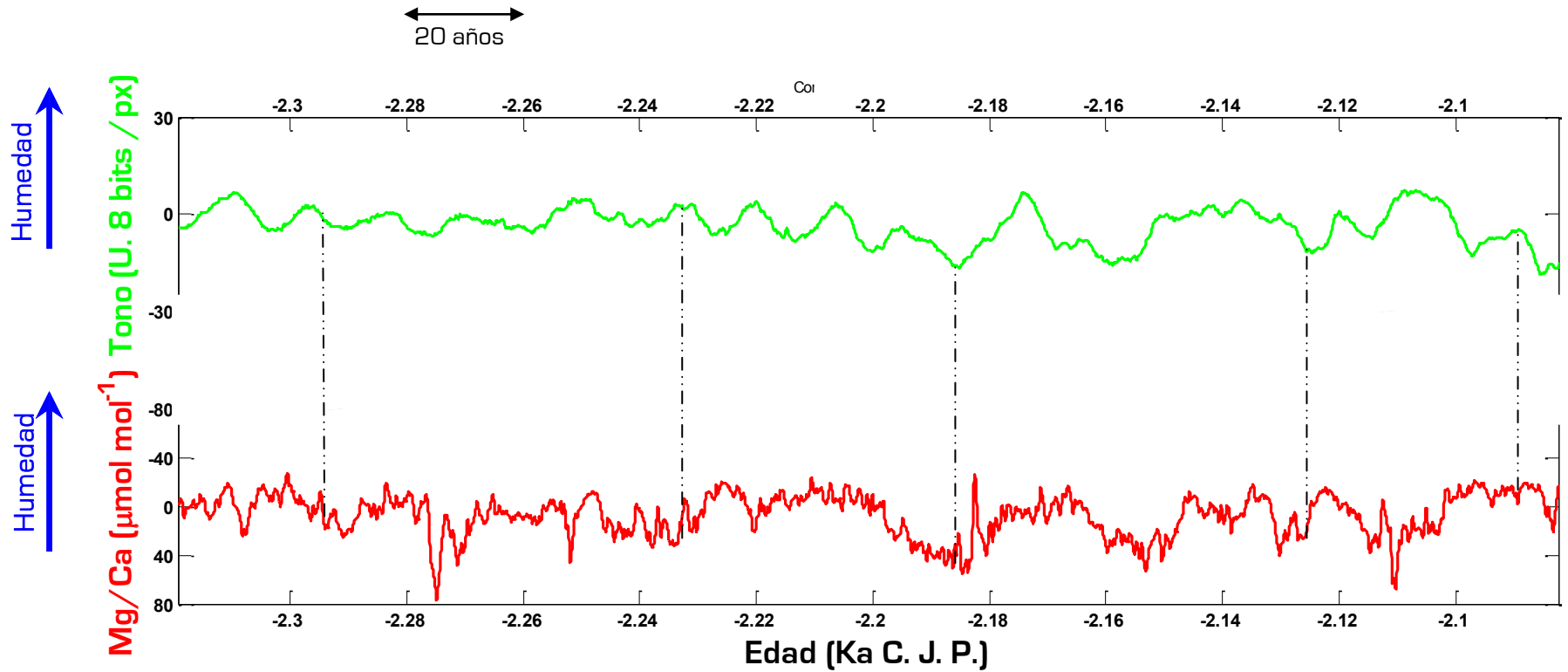


Figura 6.14. Comparación de las series de tiempo para los primeros 240 años del tramo 5 de JR1a producidas a partir de la escala de grises (en verde) y de la relación Mg/Ca (en rojo, el eje “y” está invertido). La línea punteada indica la correspondencia entre las señales de ambas series.



## Análisis espectral de una estalagmita bandeada como indicador paleoclimático

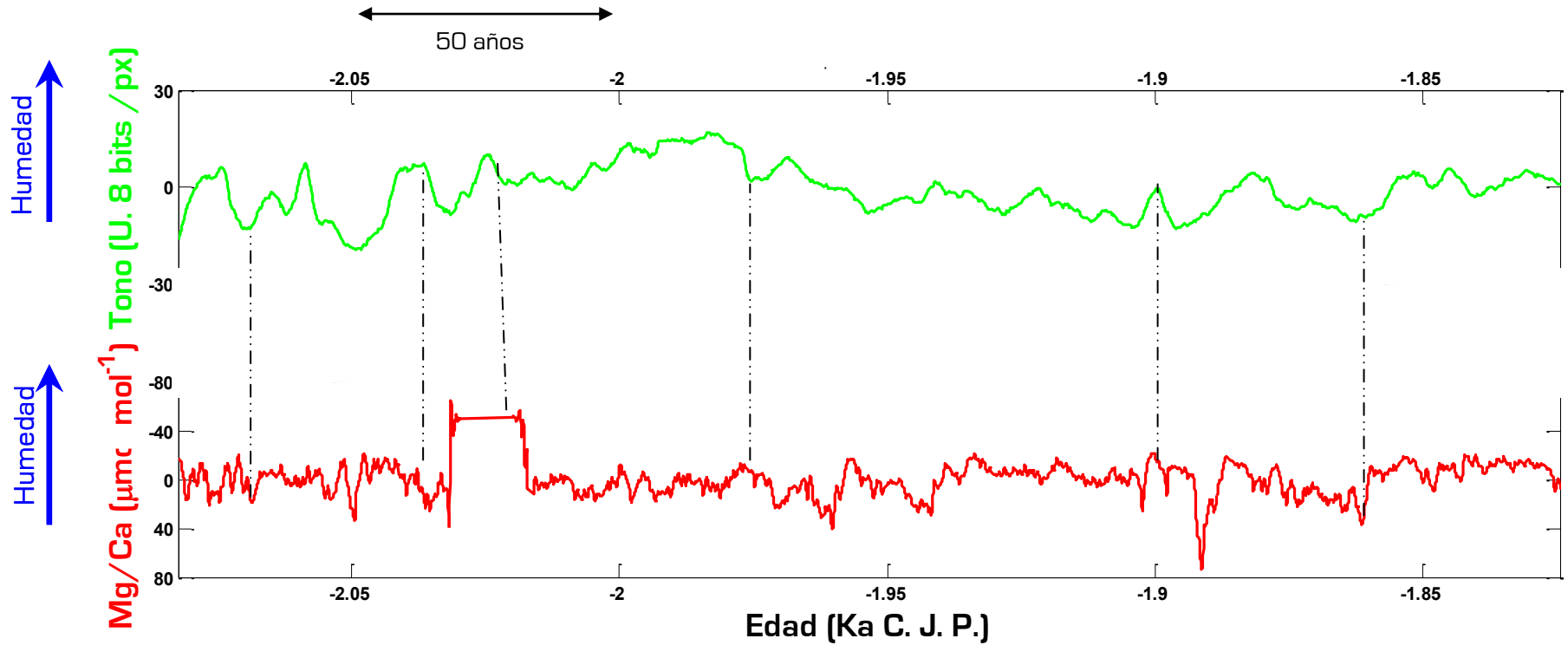


Figura 6.15. Comparación de las series de tiempo para los siguientes 300 años del tramo 5 de JR1a producidas a partir de la escala de grises (en verde) y de la relación Mg/Ca (en rojo, el eje “y” está invertido). La línea punteada indica la correspondencia entre las señales de ambas series.

Estudio de los factores que establecen la tonalidad en la escala de grises

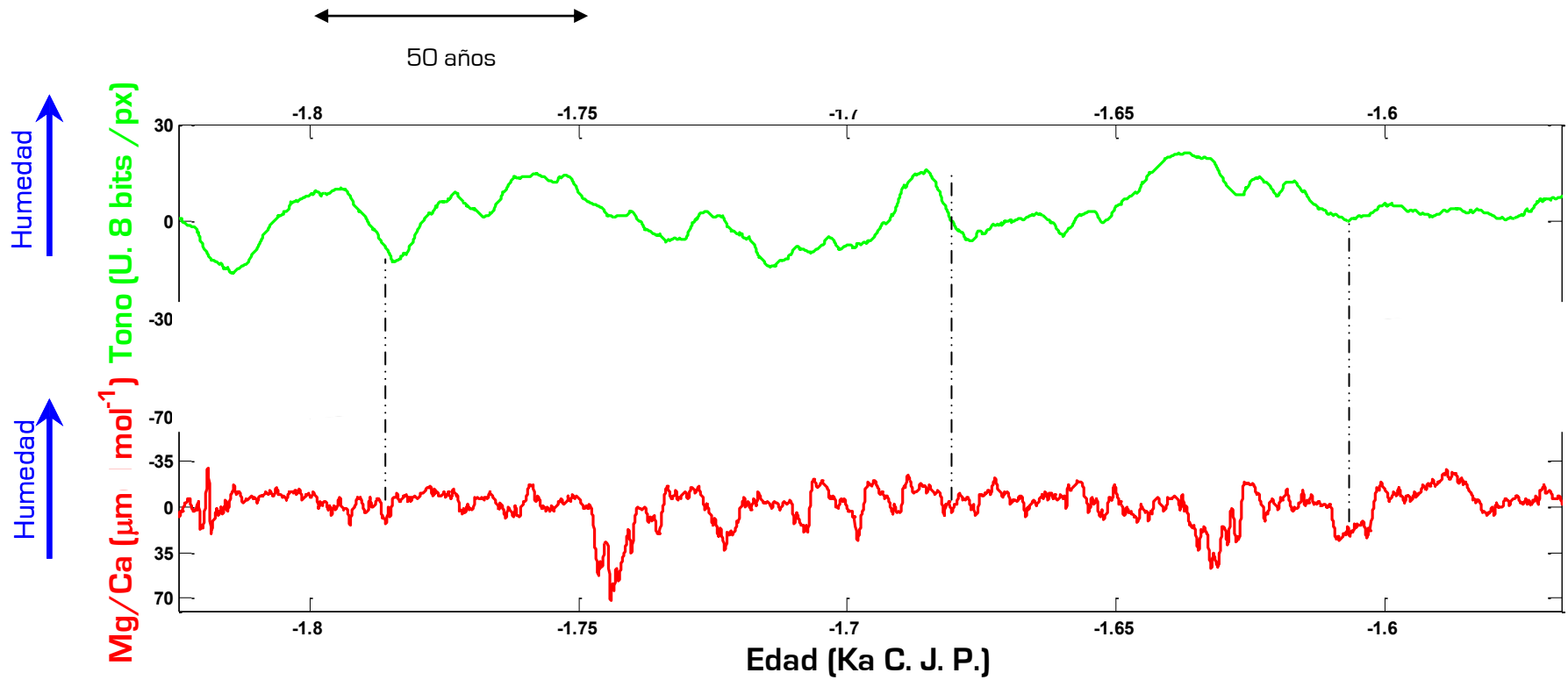


Figura 6.16. Comparación de las series de tiempo para los siguientes 300 años del tramo 5 de JR1a producidas a partir de la escala de grises (en verde) y de la relación Mg/Ca (en rojo, el eje “y” está invertido). La línea punteada indica la correspondencia entre las señales de ambas series.

## Análisis espectral de una estalagmita bandeada como indicador paleoclimático

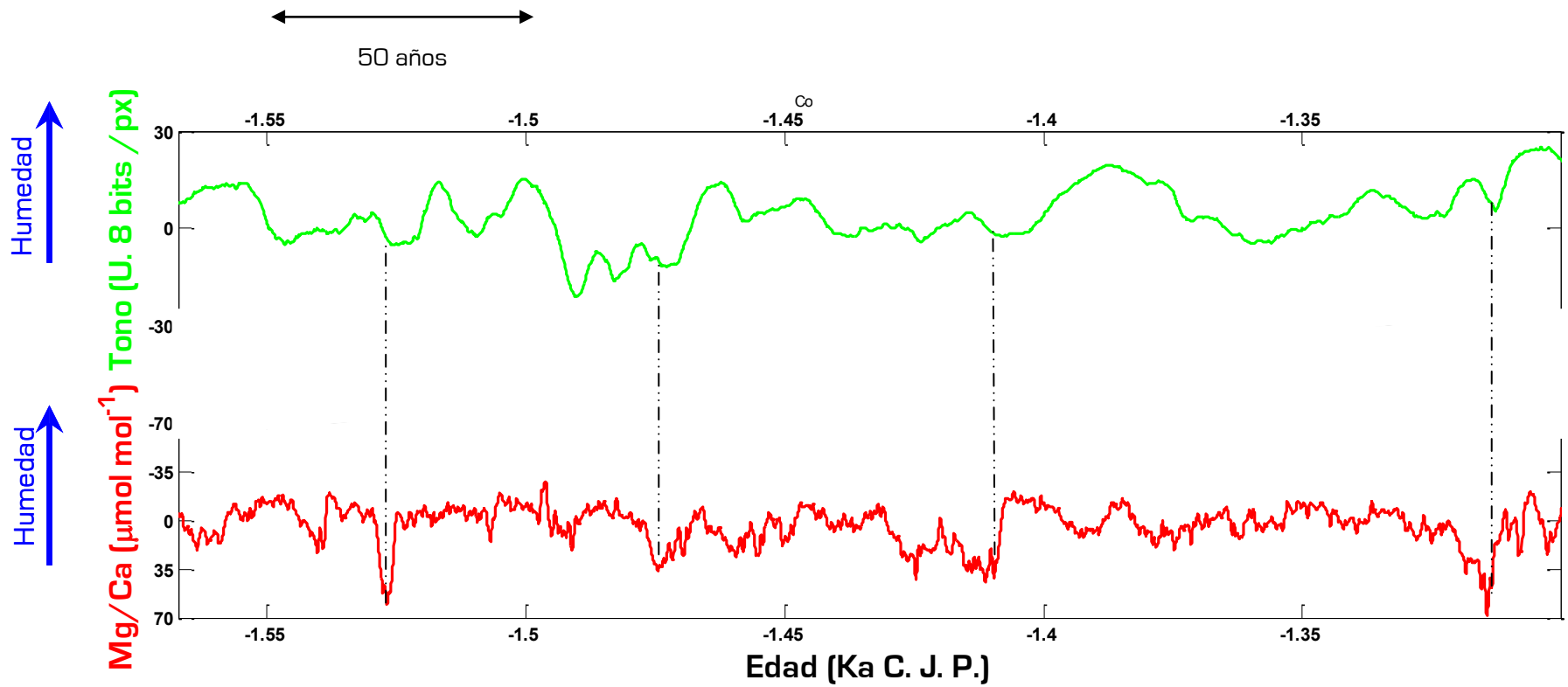


Figura 6.17. Comparación de las series de tiempo para los siguientes 300 años del tramo 5 de JR1a producidas a partir de la escala de grises (en verde) y de la relación Mg/Ca (en rojo, el eje “y” está invertido). La línea punteada indica la correspondencia entre las señales de ambas series.

### Estudio de los factores que establecen la tonalidad en la escala de grises

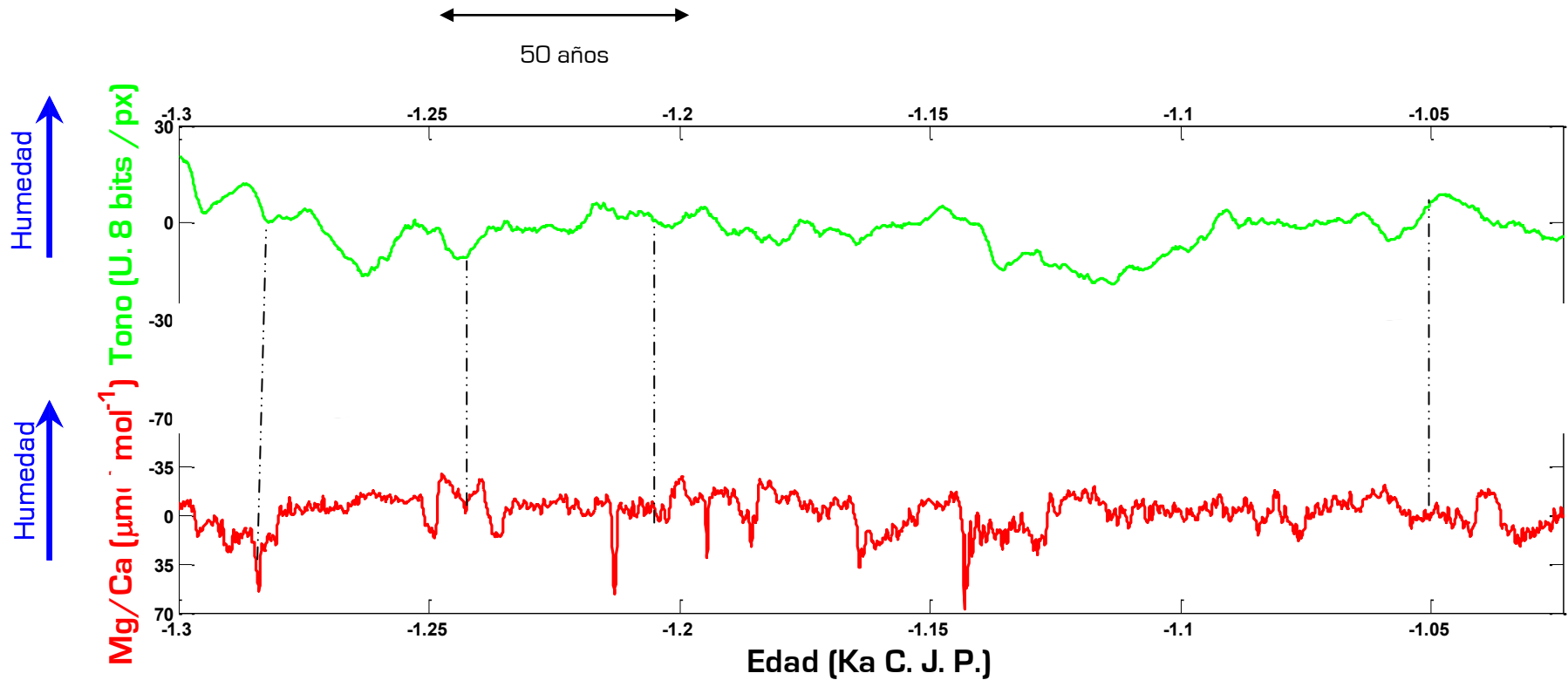


Figura 6.18. Comparación de las series de tiempo para los siguientes 300 años del tramo 5 de JR1a producidas a partir de la escala de grises (en verde) y de la relación Mg/Ca (en rojo, el eje “y” está invertido). La línea punteada indica la correspondencia entre las señales de ambas series.

### Análisis espectral de una estalagmita bandeada como indicador paleoclimático

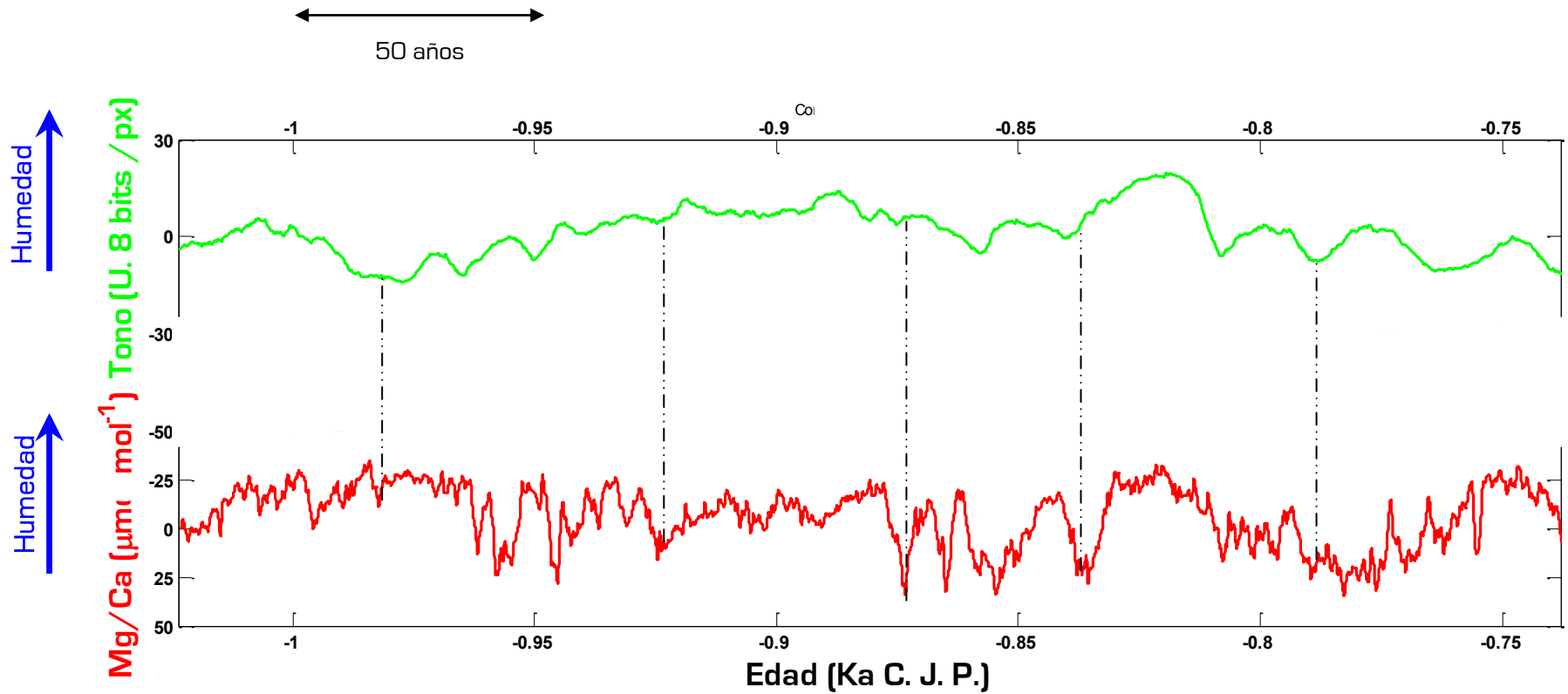


Figura 6.19. Comparación de las series de tiempo para los siguientes 300 años del tramo 5 de JR1a producidas a partir de la escala de grises (en verde) y de la relación Mg/Ca (en rojo, el eje “y” está invertido). La línea punteada indica la correspondencia entre las señales de ambas series.

Estudio de los factores que establecen la tonalidad en la escala de grises

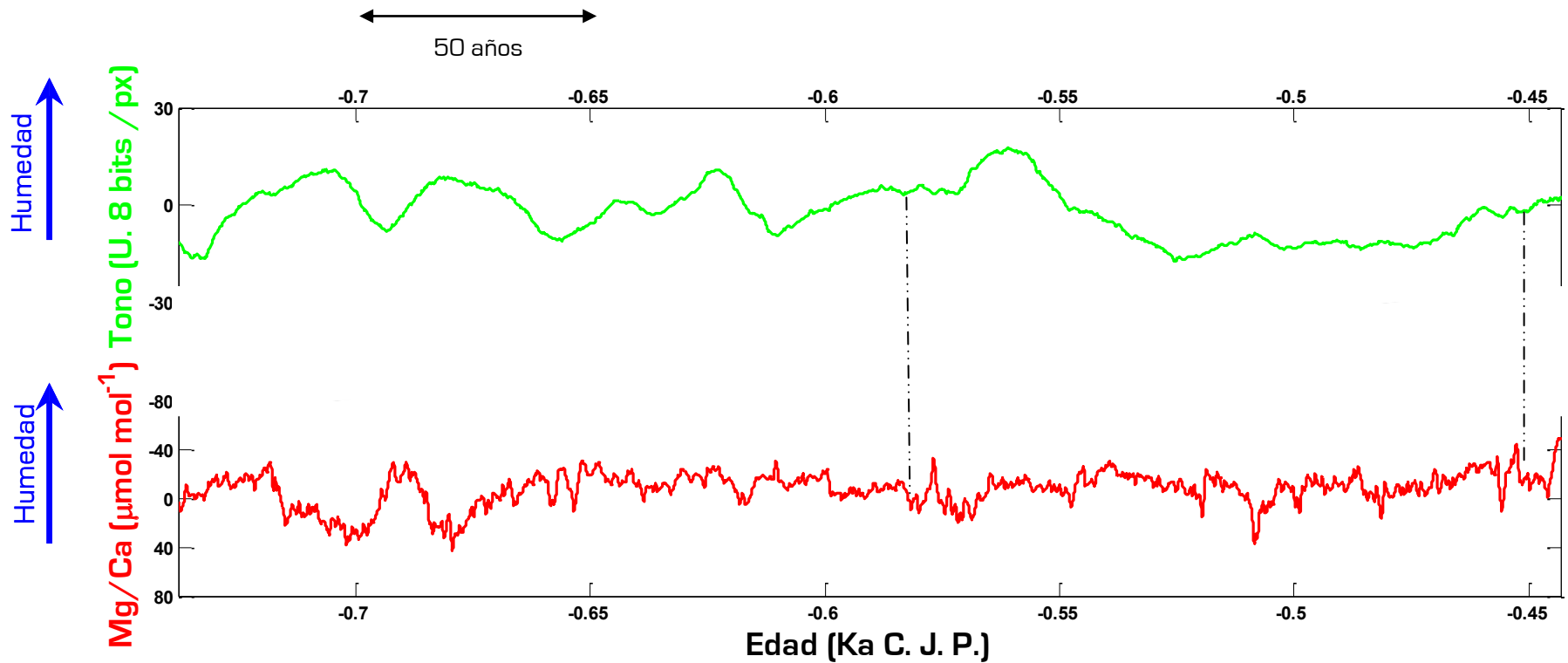


Figura 6.20. Comparación de las series de tiempo para los siguientes 300 años del tramo 5 de JR1a producidas a partir de la escala de grises (en verde) y de la relación Mg/Ca (en rojo, el eje “y” está invertido). La línea punteada indica la correspondencia entre las señales de ambas series.

## Análisis espectral de una estalagmita bandeada como indicador paleoclimático

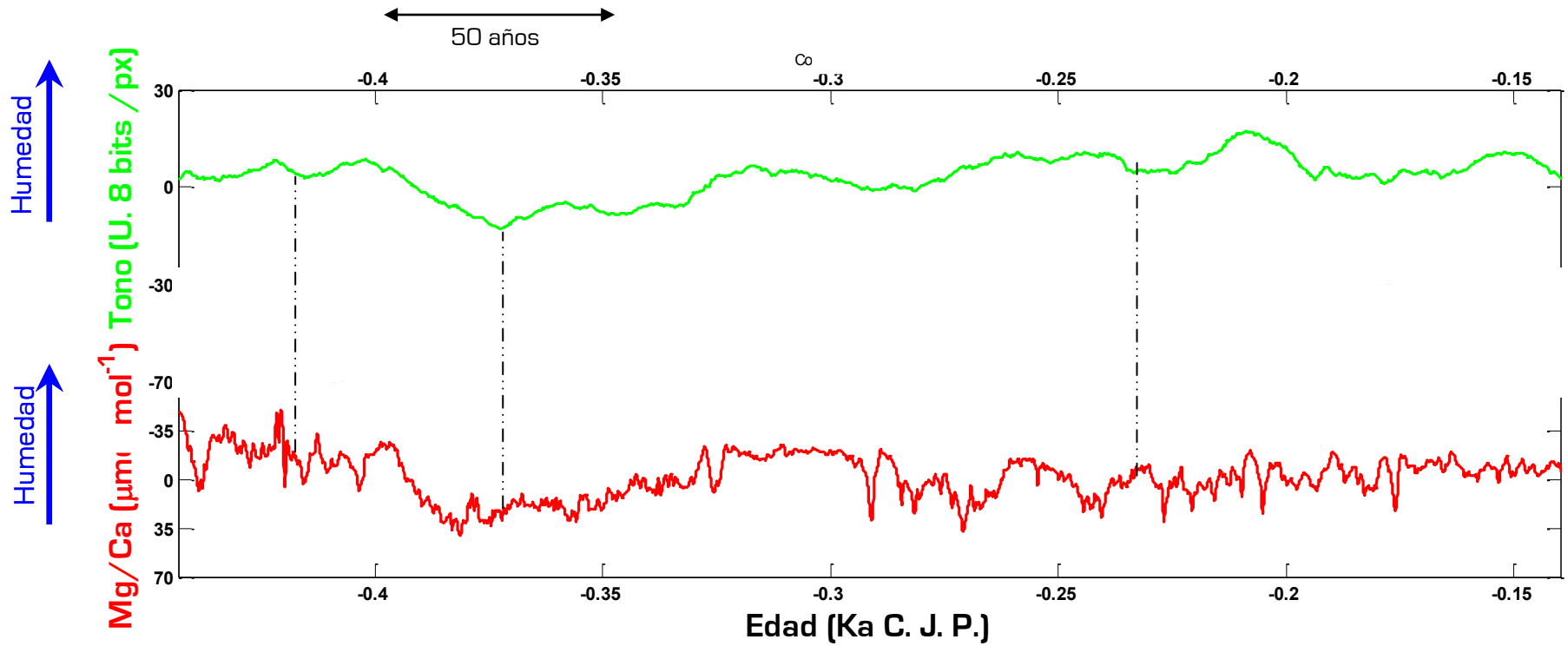


Figura 6.21. Comparación de las series de tiempo para los siguientes 300 años del tramo 5 de JR1a producidas a partir de la escala de grises (en verde) y de la relación Mg/Ca (en rojo, el eje “y” está invertido). La línea punteada indica la correspondencia entre las señales de ambas series.

Estudio de los factores que establecen la tonalidad en la escala de grises

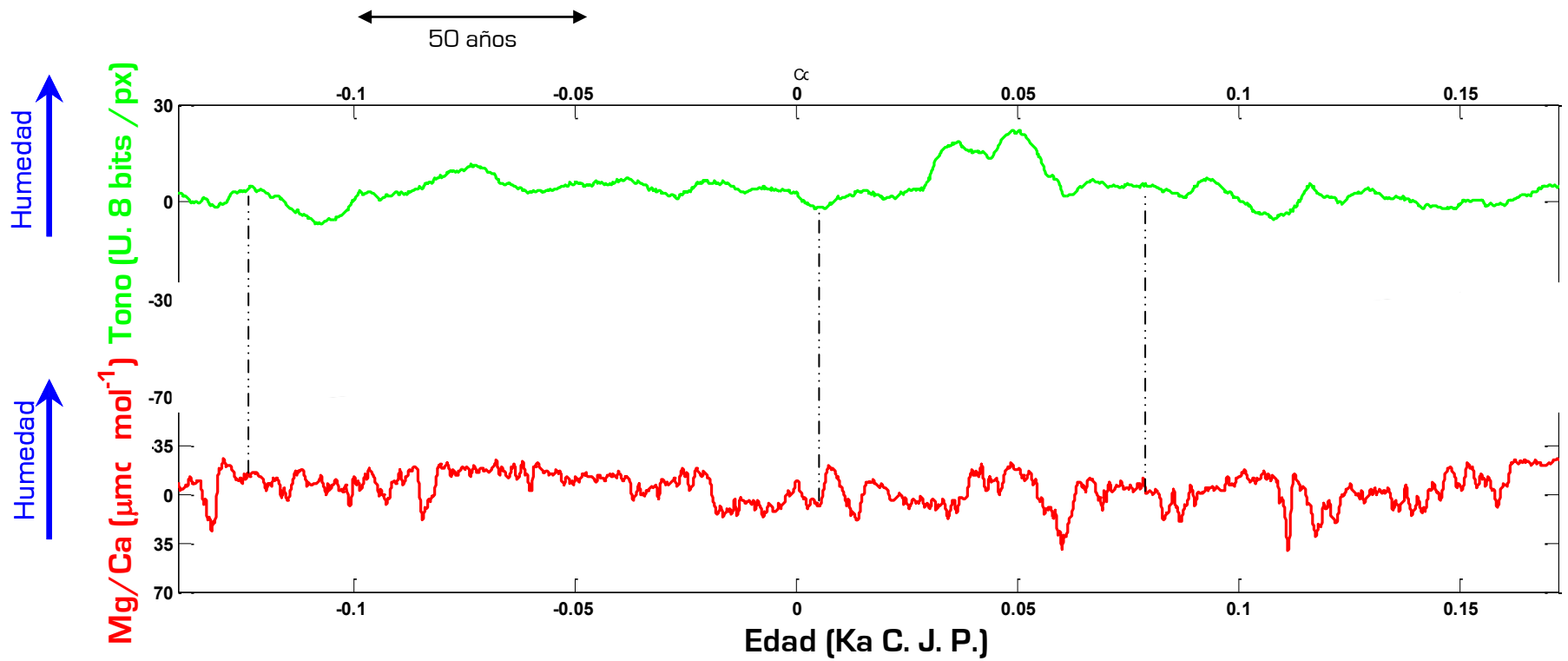


Figura 6.22. Comparación de las series de tiempo para los siguientes 300 años del tramo 5 de JR1a producidas a partir de la escala de grises (en verde) y de la relación Mg/Ca (en rojo, el eje “y” está invertido). La línea punteada indica la correspondencia entre las señales de ambas series.



## Análisis espectral de una estalagmita bandeada como indicador paleoclimático

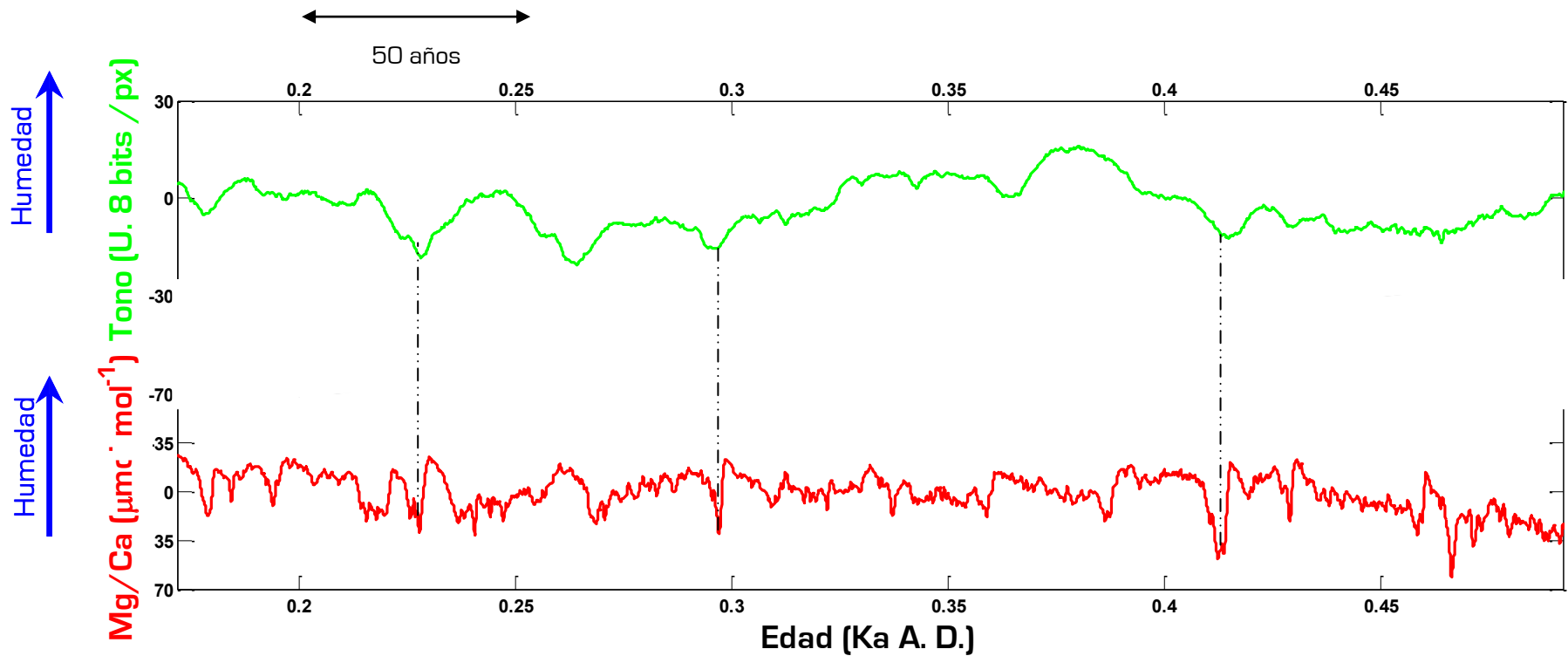


Figura 6.23. Comparación de las series de tiempo para los siguientes 300 años del tramo 5 de JR1a producidas a partir de la escala de grises (en verde) y de la relación Mg/Ca (en rojo, el eje “y” está invertido). La línea punteada indica la correspondencia entre las señales de ambas series.

## Estudio de los factores que establecen la tonalidad en la escala de grises

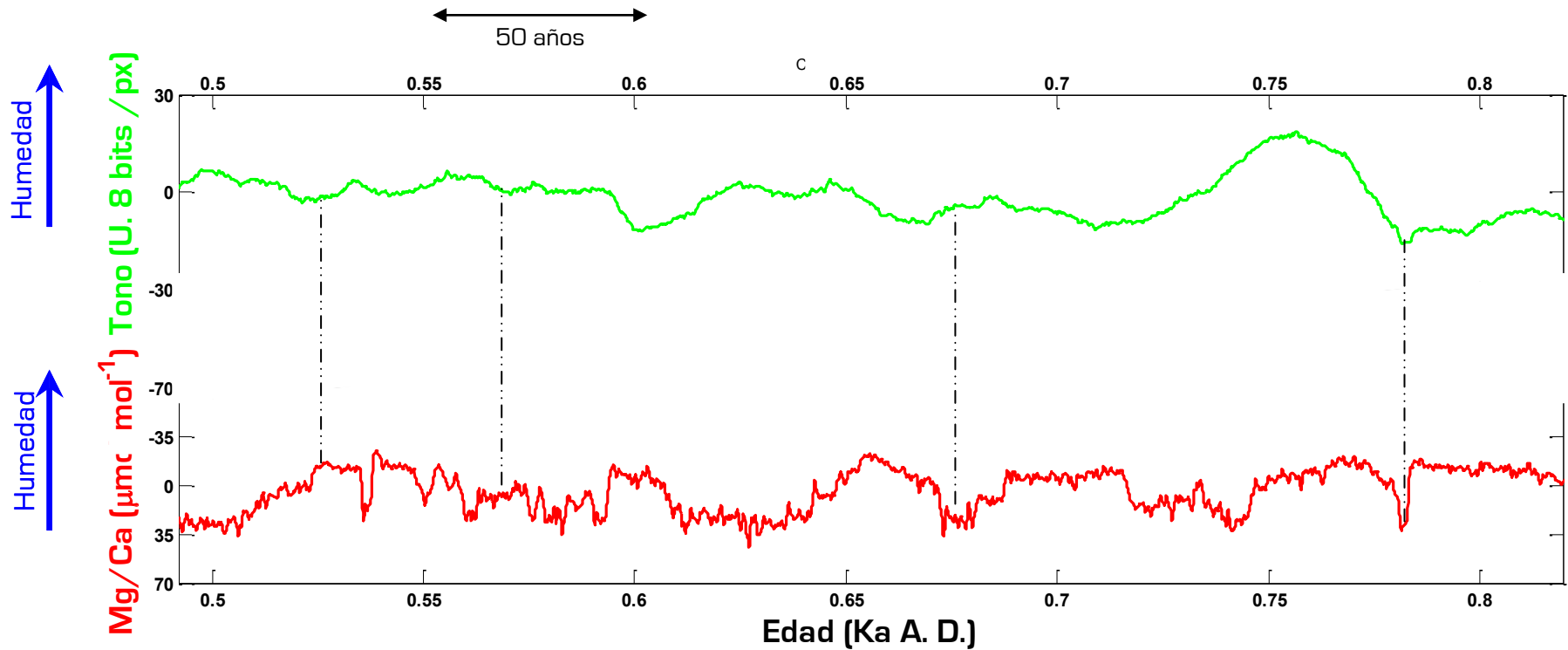


Figura 6.24. Comparación de las series de tiempo para los siguientes 300 años del tramo 5 de JR1a producidas a partir de la escala de grises (en verde) y de la relación Mg/Ca (en rojo, el eje “y” está invertido). La línea punteada indica la correspondencia entre las señales de ambas series.

## Análisis espectral de una estalagmita bandeada como indicador paleoclimático

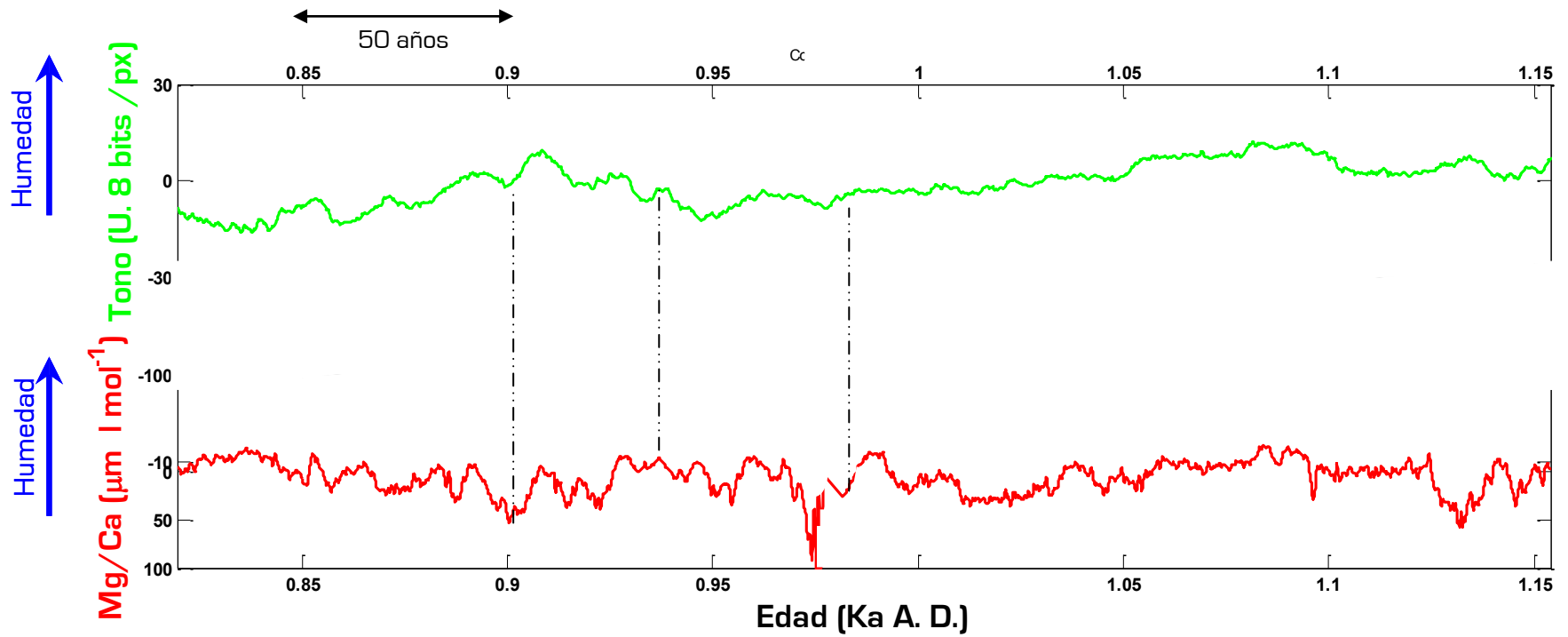


Figura 6.25. Comparación de las series de tiempo para los últimos 300 años del tramo 5 de JR1a producidas a partir de la escala de grises (en verde) y de la relación Mg/Ca (en rojo, el eje “y” está invertido). La línea punteada indica la correspondencia entre las señales de ambas series.

### Estudio de los factores que establecen la tonalidad en la escala de grises

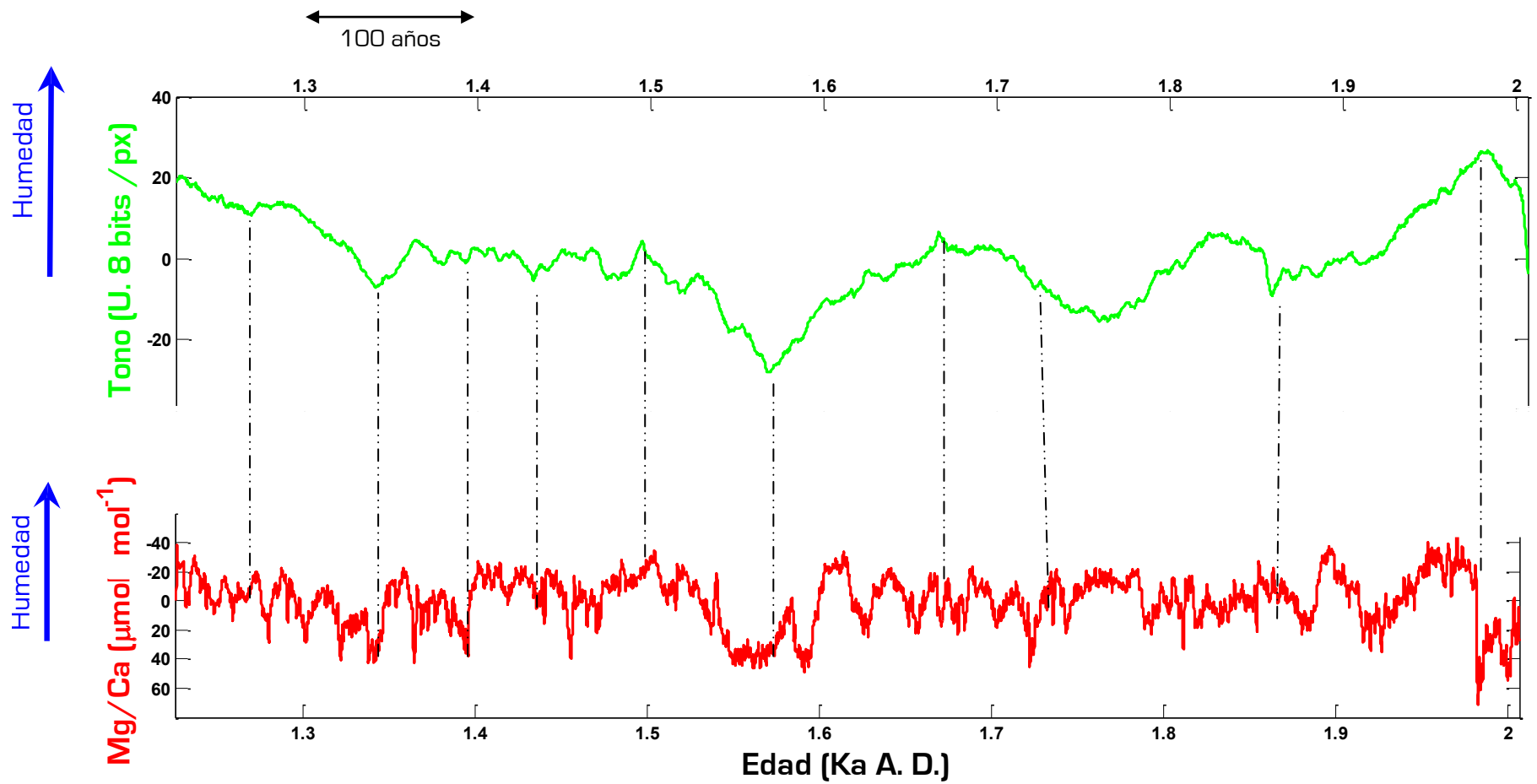


Figura 6.26. Comparación de las series de tiempo para la punta de JR1a, producidas a partir de la escala de grises (en verde) y de la relación Mg/Ca (en rojo, el eje “y” está invertido). Debido a la baja resolución de esta zona para la escala de grises, se presentan las graficas más alargadas en el eje de las ordenadas, con el fin de hacer notar las diferencias en las señales.

Esto era de esperarse ya que la relación Mg/Ca es un indicador de humedad, al igual que pensamos lo era el tono del bandeo. Así, el sentido de la correlación implica el hecho de que niveles mayores en la relación Mg/Ca, que señalan periodos de menor humedad corresponden con intensidades menores en la tonalidad y viceversa. De manera que podemos suponer que se tiene calcita menos pura (que da tonos más oscuros) en las condiciones de menor humedad, debido a que la impureza es presumiblemente de origen orgánico o detrítico, siendo su incorporación a la estalagmita, como en el caso de las varvas, donde a menor cantidad de agua hay una mayor oportunidad para la sedimentación o precipitación.

La correlación negativa visual sugiere que la escala de grises de la estalagmita contiene información paleoclimática, ya que, en general, correlaciona con otro indicador climático presente en la misma estalagmita.

Ahora bien, existen tres tipos de diferencias entre la escala de grises y Mg/Ca en JR1a. La primera tiene que ver con la estructura de las series. La segunda con la intensidad de la señal, es decir por qué hay mínimos o máximos que son muy intensos en Mg/Ca y casi imperceptibles en la escala de grises. Mientras que la tercera, tiene que ver con el hecho de que las señales de Mg/Ca a veces están desplazadas tanto hacia el pasado como hacia el futuro con respecto a la escala de grises.

Sobre la estructura de las series, es claro que Mg/Ca es más sensible a la variabilidad climática que la escala de grises. Sin embargo, en las figuras 6.2 - 6.25 es posible determinar que la sensibilidad de la escala de grises es dependiente con la resolución, espaciotemporal. Así los tramos 1 y 2 (figuras 6.2-6.4), que presentan mayor resolución pues tenían una tasa de crecimiento mayor, presentan una mayor variación en la señal que el tramo de la punta, de menor resolución (figura 6.25). Cabe mencionar que la resolución de la escala de grises es, a su vez, función del grado de magnificación utilizada para capturar la imagen, de manera que en futuros trabajos, se podría modificar esta variable para lograr una variación adecuada.

Sobre la intensidad de la señal, es probable que sea la cantidad de materia orgánica disponible y en mucho menor proporción de terrígenos disponibles, los que sean los responsables de esta variación. Así una señal de sequía es vista por Mg/Ca, pero puede llegar a pasar desapercibida por la escala de grises, simplemente porque aunque la cantidad de agua es menor, también hay menor cantidad de materia orgánica disponible al disminuir la productividad; de manera que combinados estos dos efectos, la señal no parece ser diferente a la de un régimen húmedo que tiene suficiente materia orgánica. El punto que apoya esta explicación, es que generalmente

fueron algunos mínimos en Mg/Ca los que no aparecen en la escala de grises y no los máximos. Pero también es posible, como sucede con otros indicadores en espeleotemas, que la escala de grises sea, además de un indicador de humedad, también uno de temperatura o incluso uno de intensidad de viento, pues la variación de la fuerza de estos últimos determinaría cuanta materia orgánica es sepultada y susceptible a descomposición, la cual, a su vez pensamos es una de los responsables de la variación en el tono de la estalagmita. Otro factor a considerar es que la escala de grises no es lineal (apartado 2.6.3, capítulo II), por lo que al graficar los valores de los tonos, tenemos respuestas que pueden parecer más o menos intensas de lo que fueron en realidad. Finalmente es necesario comentar que hay varios “valles” y “cimas” de decenas de años en los patrones del registro de la escala de grises que no aparecen en Mg/Ca que recuerdan que este último registro de humedad tampoco es perfecto, pues es influenciado por varios factores además de la humedad como la litología, el tiempo de retención y la fuente del material, entre otros (Fairchild y Treble, 2009).

En cuanto al desplazamiento, es probable que sea generado artificialmente en la forma como se recolectaron los datos. La primera causa tiene que ver con un error instrumental que tenía en el conteo el LA-ICP-MS, el cual consistía en una mala calibración del contador de tiempo. La segunda causa son errores humanos en el montaje de las muestras a analizar y la unión de la información recabada para crear la serie de tiempo tanto en la escala de grises como en Mg/Ca. Y la tercera causa tiene que ver con parámetros instrumentales como la abertura del haz del laser, el cual puede afectar el aspecto temporal de la señal.

Para probar matemáticamente la correlación entre la serie temporal en escala de grises y la de Mg/Ca, usamos la prueba de Kendall, la cual calcula el coeficiente de correlación no paramétrico  $\tau$ , cuyo papel es cuantificar la relación entre dos descriptores. La prueba de Kendall supone como primer requisito una interpolación de la serie con mayor número de datos, para igualar el número de datos en ambas series.

De manera que la serie de Mg/Ca se interpoló para mantener la temporalidad establecida en la escala de grises. Una vez hecho esto, se realiza la prueba no paramétrica de Kendall, donde la hipótesis nula,  $H_0$ , implica la no correlación,  $\tau = 0$ , mientras que la hipótesis alternativa,  $H_A$ , supone una correlación  $\tau \neq 0$ . La tabla 6.1 presenta los resultados de la prueba para cada tramo, con su coeficiente de correlación,  $\tau$ , y su nivel de significancia.

Tabla 6.1. Resultados de la prueba de Kendall para cada tramo donde se compararon los dos indicadores estudiados de JR1a.

Tramo	Tao	Valor p
1	0.0538	< 0.05
2	-0.08918	< 0.05
3	0.0333	< 0.05
4	-0.0040	> 0.05
5	-0.0194	< 0.05
6	-0.0767	< 0.05

La prueba de Kendall arroja en cuatro tramos un coeficiente de correlación no paramétrico Tao negativo, que verifica el carácter de la correlación negativa entre las series. Hay que hacer énfasis en que la importancia de los valores de Tao radica en que éstos son diferentes de cero. De manera que se acepta la hipótesis alternativa; sin embargo, los coeficientes de correlación Tao, son en extremo bajos aunque al mismo tiempo tienen un alto nivel de significancia, con excepción del tramo 4. (Tabla 6.1).

Si bien la prueba de Kendall no parece un argumento concluyente para aceptar una correlación entre estos dos descriptores, hay que recordar que esto se debe en gran parte a la estructura de las series de tiempo, y los diferentes grados de sensibilidad de cada uno de ellos, como se discutió con anterioridad. De manera adicional, como lo muestra la comparación visual de ambos indicadores en las figuras 6.2-6.25, la misma estructura de las series, hace que en varios momentos la señal correspondiente en Mg/Ca aparezca en tiempos anteriores o posteriores a la de la escala de grises, (por las razones antes expuestas), de manera que esto es un factor más para el bajo valor de  $\tau$ .

Una manera más ortodoxa de comparar las series de tiempo, es comparar las señales correspondientes a ciclos climáticos (Trauth, 2007), para lo cual realizamos un análisis de espectro cruzado (Figura 6.27). Dicho espectro cruzado requiere que los elementos de la serie temporal estén a intervalos de tiempo iguales por lo que es necesario interpolar la serie. Con la finalidad de optimizar la presentación de datos, obtuvimos el espectro sólo para frecuencias menores a  $60 \text{ ka}^{-1}$  (16 años), utilizando una serie interpolada que tuviera un tiempo de muestreo igual a 10 años.

Las figura 6.27a muestra el espectro cruzado entre la escala de grises y el Mg/Ca de JR1a, mientras que la figura 6.27b muestra la coherencia, la cuál es un número real entre 0 y 1, donde 0 indica la no correlación y 1 la máxima correlación entre dos series de tiempo  $f(t)$  y  $g(t)$ ; en este caso la escala de grises y Mg/Ca, en la frecuencia  $\nu$  [Trauth, 2007]. Las frecuencias señaladas en el espectro cruzado tienen una coherencia mayor a 0.3, exceptuando la señal, cuyo periodo es de 217 años, que tiene una coherencia de 0.05, que sin embargo es la segunda señal de mayor potencia. La señal de mayor potencia [la primera en aparecer leyendo de izquierda a derecha], cuya coherencia está entre el 0.1 y el 0.2, está compuesta en realidad por señales cuyos periodos son de 1137, 1279, 1462 y 2047 años. Lo anterior indica que, aunque la escala de grises y la relación Mg/Ca presentan diferencias aparentes en estructura, ambos indicadores contienen la misma información climática a escala sub-centenal, mas no sub-anual.

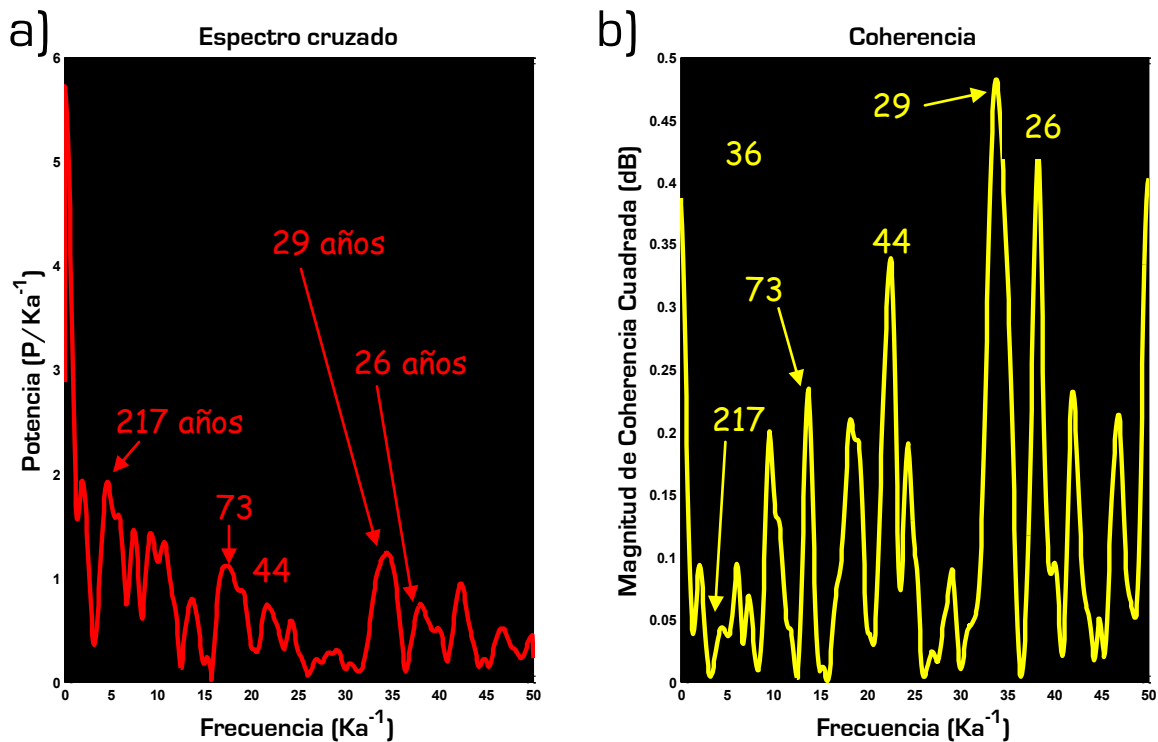


Figura 6.27. a) Espectro cruzado de las series en escala de grises y de la relación Mg/Ca de JR1a. b) La Coherencia de estas series muestra el nivel de correlación de cada una de las frecuencias. Es graficada en escala logarítmica por lo que sus unidades están dadas en decibeles (dB). Los índices indican la duración del periodo de la frecuencia en años para las señales con un nivel de coherencia mayor a 0.3, exceptuando la señal de 217 cuya coherencia es de 0.05.

### 6.3 Causantes del color analizados por microscopio

Con el fin de conocer la naturaleza del bandeo era necesario observar al microscopio electrónico indicios en la mineralogía o en la textura que confirieran esta cualidad.



Observamos el tramo 1-I y el tramo 1-II y ante el hecho de que la muestra visualmente presenta una textura homogénea (Figura 6.28). Elegimos 15 puntos a lo largo de los dos pedazos del tramo1 (Figura 6.29), donde se analizó la presencia de  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  y  $\text{SiO}_2$ , en zonas alrededor de mínimos locales en la escala de grises, con el fin de encontrar alguna diferencia. Al mismo tiempo se buscó ver si la variación de  $\text{SiO}_2$  era congruente con la tonalidad. De serlo, serían las arcillas las responsables de los tonos oscuros en la estalagmita.

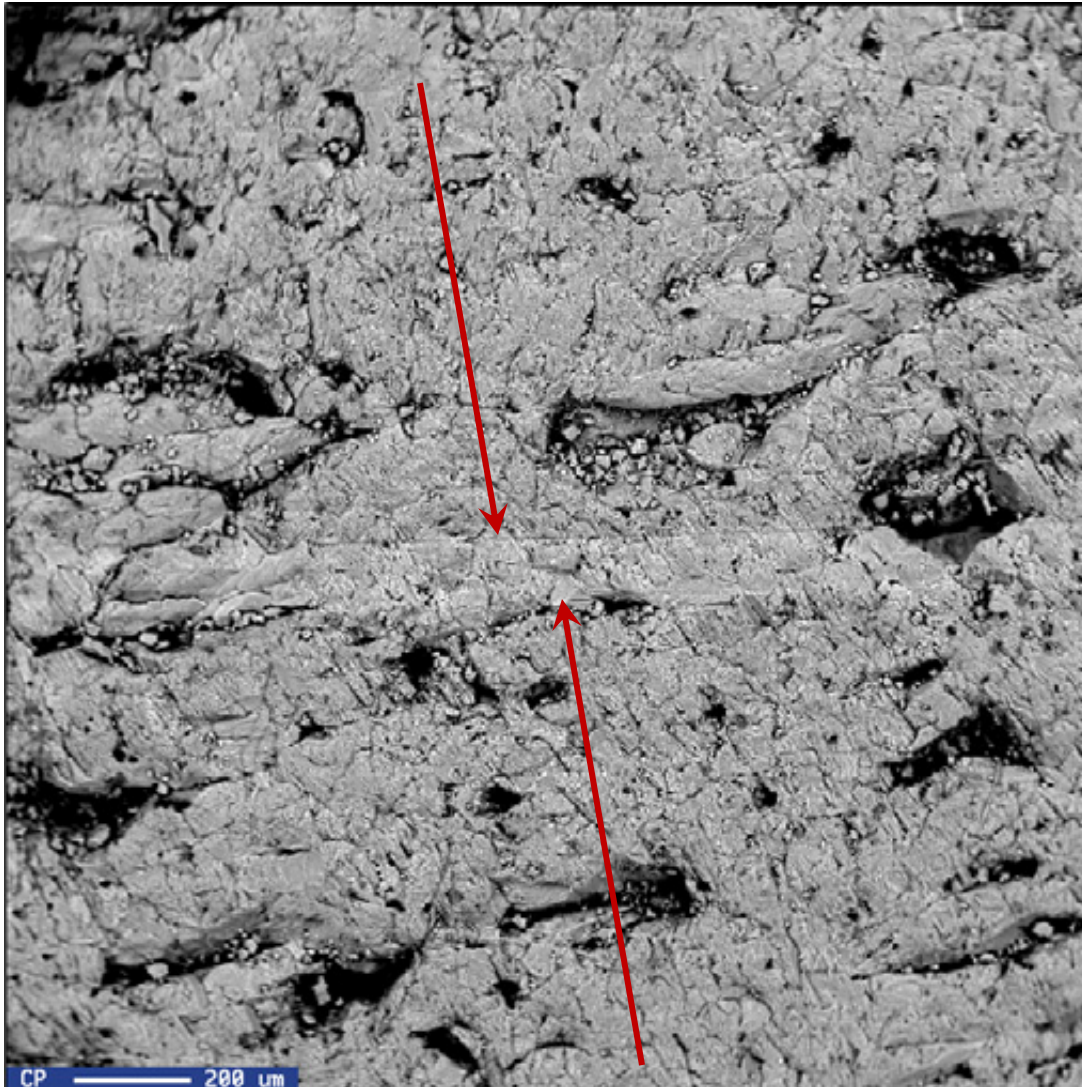


Figura 6.28. Imagen del punto 15 (señalado en la siguiente figura) del tramo 1 de JR1a. Las flechas señalan los límites inferior y superior de la franja por donde se realizó la ablación con el Laser en el análisis por LA-ICP-MS.

La tabla 2 muestra que no hay correlación entre la variación en la tonalidad y la cantidad de  $\text{SiO}_2$ . Incluso hay puntos como el 8 y 13, de tonalidad relativamente oscura, cuya cantidad de silicio es nula.

### Estudio de los factores que establecen la tonalidad en la escala de grises

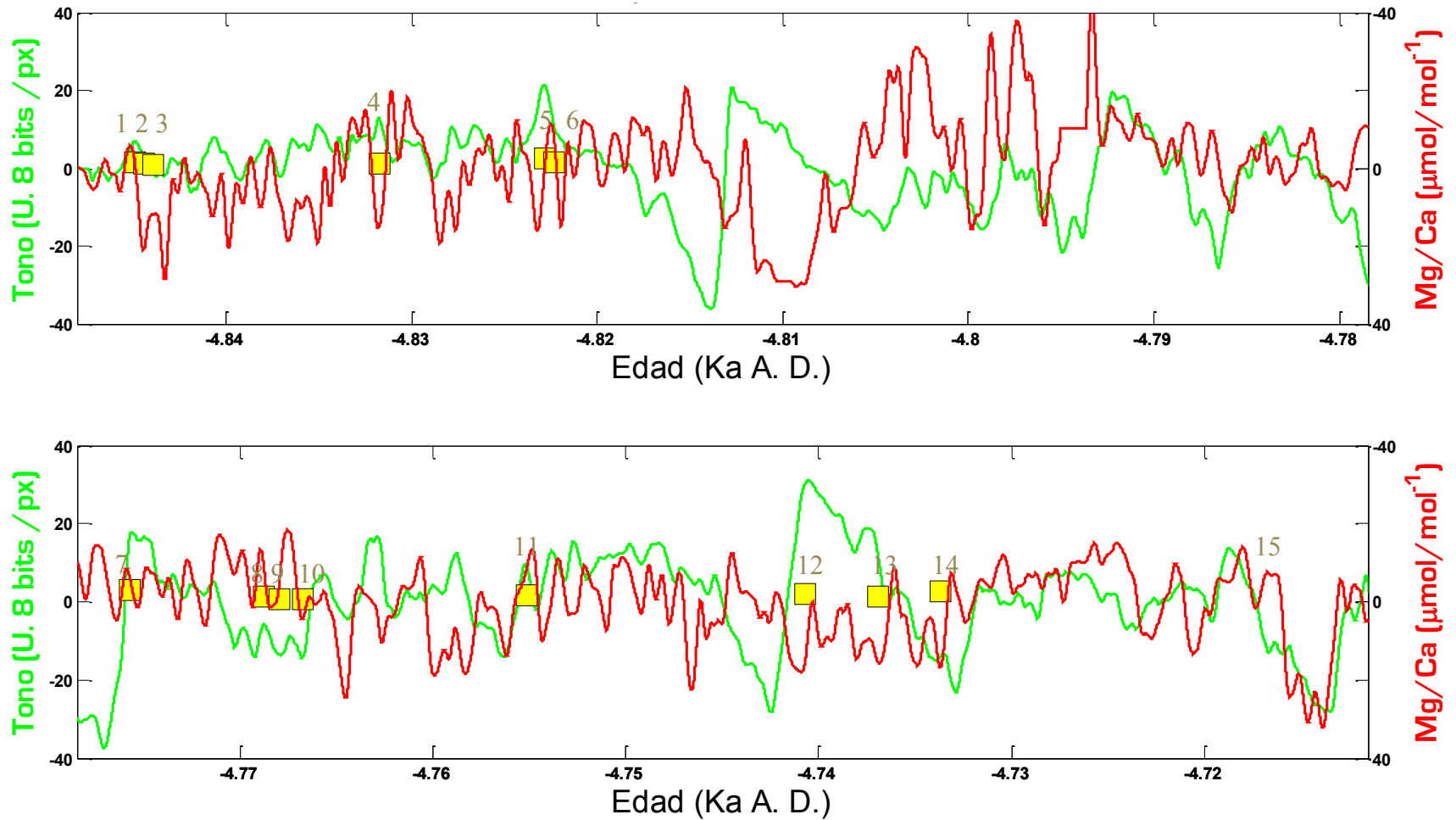


Figura 6.29. Puntos sobre el tramo 1 (en amarillo) graficados sobre la serie de tiempo de escala de grises (verde) y Mg/Ca (rojo, el eje “y” está invertido), que se vieron y analizaron al microscopio electrónico de barrido. Los índices arriba de los cuadros indican el número asignado a cada punto.

## Análisis espectral de una estalagmita bandeada como indicador paleoclimático

Tabla 6.2. Mediciones hechos por MIB sobre 15 puntos, registraron la abundancia r relativa de CaO, MgO y SiO<sub>2</sub>, comparadas con los valores filtrados de tonalidad y Mg/Ca.

Punto	Distancia (cm)	CaO (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	MgO (%)	tonalidad	Mg/Ca
1	0.1596	97.118	0.868	1.517	7.0548	0.002880
2	0.1878	97.137	0.954	1.27	3.4831	0.011820
3	0.2111	99.227	0.000	0.773	1.3337	0.006417
4	0.8552	98.129	0.645	1.225	12.4340	0.006330
5	1.3197	96.65	0.792	2.557	21.4700	0.005084
6	1.3453	96.884	0.261	1.462	11.5450	0.000574
7	3.7916	96.864	0.000	2.901	16.2100	0.001379
8	4.1578	98.087	0.000	1.453	-5.7766	0.001554
9	4.2015	98.461	0.620	0.813	-13.4930	0.008558
10	4.2643	98.809	0.037	0.595	-14.2350	0.004637
11	4.8717	97.559	0.350	1.739	9.6621	0.001434
12	5.6301	97.465	0.000	2.03	30.1000	0.000846
13	5.9987	97.442	0.000	2.558	-14.0710	0.002350
14	6.6301	98.207	0.023	1.487	3.3222	0.003298
15	7.1902	98.025	0.000	1.975	1.8315	0.004368

Por eliminación, la variable que queda como posible responsable, es la materia orgánica. Si bien esta técnica, por el nivel de pulido, no permite verla directamente, sí sería capaz de detectarla por la forma del espectro, ya que su presencia se vería en forma de ruido. Hecho no registrado en ninguno de los puntos estudiados (Figura 6.30).

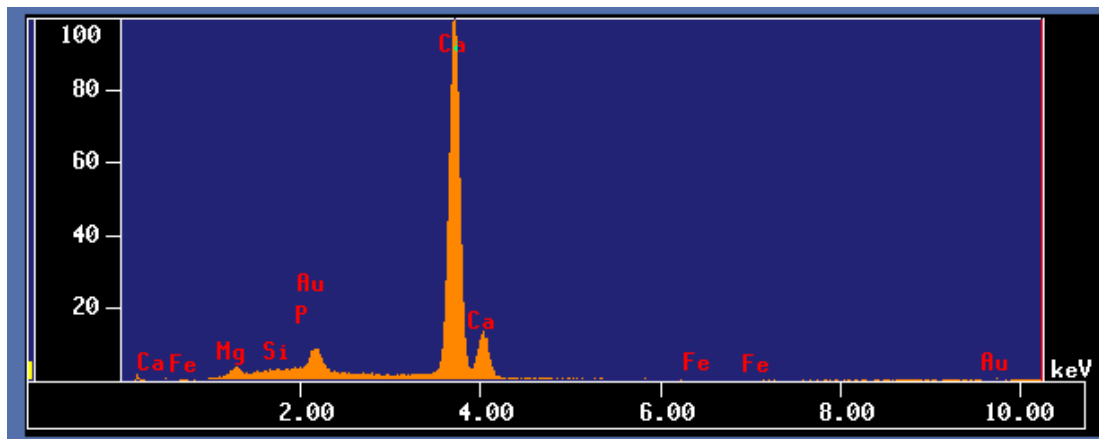


Figura 6.30. Señales de los elementos presentes en un punto particular. Nótese la inexistencia de una panza de ruido, indicadora de materia orgánica.

## Estudio de los factores que establecen la tonalidad en la escala de grises

De esta manera, es necesario replantear lo que pensábamos acerca de las variables que causaban los diferentes tonos en la estalagmita. Recapitulando, sabemos por inferencia al no encontrar presencia significativa de sílice que no hay arcillas. También pensamos con base a la ausencia de ruido significativo en el análisis por MIB, que tampoco hay materia orgánica en gran cantidad.

Ante este panorama tomamos un pedazo sobrante en el proceso de cortado de JR1a e hicimos una lámina delgada con el fin de observar su textura en el microscopio petrográfico. La lámina muestra que la textura de JR1a es simple, al ser clasificada en el nivel dos, en el orden de los multi-agregados y en particular de los cuerpos minerales tufáceos (ver capítulo 2, pag.20), lo que indica un crecimiento masivo rápido. Tomando en cuenta que este pedazo era parte de un tramo que estaba entre los primeros 10 cm cercanos a la base, coincide con lo aportado por la tasa de crecimiento, que indica una tasa alta para estos tramos.

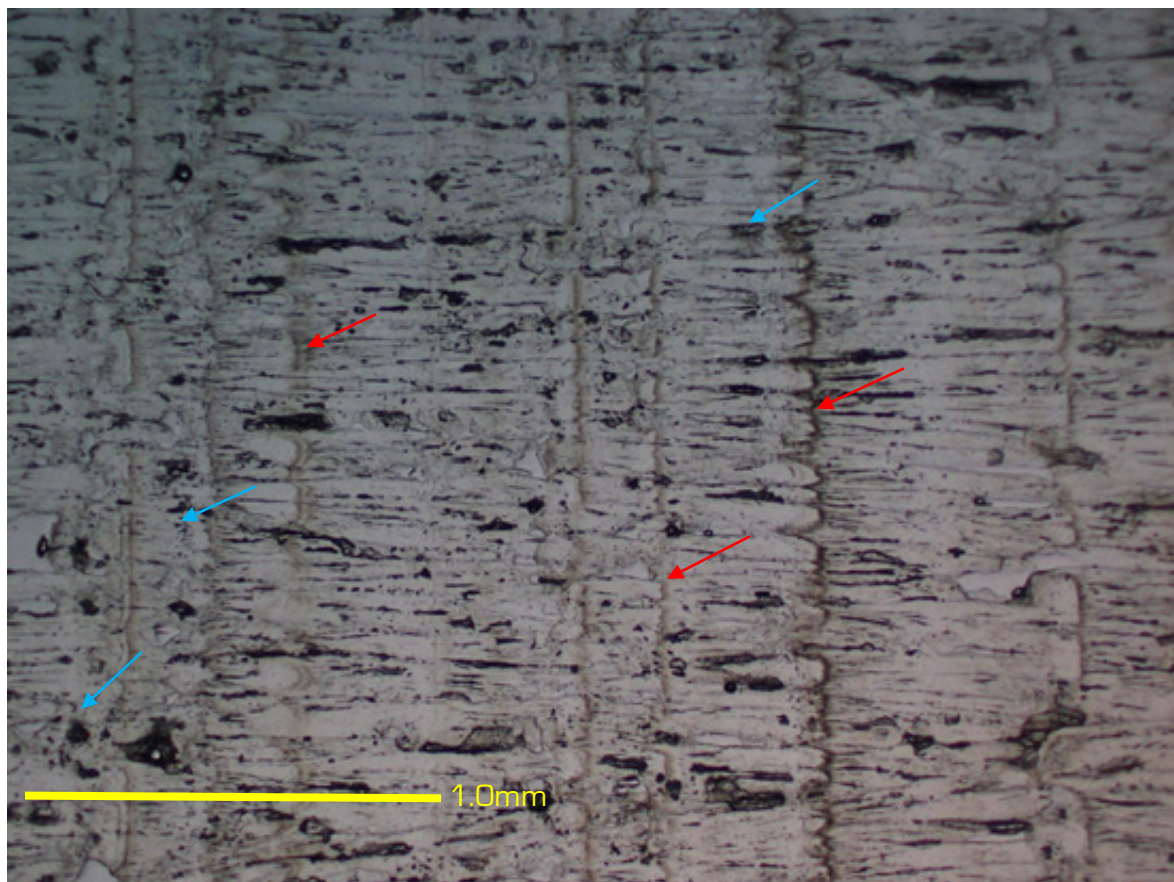


Figura 6.31. Fotomicrografía de la lámina delgada de un pedazo de JR1a donde se ve claramente el bandeo. Las flechas rojas indican el bandeo producido por un material pardo, mientras que las flechas azules indican un bandeo producido por porosidades alineadas que serían ortogonales al



## Análisis espectral de una estalagmita bandeada como indicador paleoclimático

En primera instancia pudimos ver claramente el bandeo (Figura 6.31), el cual estaba dado por líneas paralelas pardas. Al mismo tiempo observamos una gran cantidad de porosidades alineadas que son también paralelas a estas líneas pardas y que al verse más oscuras en la escala de grises, serían también responsables del bandeo.

Es probable que la existencia de estos poros sea causado por inclusiones fluidas como se ha descrito en otros trabajos (Boch y Spötl, 2008), mientras que las líneas pardas estarían dadas por materia orgánica (Baker *et al.*, 1999; McGarry y Baker, 2000; Perrette *et al.*, 2005).

De manera que se seleccionaron tres zonas, observadas al microscopio petrográfico, donde existía presencia de estas líneas pardas para su análisis en el Microscopio electrónico de barrido, los cuales se marcaron con tinta (figuras 6.32 a, 6.33 a y 6.35 a)

Tabla 6. 3. Mediciones he chos por Microscopia electrónica de barrido sobre puntos en la lámina delgada que mostraban presencia de líneas pardas paralelas, los cuales registraron la abundancia relativa de CaO, MgO y SiO<sub>2</sub>.

Zona	Punto	CaO (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	MgO (%)	FeO (%)
1	derecha	97.267	0.000	0.733	0.000
1	izquierda	98.921	0.000	0.738	0.341
2	-	98.61	0.501	0.856	0.033
3	derecha	99.152	0.000	0.848	0.000
3	izquierda	97.939	0.000	1.575	0.000

Las figuras 6.32 b, 6.32 c, 6.33 b y 6.35 b muestran las imágenes obtenidas por el microscopio electrónico de barrido, donde se aprecia de nuevo una textura uniforme, que indica también una composición química uniforme. Se analizaron algunos puntos en estas zonas, (Tabla 6.3), cuyos resultados muestran que no había presencia de sílice (por lo tanto arcillas), ni óxidos de hierro. De manera que estos definitivamente no son los responsables de las líneas pardas. De nuevo, el espectro no mostró el ruido originado por presencia de materia orgánica (Figura 6.36).

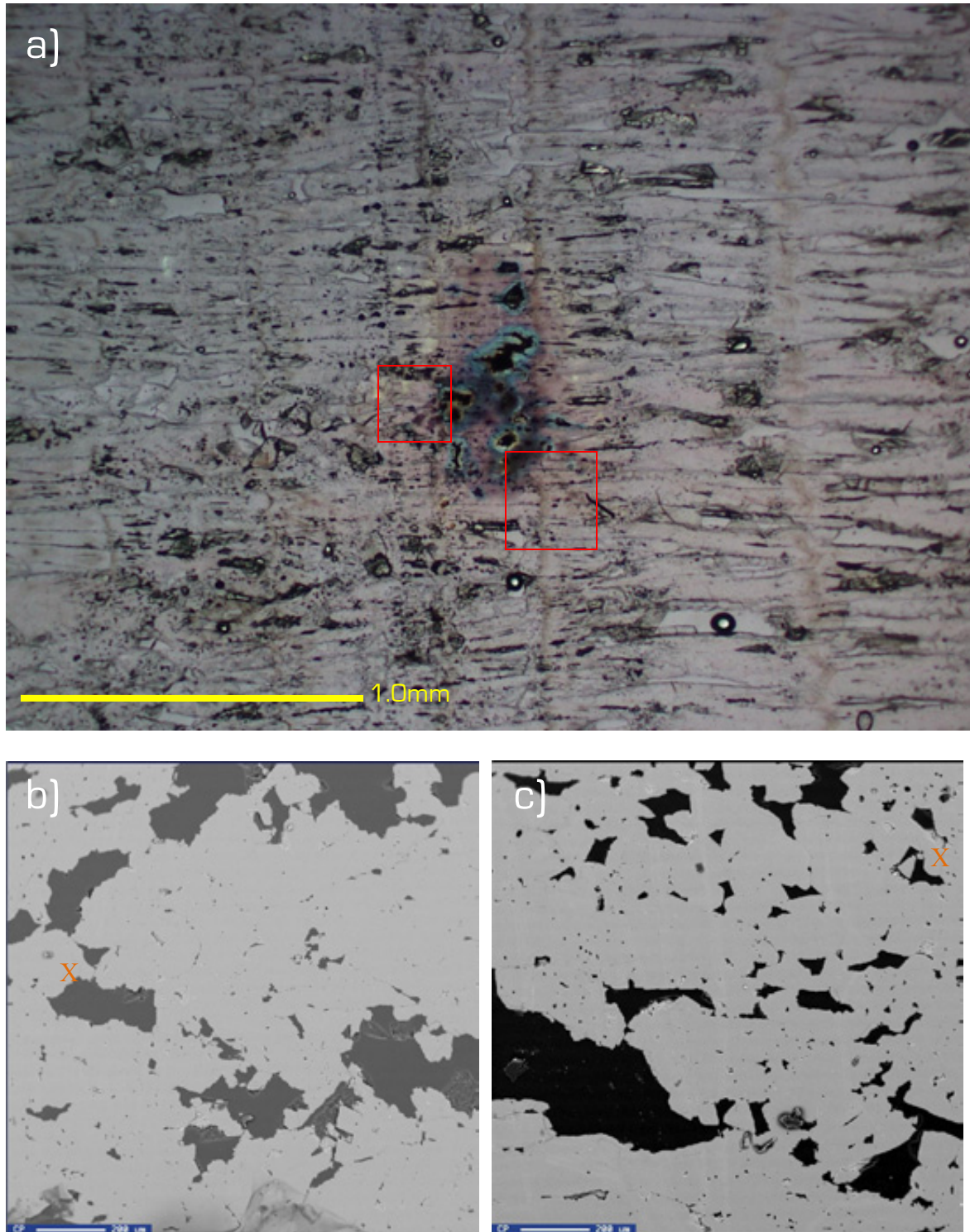


Figura 6. 32. Zona 1 de la lámina delgada. a) Fotomicrografía vista con el microscopio petrográfico. Los cuadros rojos indican las zonas vistas al MIB. b) Imagen al microscopio electrónico de barrido, señalada en el cuadro rojo de la derecha en a). c) Imagen al microscopio electrónico de barrido señalada en el cuadro rojo de la izquierda en a). Las imágenes del MIB indican una composición química uniforme. La X indica el punto donde se realizó el análisis de elementos por MIB.



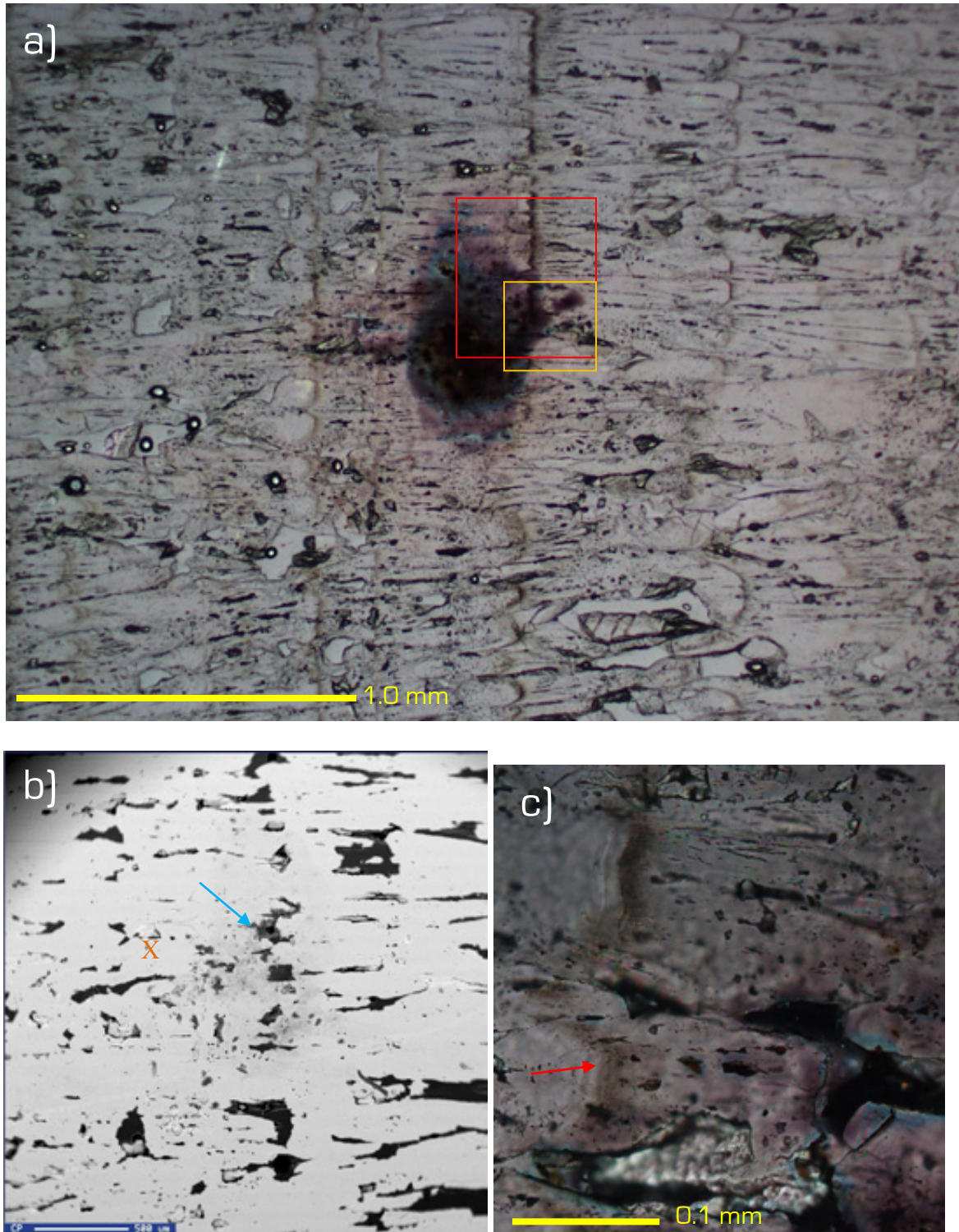


Figura 6. 33. Zona 2 de la lámina delgada. a) Fotomicrografía vista con el microscopio petrográfico. El cuadro rojo indica la zona vista al MIB. b) Imagen al microscopio electrónico de barrido, señalada en el cuadro rojo en a). La composición química es uniforme, sin embargo se observa el alineamiento de las porosidades (flecha azul). c) Imagen al microscopio petrográfico señalada en el cuadro amarillo en a) observada en campo oscuro. La línea parda (flecha roja) no es una frontera de grano, ni presenta estructura mineral, por lo que presumiblemente es materia orgánica. La X indica el punto donde se realizó el análisis de elementos por MIB.



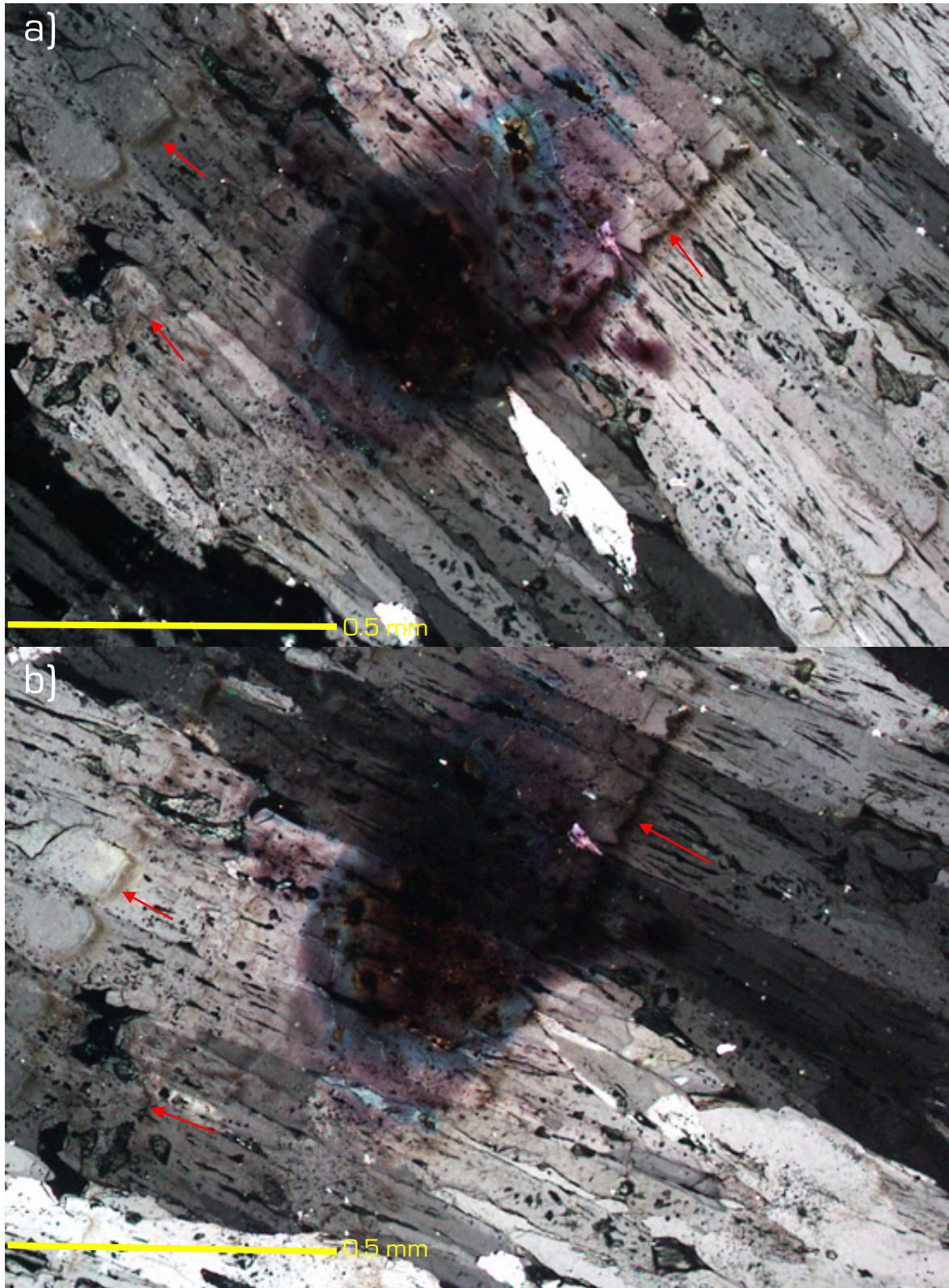


Figura 6.34. Zona 2. a) Fotomicrografía en campo oscuro donde se ve que el bandeo producido por líneas pardas (señaladas en rojo) no presenta extinción, por lo que se descarta la posibilidad de que fueran hiato, micrita o esparita. b) Fotomicrografía tomada en campo oscuro, en otro sentido donde se observa el mismo comportamiento.



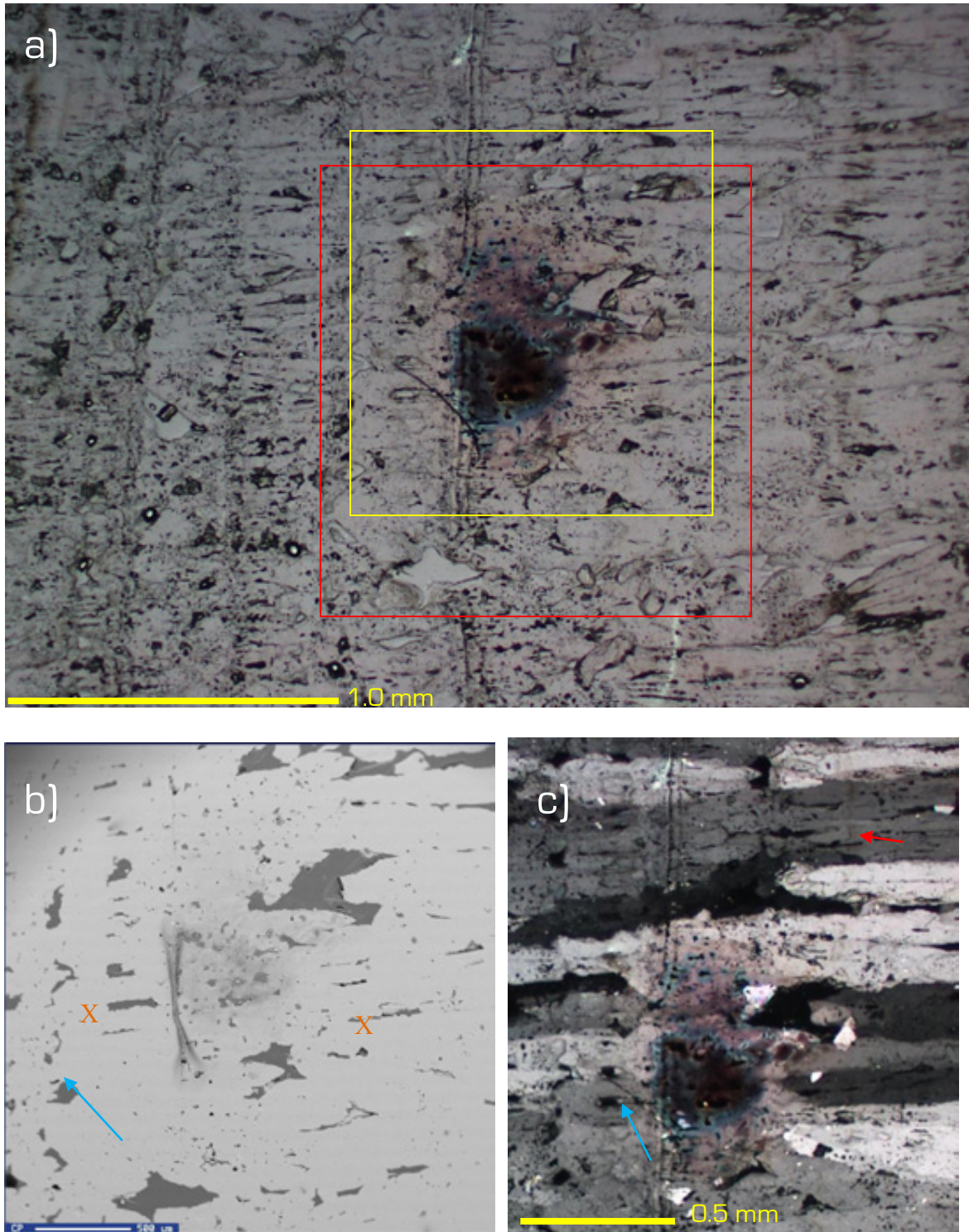


Figura 6. 35. Zona 3 de la lámina delgada. a) Fotomicrografía vista con el microscopio petrográfico. El cuadro rojo indica la zona vista al MIB. b) Imagen al microscopio electrónico de barrido, señalada en el cuadro rojo en a). La composición química es uniforme, se observa el alineamiento de las porosidades (flecha azul). c) Imagen al microscopio petrográfico señalada en el cuadro amarillo en a) observada en campo oscuro. Una línea parda tenue (flecha roja) no presenta extinción, indicando que no se trata de micrita. Se observa también el alineamiento de las porosidades (flecha azul). La X indica el punto donde se realizó el análisis de elementos por MIB.

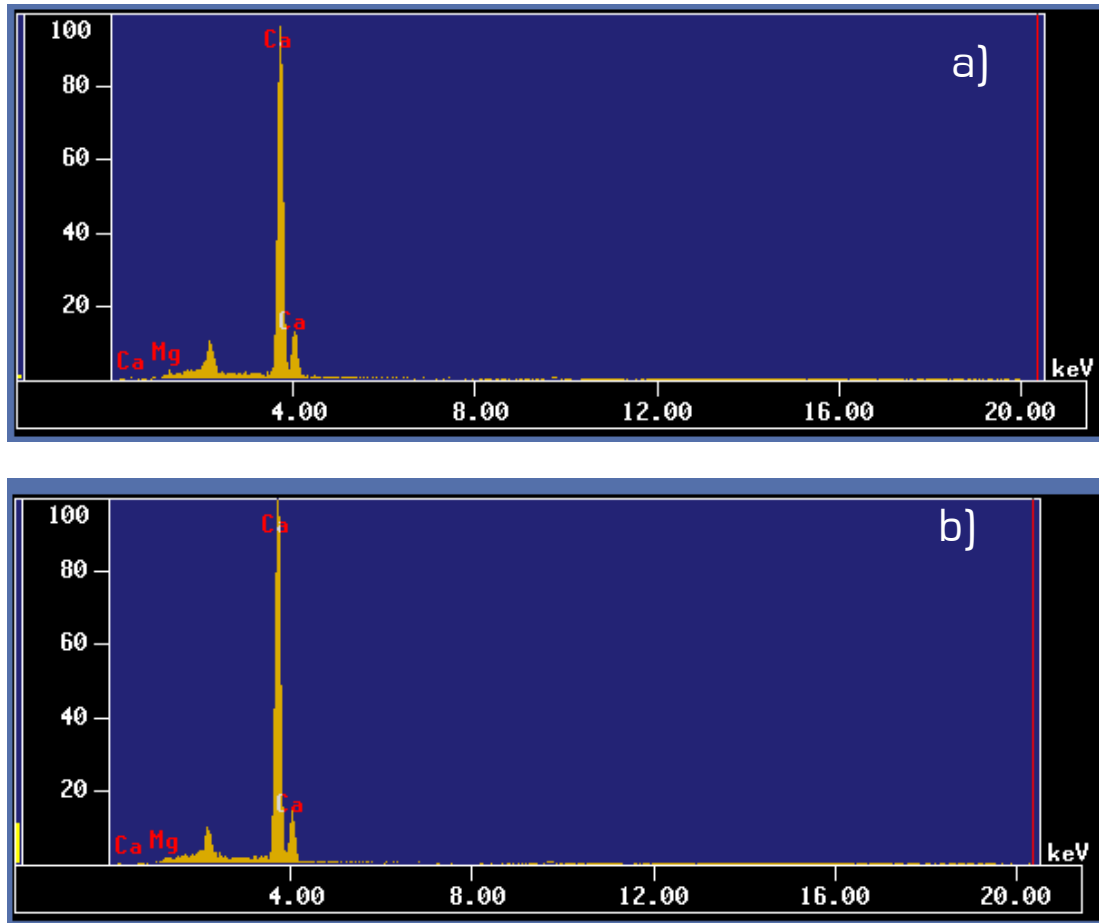


Figura 6.36. Espectro de los elementos presentes en los puntos analizados en la zona tres de la lámina delgada. a) El punto de la derecha. b) El punto de la izquierda. Nótese de nuevo la inexistencia de una panza de ruido, indicadora de materia orgánica.

Esto sugiere que el material pardo debía tener la misma composición química que el resto de la estalagmita, como lo sería si fuera micrita o microesparita. Por lo que se observaron estas líneas en campo claro y oscuro al microscopio petrográfico.

La figura 6.33 c, 6.34 b y 6.35 c muestran las líneas pardas en campo oscuro. Ninguna extinción es observada, por lo que la presencia de microesparita queda descartada. Tampoco se observan puntos iridiscentes al girar la platina, lo que es indicativo de que no se trata de micrita. De igual manera estas figuras aunadas a la 6.33 a en campo claro no muestran una estructura parecida a la micrita o la microesparita, las cuales por otro lado serían a su vez señal de hiato.

De hecho, la línea parda tendría el aspecto de materia orgánica humificada (figura 6.33 c), pues tampoco se ve como materia orgánica normal, la cual es opaca, Nótese como en la figura 6.33c no aparece en una frontera de grano.

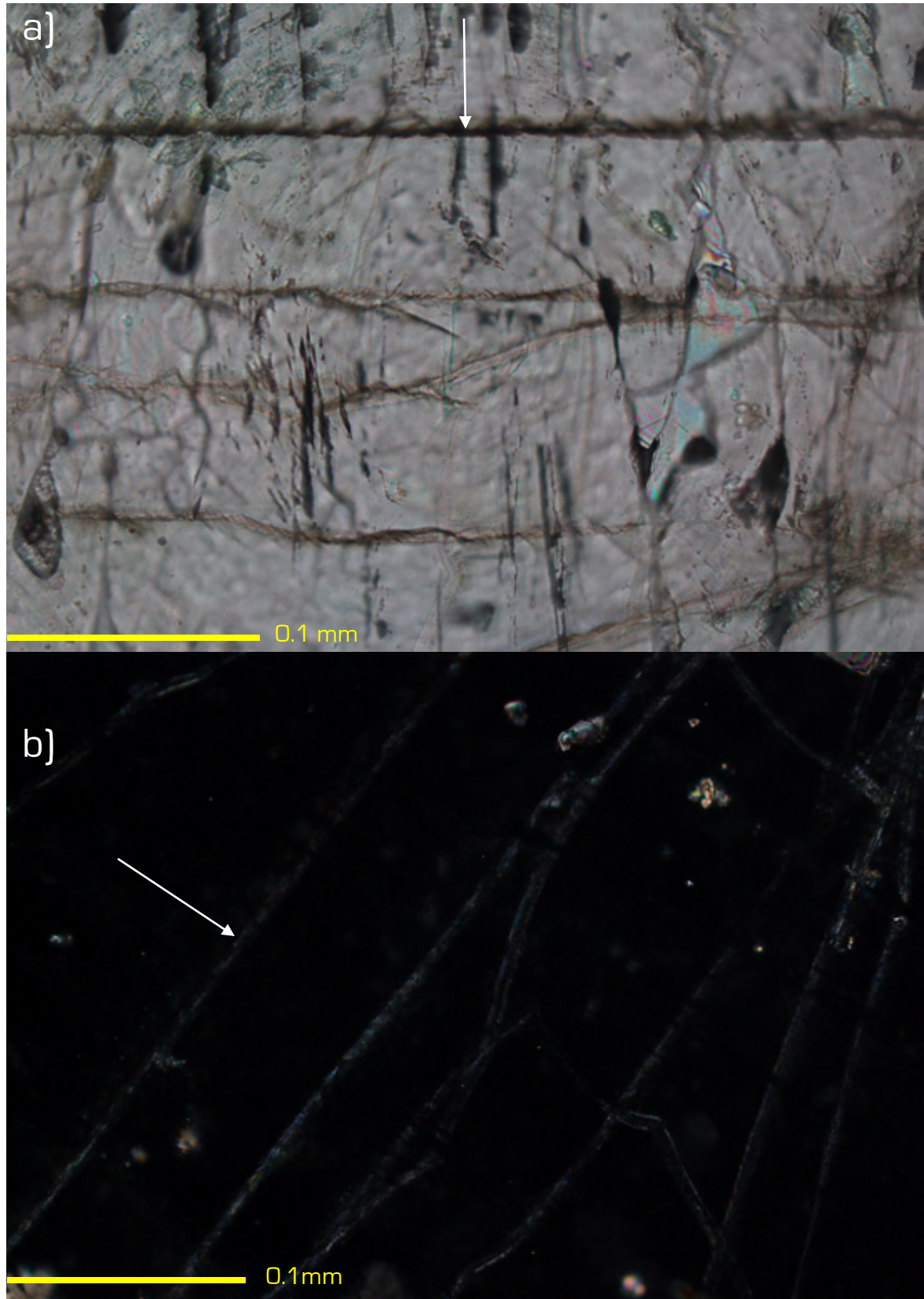


Figura 6. 37. Zona en la lámina del gada donde se observa la presencia de óxidos. A veces, formando una banda inmersa en un monocristal (flecha blanca). a) En campo claro. b) En campo oscuro.



A pesar de lo anterior, la misma lámina delgada muestra pocas zonas donde el bandeado si estaría dado por oxidos<sup>2</sup> (Figura 6.37), las cuales estarían inmersas en el cristal, De manera que, resumiendo, queda descartado que las zonas de tonalidad oscura, (el bandeado), sean causadas por un mayor número de fronteras de grano, lo que implicaría cristales más pequeños y de orientaciones más variadas. La naturaleza del bandeado es pues conferida principalmente por materia orgánica humificada y porosidades.

### 6.4 Implicaciones climáticas de la tasa de crecimiento y las tendencias

En el capítulo 4, punto 4.5 vimos la tasa de crecimiento de JR1a, en primera instancia es claro que una mayor tasa de crecimiento implica una mayor cantidad de agua que disocia y transporta calcita al interior de la cueva. Por lo que se puede suponer una mayor humedad para la cueva de Los Riscos conforme uno se remonta al pasado. Ahora bien la tasa de crecimiento es función de la cantidad de agua que gotea, sin embargo ésta última no necesariamente es función de las condiciones climáticas. Nadie que trabaja con estalagmitas utiliza la tasa de crecimiento como un indicador climático, pues hay muchos otros factores hidrogeológicos afectando la cantidad de goteo y, por ende, la tasa de crecimiento de la estalagmita. Es precisamente a lo que uno se refiere con la "plomera" de la cueva, que tanto fluye el agua en el epikarst es una función de que tan accesibles están las fracturas de la roca al paso del agua, y eso es una función de la actividad de los suelos, configuración del drenaje, tectonismo, clima, intemperismo, etc. Por lo tanto, la posibilidad de que un cambio en la configuración de la "plomera" de la cueva fuera el responsable de la disminución en la tasa de crecimiento es concebible.

El hecho de que Jalpan se encuentra en una margen pasiva, aunado a que desconocemos eventos geológicos recientes en las inmediaciones de esta zona, nos hacen pensar que un cambio en la tectónica local es poco probable. De manera que el cambio en la tasa de crecimiento se debe a los otros factores. Sobre esto se puede inferir al comparar la tasa de crecimiento con los datos de tendencia de Mg/Ca, que la disminución en la tasa de crecimiento se debe no solo a un cambio en la configuración del drenaje y la actividad de los suelos, sino también a que la región localmente se volvió más seca.

Ahora bien, los valores reportados para una estalagmita de alta latitudes, oscilan cerca de los 20  $\mu\text{m}/\text{año}$  (Fairchild *et al.*, 2006), lo cual contrasta con la tasa de crecimiento de JR1a, sobre todo para los primeros dos siglos donde la tasa de crecimiento era de 524.79  $\mu\text{m}/\text{año}$ .

---

<sup>2</sup> [www.gly.uga.edu/speleoatlas/SAindex1.html](http://www.gly.uga.edu/speleoatlas/SAindex1.html).

Esta diferencia se explica debido a que esta estalagmita se ubica en una zona tropical de baja latitud, donde el clima es per se más húmedo. Así, se han citado estalagmitas de regiones húmedas o subhúmedas con tasas de crecimiento comparables, como lo son; la tasa de la cueva del Chilibrillo, en el este de Panamá, con 422  $\mu\text{m}/\text{año}$ ; (Lachniet *et al.*, 2004) la tasa de la cueva de Coyoxochico, con 740  $\mu\text{m}/\text{año}$  (Hernández-Mendiola, 2008) ó la de la gruta de Las Karmidas con  $\sim 360 \mu\text{m}/\text{año}$  (Aliaga Campuzano, 2009) ambas en el norte de Puebla, México.

Ahora bien, como señalemos al principio de este capítulo, la tendencia de Mg/Ca indica en general un cambio a condiciones de menor humedad a lo largo de los últimos seis milenios para la zona donde está ubicada la cueva (figura 6.1). Contrariamente la tendencia de la escala de grises indica a lo largo del Holoceno superior un aumento en la humedad (figura 5.10, capítulo V). De lo discutido a lo largo de este capítulo, podemos inferir que la escala de grises no solo está establecida por la humedad, sino (además de los diversos parámetros instrumentales para obtener la información guardada) por variables como la cantidad de materia orgánica disponible y las condiciones para crear porosidades, pues son estos factores los que confieren el tono y bandeado. Así no es del todo sorprendente que la tendencia de la escala de grises indique un cambio a mayor humedad, pues esta es el resultado de una menor cantidad de materia orgánica co-depositada con la calcita. Cantidad que disminuye al haber menor área donde depositarse, pues la tasa de crecimiento tiende a descender a lo a lo largo del Holoceno superior. Esto confirma que la tendencia como indicado paleoclimático debe tomarse con cuidado, pues puede estar en función de la tasa de crecimiento, a su vez esto también indica la conveniencia de la eliminación de la tendencia para comparar las señales.