

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**Procesado de imágenes 2D LIBS para
la detección de líneas de
crecimiento en conchas de lapas
(LIBS 2D image processing for the
detection of growth lines in limpet
shells)**

Para acceder al Título de

***Graduado en
Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación***

Autor: Ramón Díaz Noval

Julio – 2024

GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

CALIFICACIÓN DEL TRABAJO FIN DE GRADO

Realizado por: Ramón Díaz Noval

Director del TFG: Jesús Mirapeix Serrano

Título: “Procesado de imágenes 2D LIBS para la detección de líneas de crecimiento en conchas de lapas”

Title: “LIBS 2D image processing for the detection of growth lines in limpet shells”

Presentado a examen el día: 24 de Julio de 2024

para acceder al Título de

GRADUADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

Composición del Tribunal:

Presidente (Apellidos, Nombre): Mañana Canteli, Mario

Secretario (Apellidos, Nombre): Martínez Fernández, María del Carmen

Vocal (Apellidos, Nombre): Domingo Gracia, Marta

Este Tribunal ha resuelto otorgar la calificación de:

Fdo: El Presidente

Fdo: El Secretario

Fdo: El Vocal

Fdo: El Director del TFG

(sólo si es distinto del Secretario)

Vº Bº del Subdirector

Trabajo Fin de Grado Nº

(a asignar por Secretaría)

AGRADECIMIENTOS

Guardo este espacio de manera personal para los siguientes agradecimientos:

Agradecer a mi familia, pareja y amigos por apoyarme a lo largo de todo el proceso, confiar siempre en mí y mis capacidades y ayudarme a ser una mejor persona. La consecución fue más sencilla gracias a todos ellos.

Agradecer a mis profesores del grado, por hacer despertar en mí el interés hacia las Telecomunicaciones. Agradecer especialmente a mi tutor, Jesús Mirapeix, por ayudarme en la realización de este documento.

Agradecer a todos mis compañeros de promoción por el tiempo compartido a lo largo de estos años y todos los aprendizajes y buenos momentos que compartimos.

ABSTRACT

The aim of this Final Degree Project is to develop an image processing application to help determine the capture season of shells using 2D maps obtained through the LIBS (*Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*) technique.

The processed images show the Mg/Ca concentration on the shell surface, which grows by depositing calcium and magnesium throughout the limpet's life. This process forms isochronous growth lines with a constant Mg/Ca ratio.

Matlab is employed as the primary development tool due to its ease of use for data analysis and processing.

The automatic detection of these lines is useful for subsequent data processing and estimating the capture season of limpets. This method provides a refined visualization of high concentration growth lines, which could be crucial in geological studies or materials science involving elemental distribution analysis.

RESUMEN

El objetivo del Trabajo de Fin de Grado consiste en el desarrollo de una aplicación de procesamiento de imagen que puede ayudar a determinar la estación de captura de las conchas utilizando mapas 2D obtenidos mediante la técnica LIBS (*Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*).

Las imágenes procesadas muestran la concentración de Mg/Ca en la superficie de la concha, la cual crece depositando calcio y magnesio a lo largo de la vida de la lapa. Este proceso forma líneas de crecimiento isócronas con un *ratio* Mg/Ca constante.

Matlab se emplea como herramienta principal de desarrollo gracias a la facilidad que ofrece para el análisis y procesamiento de datos.

La detección automática de estas líneas es útil para el posterior procesamiento de datos y la estimación de la estación de captura de las lapas. Este método proporciona una visualización refinada de las líneas de crecimiento de alta concentración, lo cual podría ser fundamental en estudios geológicos o de ciencia de materiales que involucren el análisis de la distribución elemental.

ÍNDICE

1.	Introducción	11
1.1	Contexto	11
1.2	Objetivos	11
2.	Espectroscopía de plasma inducido por láser (LIBS)	12
2.1	Evolución histórica de la espectroscopía.....	12
2.2	Técnicas espectroscópicas.....	14
2.3	Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS)	15
2.4	Aplicaciones de LIBS	16
3.	Desarrollo.....	21
3.1	Problemática y justificación del documento	21
3.2	Introducción al desarrollo.....	24
3.3	Objetivo del desarrollo.....	26
3.4	Inicio del desarrollo	26
3.5	Pasos a seguir	29
3.6	Desarrollo de la aplicación	29
3.6.1	Función principal	30
3.6.2	Función <i>enter</i>	31
3.6.3	Función <i>draw_trajectory</i>	32
3.6.4	Función <i>adjusted_trajectory</i>	36
4.	Resultados	39
4.1	Espécimen LAN178	39
4.2	Espécimen LAN109	40
4.3	Espécimen LAN184	40
4.4	Espécimen LAN235	41
4.5	Espécimen LAN256	42
5.	Conclusión y líneas futuras	43
5.1	Conclusión	43
5.2	Líneas futuras	44
6.	Código Matlab	45
7.	Bibliografía	48

Lista de figuras

Figura 1. Experimento del prisma de Isaac Newton [5].	12
Figura 2. Espectro solar con líneas de Fraunhofer [7].	13
Figura 3. Comparación espectroscopía de absorción y emisión del hidrógeno [10].	15
Figura 4. Esquema de equipos para usar técnica LIBS [12].	16
Figura 5. Aro metálico y espectros LIBS a 2 y 50 pulsos [22].	17
Figura 6. a) Espectro LIBS de tejido de cáncer cervical. b) Valores normalizados de Ca y Na en tejido normal y tejido de cáncer cervical. c) Valores normalizados de Mg y K en tejido normal y tejido de cáncer cervical [23].	18
Figura 7. Espectroscopía LIBS de diferentes minerales hidratados [24].	19
Figura 8. a) Concha especie <i>Patella depressa</i> . b) Depósito de calcita para análisis con LIBS [25].	20
Figura 9. Depósito de calcita de concha real.	20
Figura 10. Resultados estudio técnica isotópica [28].	22
Figura 11. Espectros de emisión en dos rangos espectrales para el cálculo del ratio Mg/Ca y Sr/Ca. [29].	23
Figura 12. Secuencia de los ratios Mg/Ca y Sr/Ca [29].	24
Figura 13. Mapa 2D de concentración Mg/Ca.	25
Figura 14. a) Segmentación de color para mapa 2D. b) Ajuste mediante intensidades de color. c) Ajuste mediante vértices.	27
Figura 15. Imagen binaria del mapa 2D tras realizar segmentación.	27
Figura 16. a) Imagen binaria mapa 2D analizada por mayor área. b) Conjunto de datos analizados con el mayor área.	28
Figura 17. Mapa 2D con líneas de crecimiento y trayectoria del usuario.	29
Figura 18. Funciones aplicación final.	30
Figura 19. Función principal.	31
Figura 20. Función enter.	32
Figura 21. Línea de crecimiento en un punto máximo por medio de ruta del usuario.	32
Figura 22. Línea de mayor crecimiento de todo el mapa 2D.	33
Figura 23. Segunda línea de mayor crecimiento del mapa 2D.	33
Figura 24. Función para pintar una sola línea de crecimiento.	34
Figura 25. Función para múltiples líneas de crecimiento.	35
Figura 26. Dos mejores líneas de crecimiento sin ajuste.	35

Figura 27. Línea de crecimiento tras un ajuste restrictivo.	36
Figura 28. Llamada a la función de ajuste y promedio ventana de comandos.	36
Figura 29. Ajuste de trayectoria buscando píxeles vecinos de mayor concentración.	37
Figura 30. Función de ajuste de líneas de crecimiento completa.....	38
Figura 31. Líneas de crecimiento sin sobresalir del mapa 2D.	38
Figura 32. Mapa 2D LAN178.....	39
Figura 33. Líneas de crecimiento LAN178.....	39
Figura 34. Mapa 2D LAN109.....	40
Figura 35. Líneas de crecimiento LAN109.....	40
Figura 36. Mapa 2D LAN184.....	41
Figura 37. Línea de crecimiento LAN184.	41
Figura 38. Mapa 2D LAN235.....	41
Figura 39. Línea de crecimiento LAN235.	42
Figura 40. Mapa 2D LAN256.....	42
Figura 41. Líneas de crecimiento LAN256.....	42

1. Introducción

1.1 Contexto

Los historiadores y arqueólogos se han centrado en estudiar los yacimientos y el arte rupestre para investigar el Paleolítico Medio-Superior (300.000-10.000 a.C.). Para el estudio de esta época, han descubierto que las conchas de las lapas son de gran ayuda, por lo que han decidido recolectarlas y analizarlas.

A partir del estudio de estos moluscos podemos determinar diferentes comportamientos de nuestros antepasados, técnicas de supervivencia, zonas habitadas, etc.

Uno de los comportamientos que es llevado a análisis es la estación de captura de la concha de la lapa, ya que tras diferentes estudios químicos se observó que la relación entre diferentes isótopos y elementos que forman parte de la composición atómica y elemental de las conchas de estos moluscos ($^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$, Mg/Ca y Sr/Ca) pueden ser útiles como indicadores paleoclimáticos [1] para, así, obtener información y estimar la temperatura del agua del mar a lo largo de la vida y en el momento de la captura del molusco. Tras este estudio es posible estimar la estación del año en la que se recogieron los moluscos y obtener información acerca de la disponibilidad de los recursos alimenticios o los patrones de asentamiento y/o desplazamiento de estos grupos prehistóricos.

1.2 Objetivos

Para obtener las relaciones Mg/Ca se pueden utilizar diferentes técnicas. En el caso de este documento en particular, se utilizará como forma de análisis la espectroscopía de ruptura inducida por láser, LIBS (*Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*).

El objetivo es obtener mediante estas muestras, mapeadas en 2D, una aplicación de procesamiento de imagen que permita determinar la estación de captura de las lapas.

Para ello, las imágenes a procesar muestran la concentración Mg/Ca de la concha sobre la superficie analizada. A lo largo del periodo de vida de la lapa, esta va haciendo crecer su concha mediante el depósito de calcio y otros elementos minoritarios, como el magnesio. Este proceso da lugar a la formación de líneas de crecimiento isócronas que teóricamente deben presentar el mismo *ratio* Mg/Ca a lo largo de las mismas. La detección automática de estas líneas puede ser de gran utilidad en el procesamiento posterior de los datos dirigido a poder estimar la estación de captura de las lapas o incluso su edad. Para el desarrollo de este trabajo se utilizarán diferentes aplicaciones/funcionalidades que aporta Matlab.

2. Espectroscopía de plasma inducido por láser (LIBS)

2.1 Evolución histórica de la espectroscopía

Para poder realizar una evolución histórica en primer lugar es conveniente definir qué es la espectroscopia. Según la Real Academia de la lengua española se define la espectroscopia como la rama de la física que estudia los espectros [2]. Para tener una definición más detallada se define, según este mismo medio, el espectro como distribución de la intensidad de una radiación en función de una magnitud característica, como la longitud de onda la energía o la temperatura [3]. Aclarar que en la comunidad científica de habla castellana es más común el uso de espectroscopía para referirse a esta rama física. Como este documento recoge un estudio científico se referirá a esta ciencia como espectroscopía.

Al realizar una evolución histórica se declara como punto de origen a las observaciones del espectro visible de Sir Isaac Newton (1666-1672) con el experimento, conocido mundialmente, del prisma, que consistía en que la luz solar, que nos parece blanca, pasaba por un pequeño orificio y luego a través del prisma, donde se observaba como se descomponía en diferentes colores (debido al fenómeno de la dispersión de la luz), definido por Newton como espectro. [4]

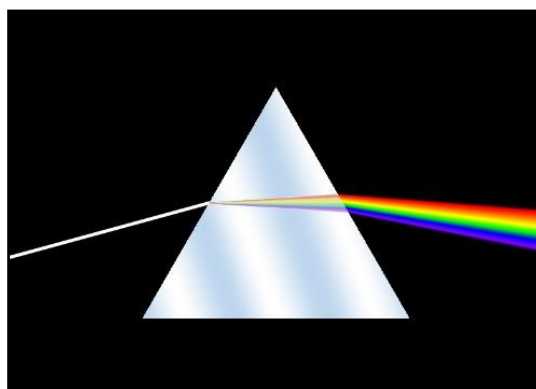


Figura 1. Experimento del prisma de Isaac Newton [5].

A inicios del siglo XIX William Hyde Wollaston construyó un espectrómetro, basándose en el prisma de Isaac Newton. Este consistía en una lente que enfocaba el espectro del sol sobre una pantalla, donde descubrió que los colores no se distribuían de forma uniforme si no que aparecían como una especie de parches de bandas oscuras.

Wollaston creía que eran límites naturales entre los colores hasta que el bávaro Joseph von Fraunhofer reemplazó el prisma por una rejilla de refracción como instrumento de dispersión de las longitudes de onda consiguiendo estudiar el efecto de la difracción a través de una única ranura rectangular, aumentando estas ranuras hasta desarrollar un diafragma perforado con miles de ranuras equidistantes pero muy espaciadas. De esta forma se mejoraba mucho la resolución frente al prisma y permitía poder medir las diferentes longitudes de onda de la luz. La escala de longitudes de onda abrió el camino a la comparación de otros espectros, independientemente de la fuente o el instrumento. Estas líneas oscuras hoy en día son conocidas como líneas de Fraunhofer. [6]

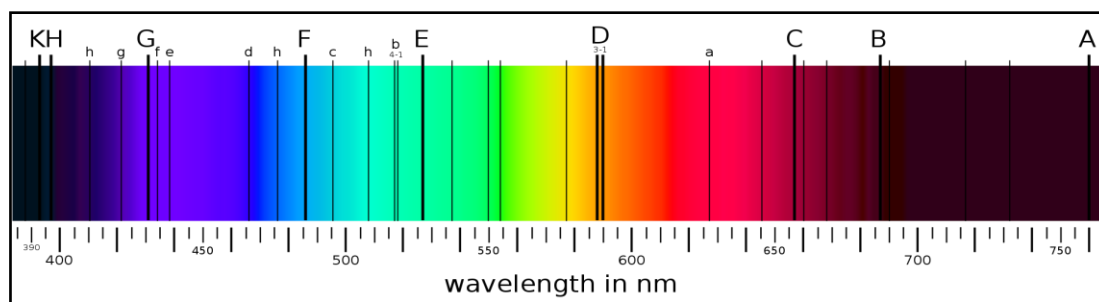


Figura 2. Espectro solar con líneas de Fraunhofer [7].

En la década de 1860 el físico Gustav Kirchhoff y el químico Robert Bunsen desarrollaron un protocolo experimental riguroso para poder estudiar en detalle los espectros de los compuestos químicos confirmando el vínculo único entre los elementos químicos y su espectro característico. Durante el proceso fundamentaron la técnica de espectroscopía analítica. Tras las investigaciones realizadas sobre los espectros de ocho elementos reconocieron la presencia de estos en diferentes productos químicos, demostrando de esta forma que la espectroscopía podría usarse para detectar elementos químicos conocidos y descubrir aquellos que se desconocían.

Tras una investigación fundamental sobre la naturaleza de los espectros de absorción y de emisión, Kirchhoff enuncia la ley de Kirchhoff de la radiación térmica [8]. Con la aplicación de esta ley a la espectroscopía quedan reflejadas las tres leyes de la espectroscopía:

- Un objeto caliente, a expensas del estado de la materia, incandescente produce un espectro continuo.
- Un gas produce un espectro de líneas de diferentes longitudes de onda, no continuas, dependiendo del nivel de energía de los átomos del gas.
- Un objeto caliente rodeado de un gas frío o bien un gas frío solo produce un espectro casi continuo, y presenta lagunas puntuales en ciertas longitudes de onda bien separadas, brechas que corresponden a los niveles de energía de los átomos que componen el gas. [9]

Con las numerosas investigaciones y descubrimientos de la espectroscopía comienzan a surgir dentro de esta diferentes ramas como la espectroscopía de rayos X , la espectroscopía infrarroja y Raman o la espectroscopía láser. También contribuyó en el desarrollo de otras disciplinas como la mecánica cuántica, con la que se consiguió comprender una explicación marco teórica de las investigaciones realizadas en el campo de la espectroscopía tras saberse que la energía de un fotón está relacionada con su frecuencia. Definiéndose así la relación como $E = h \cdot \nu$ donde h es la constante de Plank.

2.2 Técnicas espectroscópicas

La espectroscopía se clasifica fundamentalmente en dos grupos:

- Espectroscopía de absorción: método que mide la cantidad de radiación absorbida por una muestra en función de la frecuencia o longitud de onda debido a su interacción con la muestra. La muestra absorbe energía de la radiación incidente, y la intensidad de la absorción varía en función de la frecuencia creando el espectro de absorción. La espectroscopía de absorción se emplea como una herramienta de química analítica para determinar la presencia de una sustancia particular en una muestra y, en muchos casos, para cuantificar la cantidad de la sustancia presente. La espectroscopía infrarroja y ultravioleta-visible es particularmente común en aplicaciones analíticas. La espectroscopía de absorción también se emplea en estudios de física molecular y atómica, espectroscopía astronómica y teledetección. [31]
- Espectroscopía de emisión: método de análisis químico que mide la radiación emitida por muestras después de ser excitadas por una fuente de energía externa, como un láser o una fuente de luz. Cuando la muestra se expone a la fuente de energía las moléculas pasan a niveles de energía más altos y para poder volver al estado energético original emite radiación electromagnética, la cual se caracteriza por tener una longitud de onda específica para cada elemento atómico o compuesto molecular. Algunos tipos son la espectroscopía de emisión atómica, la espectroscopía de emisión molecular, la fluorescencia o la fosforescencia. [30]

Para el estudio de ambos métodos es necesario el uso de un instrumento esencial, el espectrómetro, que mide la radiación electromagnética emitida, absorbida o dispersada por una muestra. En el caso del espectrómetro de absorción se medirá la cantidad de radiación absorbida en diferentes longitudes de onda, punto logrado tras la comparación de la radiación incidente y la transmitida. En el caso del espectrómetro de emisión se registra la emisión radiada por la muestra tras una excitación de una fuente externa, descomponiendo la emisión y analizando la distribución energética en función de la longitud de onda.

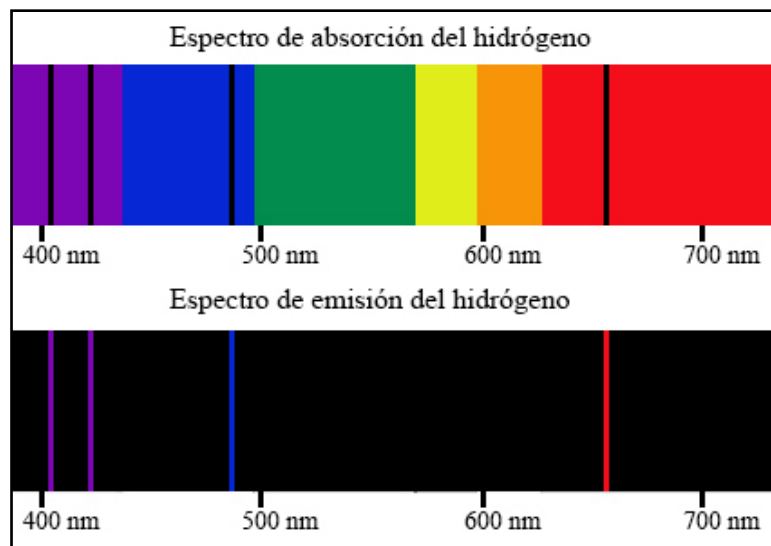


Figura 3. Comparación espectroscopía de absorción y emisión del hidrógeno [10].

2.3 Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS)

La espectroscopía de ruptura inducida por láser (LIBS) es una técnica de espectroscopía de emisión atómica que utiliza láseres de alta energía. El procedimiento comienza enfocando el láser en una pequeña muestra, lo que provoca su ablación, es decir, la eliminación de una diminuta cantidad de material, en el rango de nanogramos y picogramos. Este proceso genera temperaturas extremadamente altas, entre 10,000 - 20,000 K. A estas temperaturas, el material ablacionado se disocia y forma un plasma compuesto por iones y átomos excitados. Llegados a este punto, y con la ayuda de un espectrómetro, se puede apreciar la señal característica formada por las líneas de emisión atómica correspondientes a los elementos presentes, ya que el plasma emite una radiación electromagnética continua (nótese que se requiere un breve periodo de enfriamiento del orden de 10 microsegundos) [11]. Esta técnica es muy utilizada en una gran variedad de ámbitos, gracias a que es muy versátil, ya que puede ser utilizada en cualquier tipo de estado, incluso en coloides como aerosoles, geles, etc. Además, la ablación realizada a la hora de practicar LIBS, en cuanto a daño material se refiere, es mínima, y se consigue de forma rápida.

Para poder poner en práctica esta técnica es necesario un láser pulsado compuesto por la fuente láser, generalmente un láser Nd:YAG (*neodymium-doped yttrium aluminium garnet*) típicamente a la longitud de onda de 1064 nm, y un controlador de forma que sea posible controlar la energía del pulso, la duración y la frecuencia. También es necesario un sistema de focalización del láser, formado por lentes y espejos para poder enfocar el haz del láser en la muestra. Una vez se ha generado el plasma es necesario recoger la luz emitida y dirigirla hacia el espectrómetro, donde, para ello, se suele utilizar lentes de colección o fibra óptica. Como se acaba de nombrar, en el espectrómetro la luz emitida se dispersará en sus componentes espectrales donde será captada con un detector, comúnmente un CCD o ICCD, el espectro de luz. Finalmente, son procesados y analizados los datos espectrales con algún software de análisis.

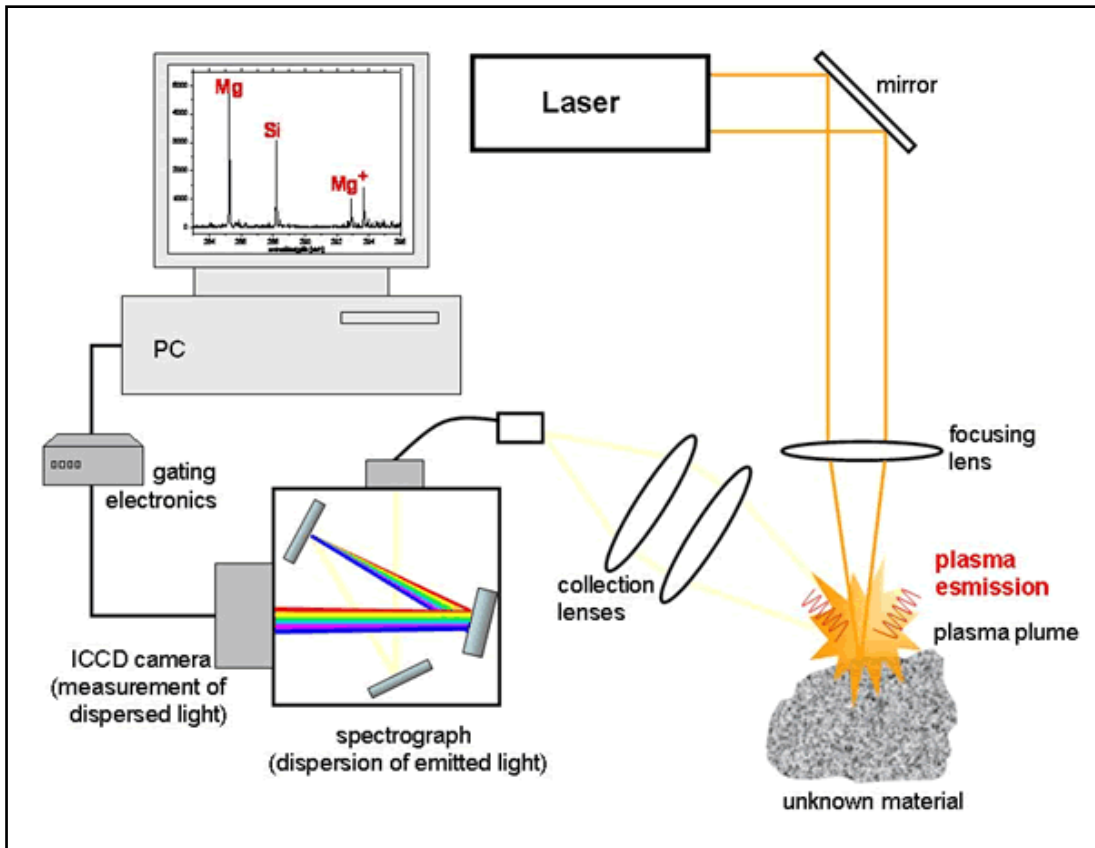


Figura 4. Esquema de equipos para usar técnica LIBS [12].

2.4 Aplicaciones de LIBS

Aquellos campos de la investigación en los que se requiere un análisis no destructivo, como puede ser la arqueología o el análisis de obras de arte, por citar dos ejemplos, el LIBS resulta como una de las técnicas de análisis más apropiadas. Una de las primeras aplicaciones en el ámbito de la arqueología trata la identificación de pigmentos en manuscritos de los siglos XII y XIV a.C. que permitió la datación y caracterización sistemática de manuscritos, destacando como gran ventaja la no destructividad del ensayo [13, 14]. En este mismo campo de investigación se realizan análisis a cerámicas, joyas o artefactos metálicos de excavaciones arqueológicas en Grecia, obteniendo resultados de la composición elemental, o la identificación de cerámicas romanas del siglo I d.C. Otra de las aplicaciones del LIBS en arqueología es la posibilidad de identificar la tinta y caracterizar escritos artísticos [13, 15, 16, 17].

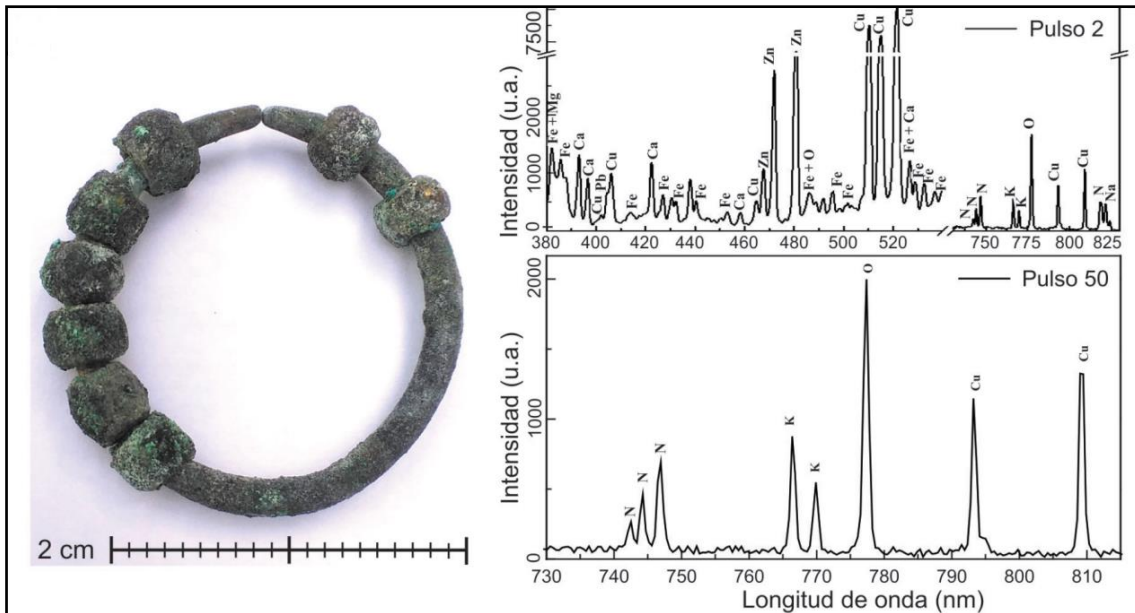


Figura 5. Aro metálico y espectros LIBS a 2 y 50 pulsos [22].

Otro campo importante de aplicación es el medio ambiente. En el reciclaje de plásticos comerciales, es crucial identificar rápidamente los diferentes tipos de plásticos durante el proceso de tratamiento. Además, esta técnica es adecuada para el análisis de suelos en estudios medioambientales, permitiendo incluso el diseño de equipos portátiles que posibiliten análisis en tiempo real e *in-situ*. [13, 18]

Esta técnica se adentra también en el campo de las ciencias de la salud. Ha sido, por ejemplo, fundamental a la hora de realizar estudios para el análisis de productos farmacéuticos líquidos que contenían cloruro sódico [13, 19], el cual requiere un análisis preciso de la concentración y su pureza para garantizar la seguridad y eficacia del medicamento. La técnica permite incluso identificar diferentes microorganismos, como discriminar entre diferentes bacilos esporulados, [13, 20] bacterias que tienen la capacidad de formar esporas, los cuales generan algunas enfermedades como es el caso del ántrax, el tétanos, infecciones intestinales o intoxicaciones alimentarias. Las posibilidades del LIBS llegan incluso a la posibilidad de permitir un diagnóstico clínico. Algunos de estos ejemplos son la identificación de caries dental y la identificación de piedras de riñón. Por otro lado, la técnica LIBS puede ser utilizada en el estudio inicial para distinguir entre células tumorales malignas o benignas provenientes de secciones histológicas.

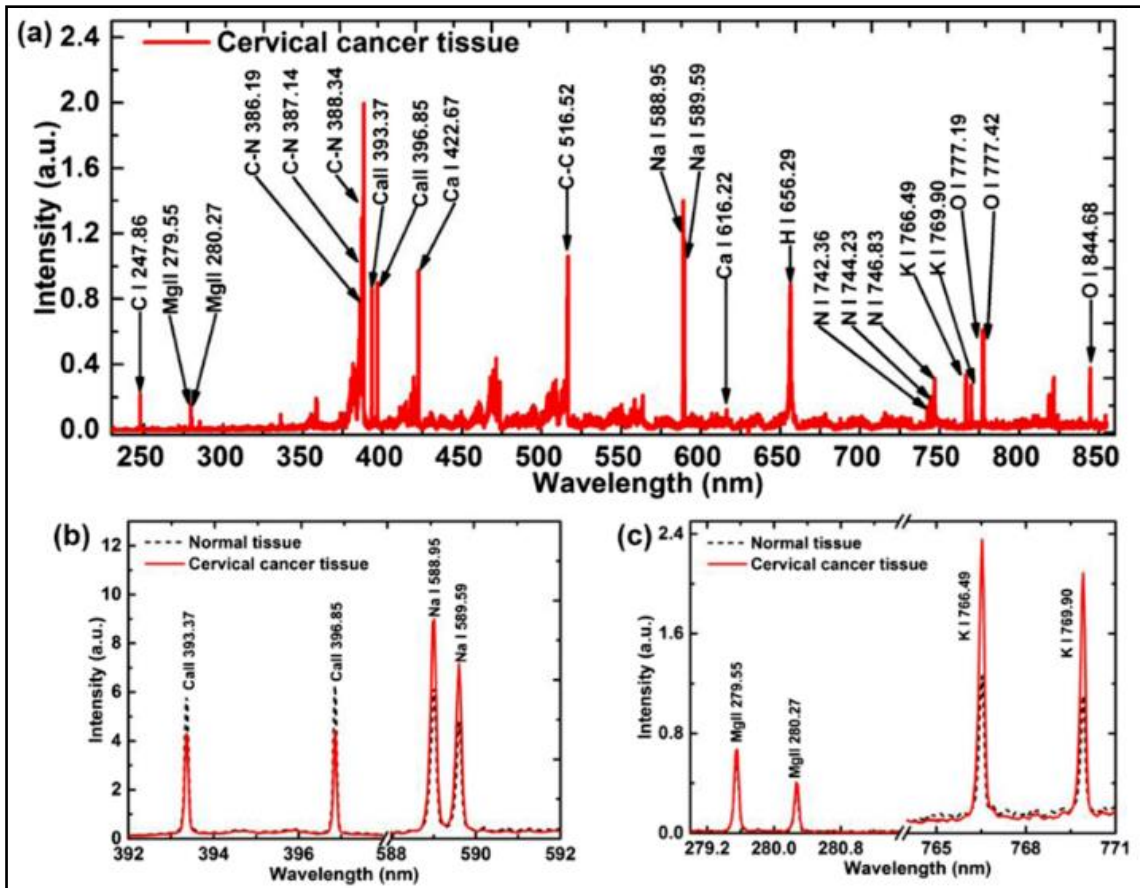


Figura 6. a) Espectro LIBS de tejido de cáncer cervical. b) Valores normalizados de Ca y Na en tejido normal y tejido de cáncer cervical. c) Valores normalizados de Mg y K en tejido normal y tejido de cáncer cervical [23].

La geología es una de las ciencias que mayor provecho puede obtener de la técnica por sus ventajas de mínimo tratamiento de la muestra, análisis directo, obtención de los resultados de forma instantánea. Pero, si hay una aplicación donde el LIBS se muestra como una de las técnicas más robustas, posiblemente la mejor, es en exploraciones espaciales. Desde que a finales del siglo pasado se retomara con fuerza las misiones espaciales con el objetivo de tomar tierra en asteroides, cometas, la Luna y Marte, se necesitan nuevas técnicas analíticas que permitiesen realizar de forma significativa una mayor cantidad de determinaciones analíticas por tiempo de vida de la misión, y aumentar las posibilidades analíticas. Y es aquí donde LIBS permite alcanzar ambas necesidades en el análisis elemental de muestras geológicas. Además, las condiciones atmosféricas y de temperatura elevada de los planetas como Marte o Venus se revelan como idóneas para el análisis mediante LIBS [13, 21].

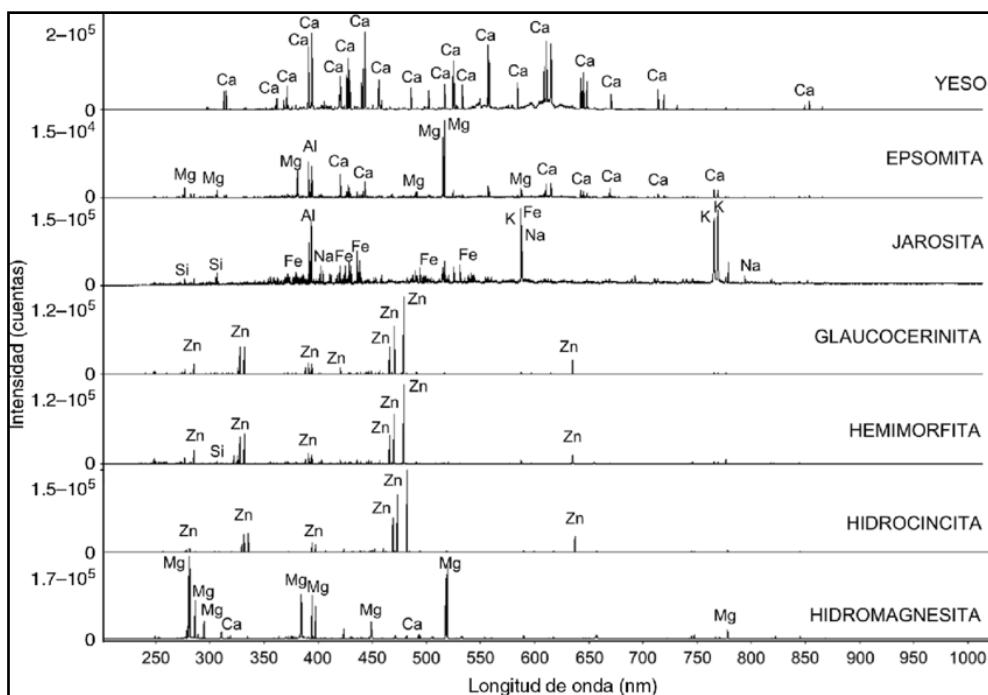


Figura 7. Espectroscopía LIBS de diferentes minerales hidratados [24].

En este documento se aplica la técnica LIBS en el estudio de la paleoclimatología, donde se estudia el clima de la Tierra a lo largo de su historia. Esto incluye cualquier fenómeno que determine el clima como la energía de radiación solar, situación astronómica del planeta, relieve, distribución continental y oceánica o la composición atmosférica. Para llevar a cabo este estudio se analizan registros fósiles, acumulaciones de sedimentos en lechos marinos, burbujas de aire capturadas en glaciares o marcas de crecimiento de árboles y plantas. Gracias a todos estos estudios se ha podido elaborar una historia climática reciente precisa, aunque no tan precisa prehistórica por la falta de datos. En este caso, el documento se centrará en los restos fósiles, más concretamente en las conchas de las lapas del cantábrico. Estos moluscos pueden ser útiles como indicadores paleoclimáticos para, así, obtener información y estimar la temperatura del agua del mar en el momento de la captura del molusco. De esta forma se podrá estimar la estación del año en la que se recogieron los moluscos. En este caso LIBS es de gran utilidad gracias a que es una técnica poco destructiva.

Un ejemplo es de la *figura 8*, donde se observa la concha de una lapa. En la parte izquierda o *zona-a* se muestra la concha desde una vista lateral, observando su forma, y la vista superior, donde mediante unas líneas de puntos se analizan las diferentes zonas de la concha, siendo la parte derecha analizada en la *zona-b* de la *figura 8*. En la *zona-b*, se muestra en primera instancia la sección transversal, después de que la concha haya sido sometida al proceso de corte, donde se remarca el depósito de calcita, lugar donde serán analizadas las líneas de crecimiento y que es mostrada de forma aumentada en el final de la figura. En esta zona, se observa mediante una línea de puntos rojos la zona de medición, desde el borde hasta el ápice, y a lo largo de esta línea sus diferentes líneas de crecimiento. Para conseguir estudiar las líneas de crecimiento el proceso de corte debe ser llevado de forma precisa, habitualmente es usada una sierra de diamante ya que con ella es posible realizar cortes limpios, evitando daños en la estructura interna. Una vez cortada, se

encapsula en resina, siendo esta transparente y dura una vez curada, para luego ser pulida, ya que es necesario que esta zona sea lisa y plana para el estudio mediante LIBS. Si analizamos la *figura 9* se observa una concha real de una lapa, en concreto el espécimen LAN178 del Grupo de Ingeniería Fotónica de la Universidad de Cantabria, donde encontramos los puntos desarrollados en la *figura 8-b* y todo el proceso para conseguir poder analizarla como son el de corte, encapsulado en resina, pulimento y análisis mediante LIBS. Destacar que la línea de medición a lo largo del depósito de calcita, línea de color blanco, es la zona ablacionada mediante LIBS, y los puntos azules indican el contorno de la zona de calcita.

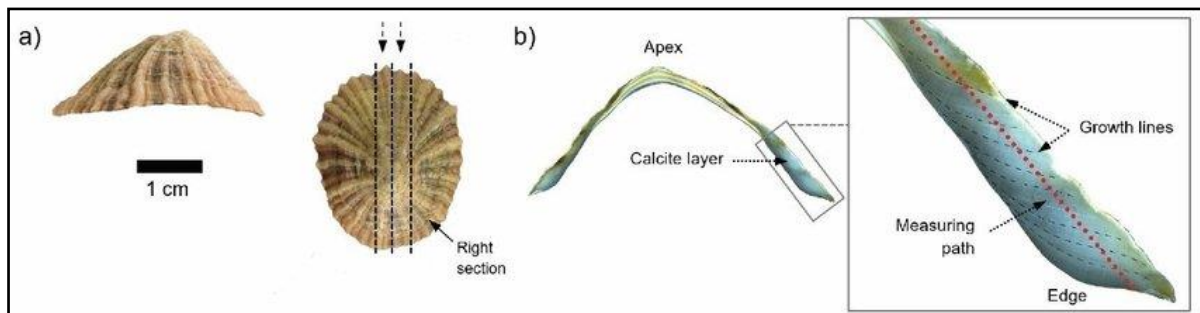


Figura 8. a) Concha especie Patella depressa. b) Depósito de calcita para análisis con LIBS [25].

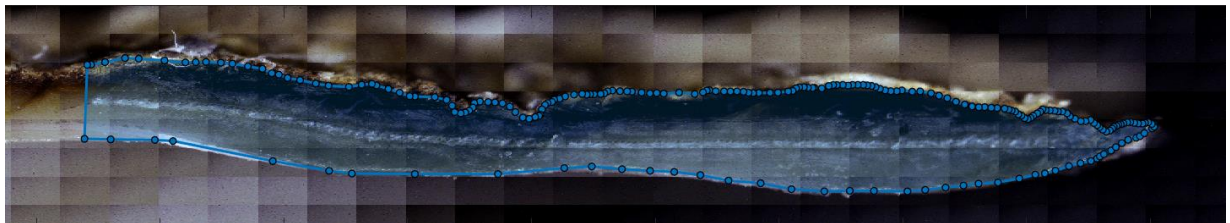


Figura 9. Depósito de calcita de concha real.

3. Desarrollo

3.1 Problemática y justificación del documento

Determinar la estación de captura es crucial para entender ciertos comportamientos en la ecología marina o incluso para otros ámbitos, como la conservación y gestión pesquera. Este documento se centra en el estudio paleoclimático en la que gracias a determinar la estación de captura de moluscos se pueden conocer condiciones climáticas pasadas, como la temperatura del mar o la salinidad, ya que registran cierta información en sus conchas, de esta forma podemos contrastar o validar modelos climáticos. También nace la posibilidad de conocer ciertos comportamientos de los antepasados, ya que al conocer la estación de captura es posible conocer en qué épocas o bajo que circunstancias, en una etapa en concreto, recogían este tipo de moluscos, lapas en el caso de este documento.

Algunos autores han intentado establecer una relación entre el análisis de las lapas y la temperatura del mar en el momento histórico en que vivían estos moluscos. Una de las relaciones a tener en cuenta se puede analizar principalmente a través de estudios isotópicos. Una técnica comúnmente utilizada en la paleoclimatología para determinar temperaturas pasadas del mar es el análisis de los isótopos de oxígeno o técnica de isótopos estables, particularmente el *ratio* de oxígeno-18 (^{18}O) a oxígeno-16 (^{16}O) en los carbonatos de las conchas de los moluscos. Este *ratio*, conocido como $\delta^{18}\text{O}$, varía con la temperatura del agua en la que el molusco creció. Cuando la temperatura del agua es más baja, el agua contiene más ^{18}O relativo al ^{16}O . Las lapas, al formar su concha, incorporan estos isótopos de oxígeno en proporciones que reflejan las condiciones ambientales. Por lo tanto, un $\delta^{18}\text{O}$ más alto en las conchas indica temperaturas del mar más frías, mientras que un $\delta^{18}\text{O}$ más bajo sugiere temperaturas más cálidas. Además de los isótopos de oxígeno, los isótopos de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) también pueden proporcionar información útil. Estos pueden reflejar cambios en la productividad marina y las fuentes de carbono, que pueden estar influenciadas por cambios en el clima y la temperatura del agua, aunque esta no es una medida directa de la temperatura del mar. Esta técnica es muy útil y precisa, aunque los análisis isotópicos suelen requerir la extracción de muestras en puntos discretos, lo que limita la resolución espacial de los datos y la extracción de material de la concha, además de ser un método costoso y laborioso, requiriendo equipamiento especializado y tiempo considerable para la preparación y análisis de muestras.

En la *figura 10* se aprecian resultados obtenidos a partir del uso de esta técnica. El estudio se basa en la recolección de valores de $\delta^{18}\text{O}$ en el borde de la concha del molusco *Phorcus lineatus* recolectados en el Campo de Hockey, en San Fernando, Cádiz. Estos fueron recogidos durante todo el año, *figura 10-a*, aunque preferentemente en la época de invierno (N=21; 42,9%) y del otoño (N=20; 40,8%), y con menos frecuencia en la época de primavera (N=6; 12,2%) y del verano (N=2; 4,1%). Con respecto a las conchas recogidas durante la primavera y el otoño el 56% de ella fueron recogidas en épocas cercanas al invierno, ya una vez terminado o cerca de empezar este. Esto es sabido ya que si el valor de $\delta^{18}\text{O}$ es mayor a 1‰ estaremos próximos a épocas más frías. En conclusión, el 73,5% de las conchas fueron recolectadas durante los meses más fríos del año (aproximadamente de noviembre a abril). En la *figura 10-b* y *10-c* se estudian dos diferentes concheros en concreto y en ella se puede observar cómo se reparten las épocas de captura, confirmándose que en épocas más frías se recolectaban más estos moluscos [28].

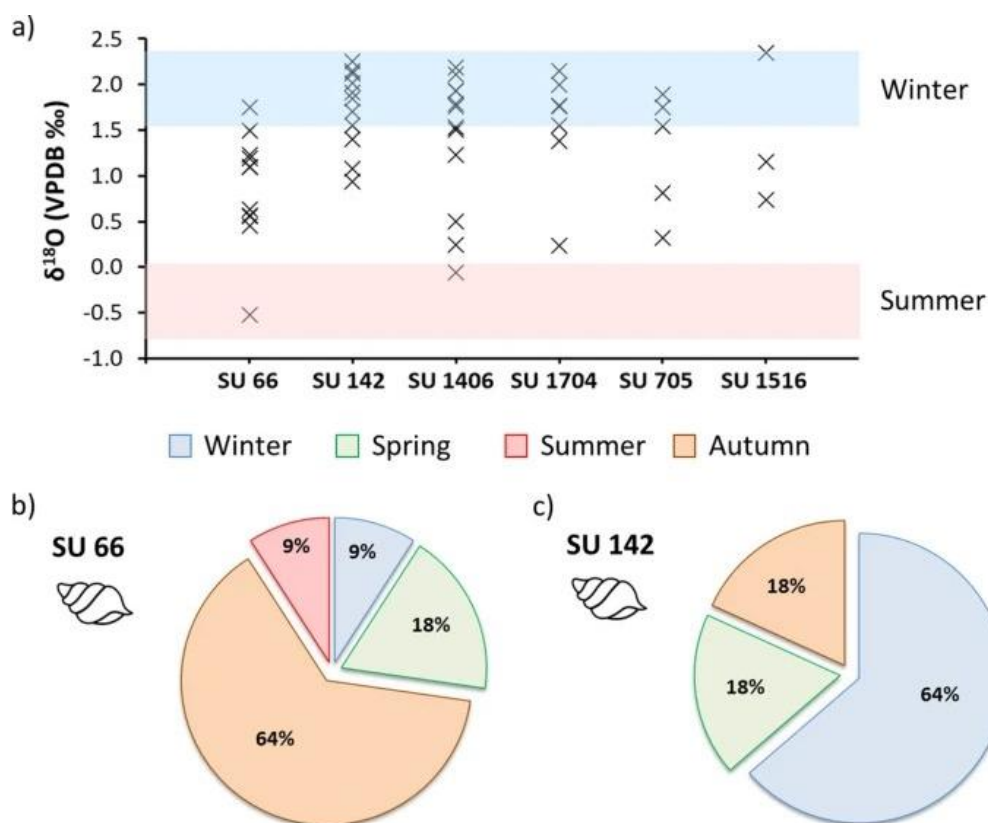


Figura 10. Resultados estudio técnica isotópica [28].

Esta técnica es un método costoso y laborioso, por lo que se siguió investigando otras composiciones químicas que pudiesen tener una relación con la estación de captura. La que se utiliza en este documento, utiliza los *ratios* Mg/Ca ya que se ha comprobado que el calcio es parcialmente sustituido por magnesio o estroncio en proporciones variables, que algunos autores han conseguido correlacionar con la salinidad o la temperatura del agua en varias especies concretas. Si bien es complicado estimar el valor absoluto de la temperatura o la salinidad a partir de estos *ratios*, sí es posible obtener la variación relativa en diferentes momentos del crecimiento del molusco, identificando así cada época del año a partir de los momentos de temperaturas máximas y mínimas correspondientes al verano y al invierno. La técnica de espectroscopía de ruptura inducida por láser (LIBS) es idónea para este caso, ya que no requiere de ningún tipo de preparación de la muestra, y realiza la medida *in-situ* sobre su superficie. Un ejemplo de resultados de esta técnica es que se muestra en las figuras 11 y 12. [29]

En la figura 11 se muestran dos espectros obtenidos en dos rangos espectrales diferentes, donde se aprecian las líneas de emisión atómica utilizadas para el cálculo de los *ratios*.

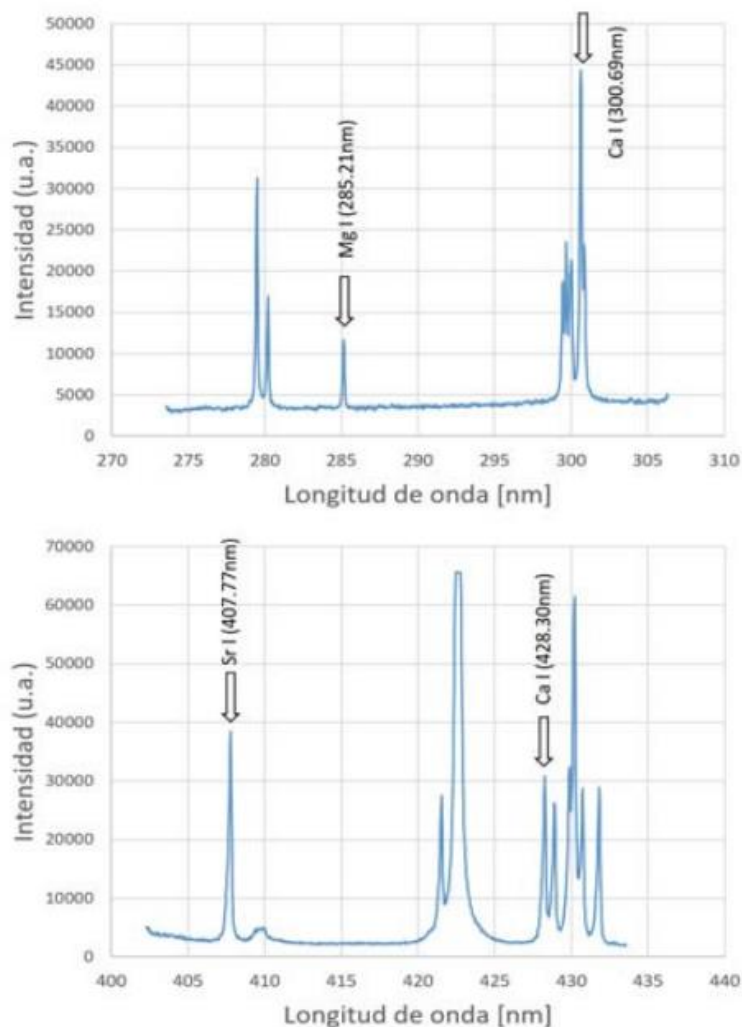


Figura 11. Espectros de emisión en dos rangos espectrales para el cálculo del ratio Mg/Ca y Sr/Ca. [29]

En la figura 12 se muestran las secuencias obtenidas a lo largo de una línea de muestreo, ambas en ejemplares de *Phorcus lineatus*. En ambas es conocido su fecha de captura, por lo que es posible valorar la capacidad de estimación de la técnica. Para el *ratio* Mg/Ca, en esta especie, la dependencia de magnesio incorporado en la concha con la temperatura del mar es inversa, ya que este espécimen fue recogido a finales de mes de diciembre, parte derecha de la primera gráfica y mayor concentración de Mg/Ca, por lo que, menor temperatura. Además, muestra un ciclo de un año aproximadamente, ya que el principio de la gráfica muestra un *ratio* perteneciente a una época más fría. En el caso del *ratio* Sr/Ca la temperatura del mar es directamente proporcional al depósito de estroncio en ese espécimen, ya que la fecha de captura de este espécimen data del 1 de octubre. Al final de la segunda gráfica se observa como el *ratio* comienza a descender, debido a que acaba de terminar el verano y las temperaturas comienzan a ser menos cálidas. [29]

Gracias al estudio de estos *ratios* se observa como la técnica LIBS es válida para poder llevar a cabo estos estudios.

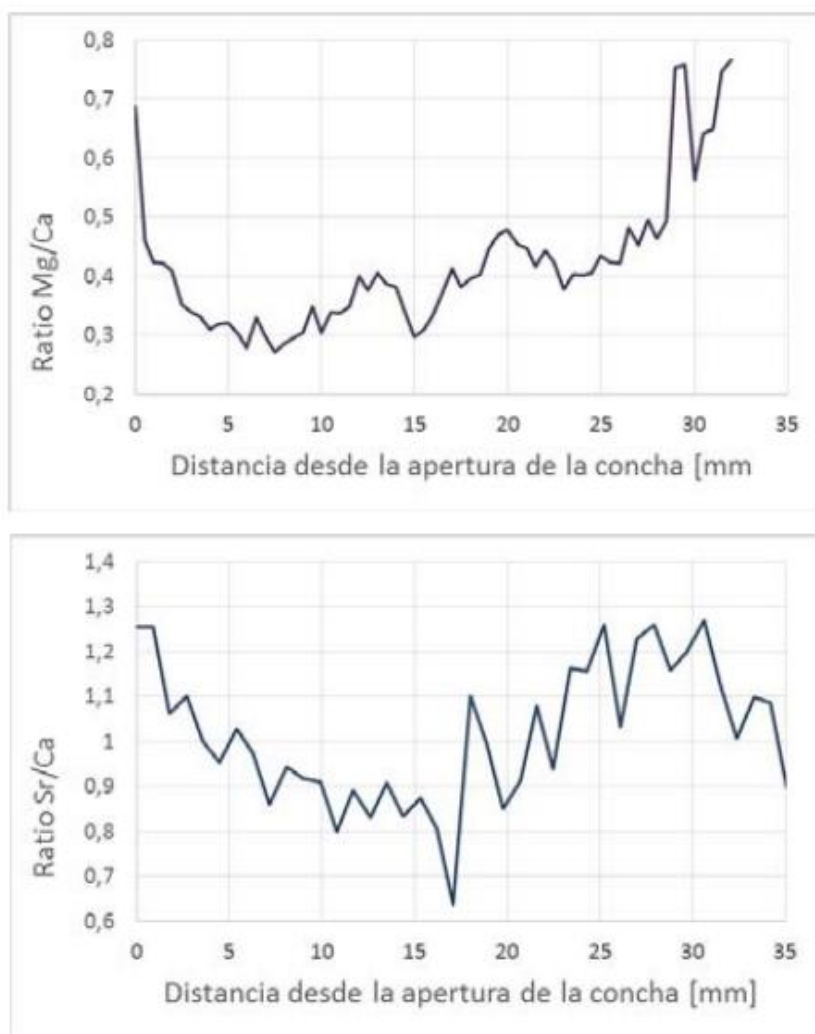


Figura 12. Secuencia de los ratios Mg/Ca y Sr/Ca [29].

3.2 Introducción al desarrollo

Tras lo comentado en el punto 2.4 las aplicaciones de LIBS son muy variadas, pero este trabajo se centrará en la paleoclimatología. Antes de comentar el desarrollo del objetivo del documento, es importante tener algunos puntos teóricos previos.

Este desarrollo se ha realizado a partir de trabajo previo realizado por el Grupo de Ingeniería Fotónica de la Universidad de Cantabria. Este trabajo previo, de forma resumida, se basa en una primera instancia en la recogida de los moluscos, los cuales son sometidos a estudio mediante el uso de LIBS en su laboratorio, lo que trae consigo los puntos explicados previamente en el apartado 2.3. Una vez se han realizado diferentes ajustes mediante el uso de programas computacionales, para tratar los datos recogidos, han desarrollado un mapa en 2D del borde de la lapa donde se observan las relaciones de Mg/Ca.

La lapa, a lo largo de su vida, va haciendo crecer su concha mediante el depósito de calcio y otros elementos minoritarios, como el magnesio. Este proceso da lugar a la formación de líneas de crecimiento isócronas que teóricamente deben presentar el mismo *ratio* Mg/Ca a

lo largo de las mismas. Esta relación, a su vez, se relaciona de forma directa con la temperatura, siendo de la siguiente forma; a mayor concentración Mg/Ca mayor temperatura del agua y a menor temperatura menor concentración Mg/Ca. Por lo que si se observa la *figura 13* a la derecha aparece una escala de colores que indica la cantidad de concentración de Mg/Ca, en mmol/mol, mediante colores. Cuanto mayor es la intensidad de color oscuro, menor es la concentración Mg/Ca, por lo contrario, a mayor intensidad de color claro, mayor concentración. Como la concentración está relacionada con la temperatura, a mayor intensidad de color claro, mayor temperatura, al igual que a mayor intensidad de color oscuro, menor temperatura. De esta forma se genera una relación con las estaciones, ya que, si la concentración tiende a altas intensidades claras, amarillo en la *figura 13*, será una etapa de temperaturas más altas, es decir, etapas del verano, al contrario, con intensidades altas de color oscuro, azul en la figura, sería una etapa de más frío, por lo tanto, de invierno o cercanas al invierno. Por lo tanto, volviendo a la *figura 13* se definen dos etapas de verano, las de color amarillo intenso, y la estación de captura, momento de recogida del molusco, es finalizando el verano o ya adentrándose en el otoño, por su proximidad con la línea de crecimiento con mayor concentración Mg/Ca.

En estos mapas como punto de partida se espera una gráfica de evolución de Mg/Ca con forma sinusoidal, para una trayectoria lineal a lo largo del mapa 2D, es decir, a lo largo de la concha, basada en las estaciones, en invierno poca concentración, hasta alcanzar un mínimo, aumentando en la primavera, hasta alcanzar un máximo en el verano y descender durante el otoño, hasta el mínimo en invierno. Por diferentes condiciones ambientales y procesos biológicos la evolución no tiene tal forma, aunque sí que se le asemeja. Como se observa en la *figura 13* la concentración va aumentando y disminuyendo, pareciéndose a una senoide, con zonas de alta concentración, disminuyendo seguido a esta zona, alcanzando un mínimo y volviendo a crecer la concentración hasta una zona de alta concentración. El análisis de estos mapas debe hacerse en función a las trayectorias de las líneas de crecimiento, ya que se puede observar cómo hay ciertos puntos/píxeles concretos con una concentración alta, pero no pertenecen a una etapa del verano, es por eso por lo que se debe analizar en función a la línea de crecimiento.

Este enfoque es de mucha utilidad a la hora de realizar estos estudios ya que podemos estudiar de una forma visual y rápida las líneas de crecimiento y determinar la estación de captura de la concha de la lapa. Cabe añadir que la escala de colores debe ser ajustada para poder tener una buena visualización de las intensidades de colores y que los valores de concentración Mg/Ca no tienen por qué asemejarse al de otros ejemplares, como, por ejemplo, los de la *figura 13*, ya que dependen de diferentes factores, como podría ser etapas de tiempo con temperaturas elevada o frías, o incluso la región donde han sido recogidas las lapas, por lo que es importante tener este aspecto en cuenta.

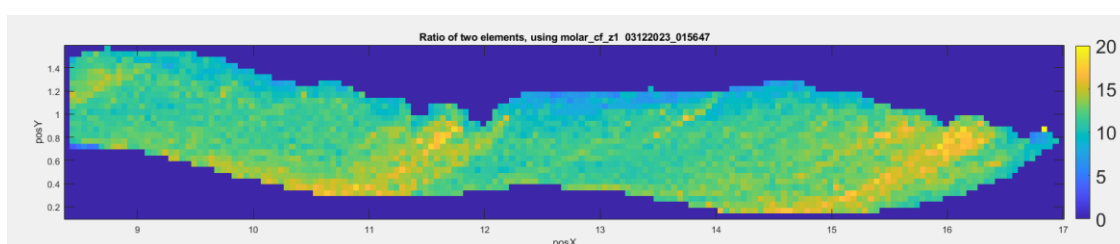


Figura 13. Mapa 2D de concentración Mg/Ca.

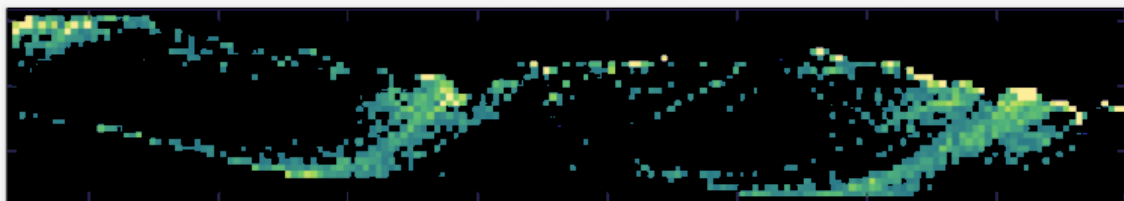
3.3 Objetivo del desarrollo

El objetivo del desarrollo es realizar una aplicación de procesamiento de imagen mediante Matlab que permita identificar las líneas de crecimiento con mayor promedio Mg/Ca de los mapas 2D de forma automática, de esta forma se podrá determinar la estación de captura del molusco y un promediado de esta concentración, siendo útil para futuros estudios ya sean paleoclimáticos, científicos o históricos entre otros. Para identificar estas líneas de crecimiento el programa de forma automática pintará sobre el mapa 2D las líneas y devolverá los valores promediados de las líneas de crecimiento.

3.4 Inicio del desarrollo

Como se ha comentado previamente, el estudio de estos moluscos es de gran utilidad para poder conocer a nuestros antepasados o el estado del planeta en el pasado. Pero estas lapas tan primitivas son escasas debido a su gran antigüedad, por esto mismo y para saber si los estudios realizados son correctos, las lapas que se han llevado a estudio en este documento mediante LIBS han sido recogidas en la actualidad, de esta forma se confirmará si la estación de captura coincidió con la misma en la que la lapa fue recogida. Estas pertenecen a la familia de *Patella vulgata*.

El desarrollo se orientó en primera instancia al desarrollo de la aplicación con el uso de librerías de Matlab, siendo la que en un principio mejor se adaptaba a la idea principal *Image Region Analyzer* [26]. Para ello, primero se convertía el mapa 2D a escala de grises mediante otra librería de Matlab llamada *Color Thresholder* [27] que permite segmentar imágenes en color con umbrales para los canales de color en función de diferentes espacios de color como se puede observar en la *figura 14-a*. Si observamos la *figura 14-b* se puede ajustar de forma manual los colores que van de 0 a 250, indicando la intensidad de ese color. Como se quiere conocer las líneas de crecimiento de mayor concentración se ajusta a colores de alta intensidad, ya que la mezcla de estos da colores más claros. En la *figura 14-c* se ajusta el color mediante el uso de vértices, ofreciendo libertad a la hora de elegir el área que queremos de colores. En este documento se utiliza el ajuste mediante intensidades de color, por su sencillez y por el ajuste instantáneo en la imagen que queremos como resultado.



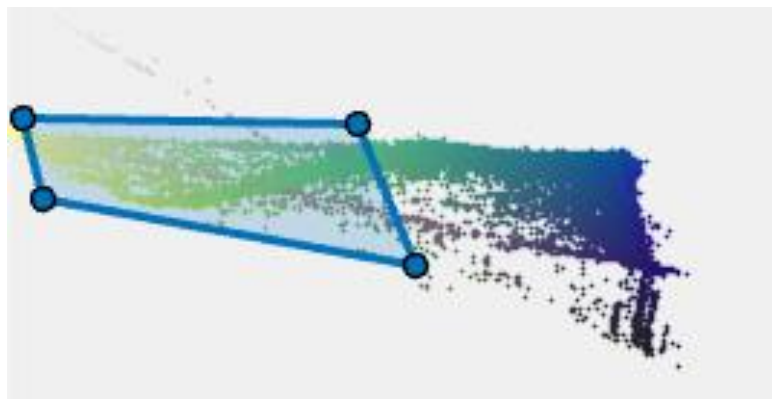
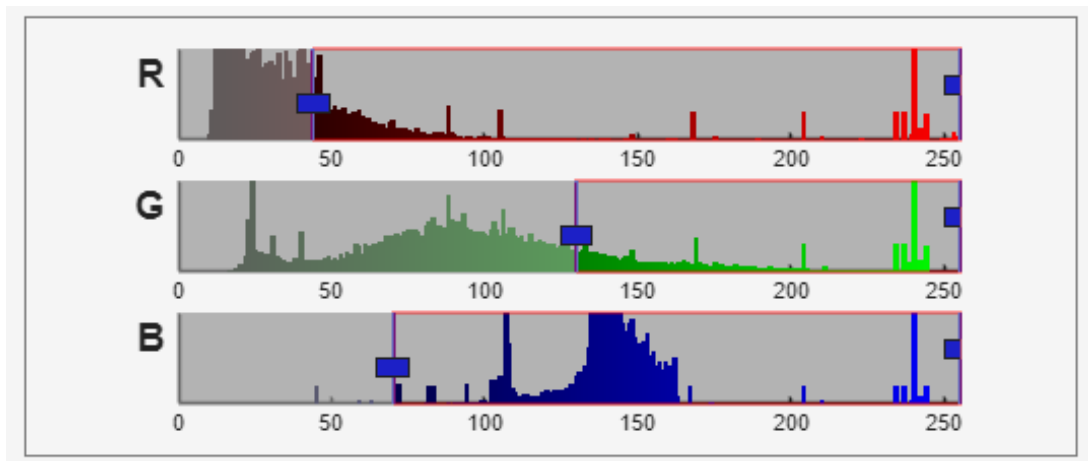


Figura 14. a) Segmentación de color para mapa 2D. b) Ajuste mediante intensidades de color. c) Ajuste mediante vértices.

De esta forma se observan las líneas de crecimiento de forma muy clara, y analizarlas es más sencillo. Se lleva a conversión binaria la imagen y se analiza con la librería *Image Region Analyzer*.

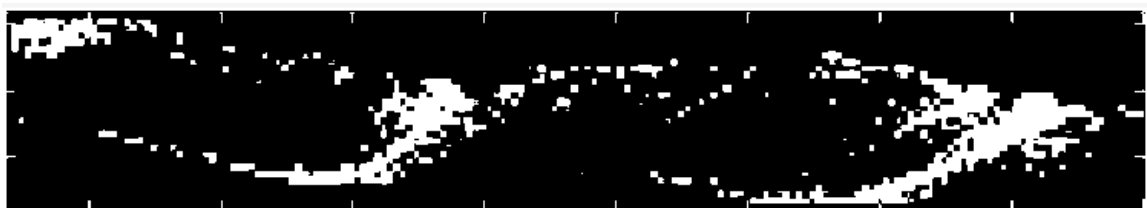


Figura 15. Imagen binaria del mapa 2D tras realizar segmentación.

Esta librería da como resultado diferentes enfoques de datos de la imagen analizada como son el perímetro, la excentricidad, número de Euler y el que más interesaba en este caso que era el área, entre otros. Al estudiar el área, después de haber realizado la umbralización de la imagen, se pueden seleccionar las zonas con mayor área y de esta forma poder dibujar en ellas las líneas de crecimiento, ya que coincide con lo esperado como se puede

observar en la *figura 16-a* y *b*. Las zonas en rojo son las de mayor área. En la *figura 16-b* se muestran marcadas las áreas marcadas en rojo en la *figura 16-a*,



Region Properties			Region Properties		
Area	Eccentricity	EquivDiameter	Area	Eccentricity	EquivDiameter
202	0.7750	16.0373	254	0.9170	17.9834
1	0	1.1284	138	0.9254	13.2555
176	0.7684	14.9696	50	0.3302	7.9788
77	0.5883	9.9015	56	0.4841	8.4440
12	0.9143	3.9088	84	0.6829	10.3418
14263	0.9541	134.7598	305	0.5144	19.7063
47	0.6802	7.7358	61	0.6271	8.8129
53	0.4710	8.2147	114	0.5741	12.0478
36	0	6.7703	160	0.8955	14.2730
78	0.5973	9.9656	166	0.8405	14.5381
55	0.4933	8.3683	21887	0.9365	166.9353
53	0.7453	8.2147	36	0.7119	6.7703
192	0.9430	15.6353	36	0.6700	6.7703
1	0	1.1284	5	0.9798	2.5231
43	0.4750	7.3993	14	0.8779	4.2220
50	0.7044	7.9788	1	0	1.1284
374	0.7195	21.8218	67	0.7291	9.2362
6	0.9860	2.7640	306	0.7879	19.7386
96	0.5662	11.0558	1247	0.9088	39.8463
283	0.7985	18.9823	64	0	9.0270
			41	0.5267	7.2252

Figura 16. a) Imagen binaria mapa 2D analizada por mayor área. b) Conjunto de datos analizados con el mayor área.

Esta idea asegura conocer fácilmente las líneas de crecimiento, pero finalmente es descartada ya que la implementación de esta idea no acaba siendo lo automática que se busca en este proyecto. Esto se debe, a que el análisis no se basa en la búsqueda de mayores concentraciones de Mg/Ca, el cual es uno de los objetivos.

El objetivo principal es detectar líneas con *ratios* altos, pero se desconoce el tipo de trayectorias a seguir. La idea que surge es que el usuario describa una línea punto a punto sobre el contorno del borde de la concha para analizar a partir de esa línea el resto del mapa 2D. Se realiza en el borde de la concha porque esa línea es isócrona (la lapa la generó su último día de vida) y debe tener por lo tanto un *ratio* Mg/Ca más o menos homogéneo. La experiencia indica que la trayectoria de esa línea debe ser más o menos similar a la que sigan las líneas de crecimiento a medida que avanzamos en el resto del mapa 2D, especialmente en las regiones cercanas al borde. Por lo tanto, a partir de esta restricción espacial se consigue promediar el valor de Mg/Ca a lo largo de esa trayectoria y llegará un

momento en el que se encontrará un promedio de Mg/Ca alto a lo largo de la concha, con lo que se podría considerar haber encontrado una línea de crecimiento (se podría relacionar con la búsqueda de un máximo local a lo largo del mapa 2D de la concha).

Un ejemplo ilustrativo es el que se observa en la *figura 17*, donde la línea roja del final del mapa 2D es la que define el usuario como línea a promediar a lo largo del mapa 2D, y las otras dos líneas en rojo las líneas de crecimiento o líneas con mayor promedio Mg/Ca de la concha.

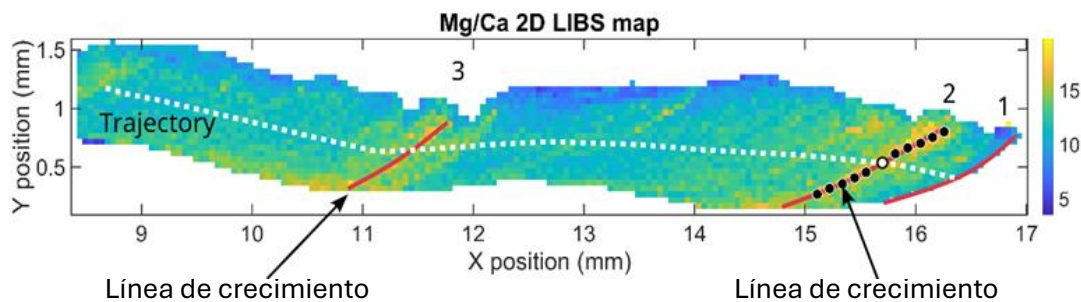


Figura 17. Mapa 2D con líneas de crecimiento y trayectoria del usuario.

3.5 Pasos a seguir

En base a lo comentado en este documento anteriormente, se propone el siguiente procedimiento para cumplir con los objetivos del programa a desarrollar:

1. Describir trayectorias sobre los mapas 2D para que el usuario pueda definir la línea del final de la concha.
2. Promediar valores Mg/Ca en torno a la trayectoria dibujada por el usuario a lo largo del mapa 2D.
3. Replicar la trayectoria definida por el usuario en los lugares con mayor concentración Mg/Ca sobre la superficie del mapa 2D.
4. Ajustar las trayectorias replicadas para que el ajuste en la imagen coincida con la línea de crecimiento.
5. Recuperar los valores promediados de Mg/Ca de las trayectorias declaradas como líneas de crecimiento.

3.6 Desarrollo de la aplicación

La aplicación desarrollada se realizará en el lenguaje Matlab. Esta se estructura en torno a una función principal (*main function*), la cual se encarga de invocar secuencialmente a otras tres funciones adicionales.

```

function detect_growth_lines_v5 [***]

function enter(hFig, event) [***]

function draw_trajectory(ref_trajectory, mapa2D) [***]

function adjusted_trajectory = adjust_trajectory_high_values(trajectory, mapa2D, threshold) [***]

```

Figura 18. Funciones aplicación final.

3.6.1 Función principal

En esta función, como se ha comentado antes, la finalidad principal es la de llamar al resto de funciones, además de abrir la figura a analizar y de pedirle al usuario que dibuje la trayectoria de referencia. En una primera instancia se hizo que esta función pudiese abrir archivos con otro tipo de formatos, ya sea *.jpg* o *.png*, aunque estos no son útiles a la hora de poder sacar un promedio de Mg/Ca realista ya que si se analizan los mapas 2D de estas imágenes los valores se disparaban a cientos, por lo tanto, son irreales. Por esta problemática solo se trabajará en esta aplicación con figuras *.fig*, que son de gran utilidad a la hora de crear umbrales de decisión para el ajuste del desarrollo por ser valores realistas. Estas figuras son representaciones visuales de los mapas 2D de concentración Mg/Ca de las lapas, proporcionadas por el Grupo de Ingeniería Fotónica de la Universidad de Cantabria.

En la *figura 19* vemos como al principio de la función se abre un cuadro de diálogo donde el usuario seleccionará un archivo *.fig*. Se verifica que sea de esta extensión y si es así se almacenan los datos de la imagen. Se abre una nueva figura donde el usuario pintará mediante puntos la línea de referencia. En el momento que el usuario presione la tecla “Enter” se configura una nueva función, llamada *enter*, que procesa los datos y que es comentada en el siguiente punto.

```

function detect_growth_lines_v6
% Cargar archivo .fig
[filename, pathname] = uigetfile({'*.fig', 'Figuras (*.fig)'}); %Abre cuadro de diálogo para seleccionar archivo .fig
if isequal(filename, 0)
    disp('El usuario canceló la selección del archivo');
    return;
end
file_path = fullfile(pathname, filename);
[~, ~, ext] = fileparts(file_path);

if strcmp(ext, '.fig')
    fig = openfig(file_path, 'invisible'); % Abrir el archivo .fig
    ax = get(fig, 'CurrentAxes'); % Obtiene los ejes
    img_obj = findobj(ax, 'Type', 'image'); % Dentro de los ejes anteriores busca objetos tipo imagen
    if isempty(img_obj)
        disp('No se encontró ninguna imagen en el archivo .fig');
        return;
    end
    mapa2D = img_obj.CData; %Obtiene datos de la imagen (mapa 2D de concentraciones)
    close(fig); % Cerrar la figura
end

% Mostrar la imagen
hFig = figure;
mapa2D = flipud(mapa2D);
imshow(mapa2D, []); % Muestra la imagen del mapa 2D en la figura
title('Mapa 2D del Mg/Ca');

% Permitir al usuario dibujar una trayectoria de referencia (roja)
disp('Dibuje la trayectoria de referencia y presione "ENTER"');
hRef = drawpolyline('Color','r','LineWidth',2,'MarkerSize',5); % Línea dibujada por el usuario

% Guardar la referencia a hRef y el mapa en guidata
data.hRef = hRef; % Guarda datos de línea dibujada
data.mapa2D = double(mapa2D); % Convertir a double para interp2
guidata(hFig, data); %Guarda hRef y mapa2D en la figura abierta hFig

% Configurar el callback para tecla ENTER
set(hFig, 'KeyPressFcn', @enter);
end

```

Figura 19. Función principal.

3.6.2 Función enter

El propósito de la función consiste en recuperar la trayectoria dibujada y los datos de la imagen, para luego llamar a otra función (*draw_trajectory*) que se encargará de procesar y dibujar las trayectorias ajustadas en base a los valores de Mg/Ca en la imagen. Primero, se recuperan los datos almacenados previamente en *hFig*, que contiene los datos de los mapas 2D y la línea de referencia dibujada por el usuario. La matriz de coordenadas, que representa los puntos de la trayectoria, se guarda en *ref_trajectory*. Estos datos, junto con la información del mapa 2D, se pasan como argumentos a la función *draw_trajectory*, la cual es responsable de procesar, calcular y dibujar las trayectorias.

```

function enter(hFig, event)
    if strcmp(event.Key, 'return')
        % Recuperar los datos de hFig y los almacena
        data = guidata(hFig);
        hRef = data.hRef;
        mapa2D = data.mapa2D;

        ref_trajectory = hRef.Position; % Matriz de coordenadas
        draw_trajectory(ref_trajectory, mapa2D);
        set(hFig, 'KeyPressFcn', ''); % Desactivar el callback de la tecla ENTER
    end
end

```

Figura 20. Función enter.

3.6.3 Función draw_trajectory

Esta función se encargará de procesar una trayectoria de referencia dibujada por el usuario en una imagen en 2D, generar trayectorias similares moviéndose hacia la izquierda de la imagen, calcular las concentraciones de Mg/Ca en estas trayectorias, y dibujar las trayectorias que tienen una alta concentración de Mg/Ca. Esta función se puede declarar como la fundamental de la aplicación, ya que hace la parte más importante del programa, por lo tanto, es en la que más tiempo se ha dedicado a desarrollar y a ajustar. En los puntos anteriores no se ha comentado en profundidad como ha ido evolucionando el desarrollo ya que estas funciones, respecto a cómo eran en un principio, no se han visto prácticamente alteradas. No es el caso de esta función, por lo que a continuación se explicará cómo ha ido evolucionando la función hasta poder conseguir el resultado esperado.

La primera idea para esta función consistía en la creación, por parte del usuario, de una línea de puntos blancos como ruta a seguir para establecer las líneas de crecimiento a partir de la línea dibujada previamente. De esta forma solo se evaluarían los puntos que le interesasen al usuario ser evaluados. Este intento no funcionó como se esperaba por lo que quedó descartado. En la *figura 21* se puede observar el resultado para este intento, donde sí replicaba la trayectoria del final de la concha que dibuja el usuario y en puntos declarados de la línea blanca, pero únicamente evaluaba los de mayor concentración de Mg/Ca, pero desde un punto de vista individual, y no como promedio de la trayectoria dibujada. Es por lo que se observa que replica la trayectoria como ha sido descrita, pero sin coincidir en una línea de crecimiento, si no, en puntos de máxima concentración Mg/Ca.

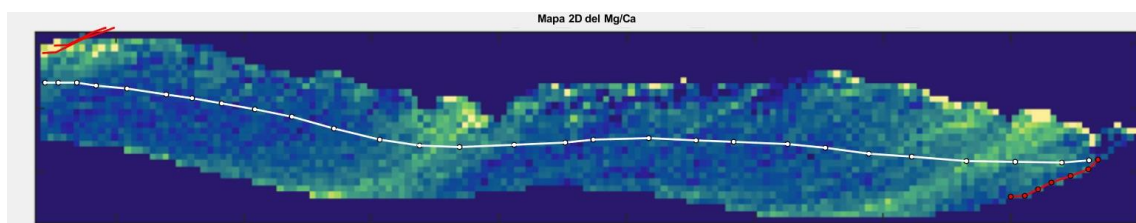


Figura 21. Línea de crecimiento en un punto máximo por medio de ruta del usuario.

Tras comprobar que este resultado no funcionaba como se esperaba, se trató de simplificar un poco más el programa, al menos desde el punto de vista de escritura, ya que computacionalmente es algo más lento ya que analizará todos los puntos del mapa 2D, en

comparación a los que declaraba el usuario previamente. Para ello el programa no cambia mucho, únicamente eliminará el análisis mediante puntos, declarados por el usuario, a un análisis completo del mapa 2D. En la *figura 22* podemos observar cómo replica la trayectoria del usuario en la línea de crecimiento de mayor promedio a la izquierda de donde el usuario dibuja la imagen, ya que como se observa en la *figura 23*, si el usuario coloca la línea pasada la primera línea de crecimiento dibuja la siguiente, que para ese caso sería la de mayor promedio. Por lo tanto, el desarrollo trabaja como se presupone que debería hacerlo, pero únicamente para una línea de crecimiento.

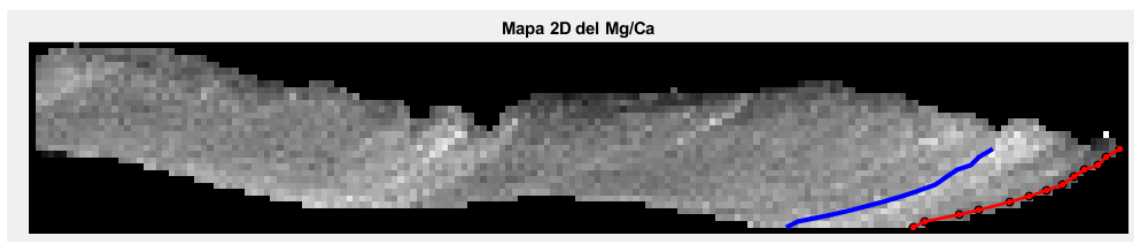


Figura 22. Línea de mayor crecimiento de todo el mapa 2D.

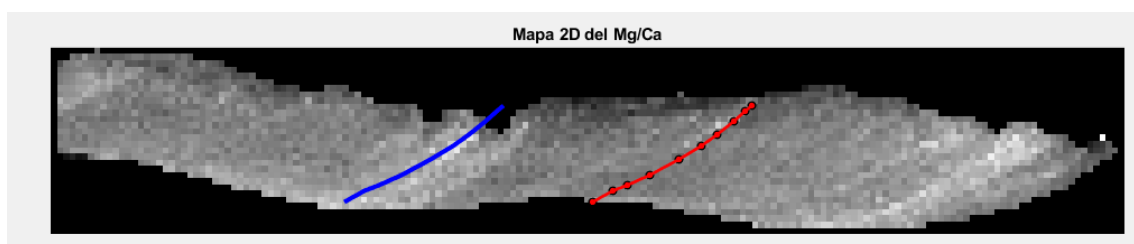


Figura 23. Segunda línea de mayor crecimiento del mapa 2D.

El siguiente punto del desarrollo consistía en conseguir realizar esta idea, pero para el número de líneas de crecimiento que fuesen necesarias. Por lo que se hizo un ajuste del código donde la principal diferencia radica en el almacenamiento, tanto de trayectorias de alto valor en celdas y de sus promedios de concentración Mg/Ca en una matriz. De esta forma tras una declaración previa de qué es considerado una alta concentración, umbralización, y el paso en píxeles en el mapa 2D podremos obtener las líneas de crecimiento. Si comparamos la *figura 24* con la *figura 25*, podemos observar que la diferencia de código no es grande, aunque en lugar de almacenar solo la mejor trayectoria, zona marcada en azul, se almacenan todas aquellas mayores al umbral declarado, zona marcada en verde, para que se ordenen de mayor a menor y se pinte el número de líneas declaradas, zona en rojo. Ha de aclararse que si se hace un buen ajuste al declarar el umbral no será necesario declarar cuántas queremos líneas de crecimiento se quieren dibujar, ya que será restrictivo. En la *figura 26* se declara para las dos mejores líneas de crecimiento porque el umbral utilizado en esta ocasión no es restrictivo. Si se observa la *figura 27* al utilizarse un umbral más restrictivo solo se pinta una línea de crecimiento, aunque este declarado que pinte las dos mejores.

```

function process_trajectory(refTrajectory, mapa2D)
    hold on;
    % Mostrar la trayectoria de referencia en rojo
    plot(refTrajectory(:, 1), refTrajectory(:, 2), 'r-', 'Linewidth', 2);

    % Definir el umbral para considerar alta concentración
    threshold = 5;

    % Generar trayectorias similares moviéndose hacia la izquierda
    step_size = 20; % Tamaño del paso en píxeles
    max_steps = floor(size(mapa2D, 2) / step_size);

    best_trajectory = [];
    best_average = -inf;

    for step = 1:max_steps
        % Desplazar la trayectoria de referencia hacia la izquierda
        offset = [-step * step_size, 0];
        newTrajectory = refTrajectory + offset;

        % Asegurarse de que la trayectoria no se salga de los límites de la imagen
        if any(newTrajectory(:,1) <= 0 | newTrajectory(:,1) > size(mapa2D, 2))
            continue;
        end

        % Interpolan los valores de Mg/Ca a lo largo de la nueva trayectoria
        mg_ca_values = interp2(mapa2D, newTrajectory(:,1), newTrajectory(:,2));

        % Calcular el promedio de Mg/Ca a lo largo de la trayectoria
        avg_mg_ca = mean(mg_ca_values, 'omitnan');

        % Dibujar la trayectoria si tiene un promedio de Mg/Ca alto
        if avg_mg_ca > threshold && avg_mg_ca > best_average
            best_average = avg_mg_ca;
            best_trajectory = newTrajectory;
        end
    end

    % Dibujar la mejor trayectoria encontrada en azul
    if ~isempty(best_trajectory)
        plot(best_trajectory(:, 1), best_trajectory(:, 2), 'b-', 'Linewidth', 2);
    end
end

```

Figura 24. Función para pintar una sola línea de crecimiento.

```

function draw_trajectory(ref_trajectory, mapa2D)
    hold on;
    % Mostrar la trayectoria de referencia en rojo
    plot(ref_trajectory(:, 1), ref_trajectory(:, 2), 'r-', 'Linewidth', 2);

    % Definir el umbral para considerar alta concentración
    threshold = 3;

    % Generar trayectorias similares moviéndose hacia la izquierda
    step_size = 10; % Tamaño del paso en píxeles
    max_steps = floor(size(mapa2D, 2) / step_size);

    high_trajectories = {}; % Almacenar trayectorias que superan el umbral
    high_averages = []; % Almacenar los promedios correspondientes

    for step = 1:max_steps
        % Desplazar la trayectoria de referencia hacia la izquierda
        offset = [-step * step_size, 0];
        new_trajectory = ref_trajectory + offset;

        % Asegurarse de que la trayectoria no se salga de los límites de la imagen
        if any(new_trajectory(:,1) <= 0 | new_trajectory(:,1) > size(mapa2D, 2))
            continue;
        end

        % Interpolare los valores de Mg/Ca a lo largo de la nueva trayectoria
        mg_ca_values = interp2(mapa2D, new_trajectory(:,1), new_trajectory(:,2), 'cubic'); %Método más preciso y suave que el lineal,

        % Calcular el promedio de Mg/Ca a lo largo de la trayectoria
        avg_mg_ca = mean(mg_ca_values, 'omitnan'); %Evita datos NaN

        % Almacenar la trayectoria si el promedio Mg/Ca es mayor que el umbral
        if avg_mg_ca > threshold
            high_trajectories{end+1} = new_trajectory;
            high_averages(end+1) = avg_mg_ca;
        end
    end

    % Ordenar trayectorias por el promedio de Mg/Ca de mayor a menor
    [~, sort_idx] = sort(high_averages, 'descend');
    high_trajectories = high_trajectories(sort_idx);
    high_averages = high_averages(sort_idx); % Ordenar también los promedios

    % Dibujar las mejores trayectorias
    num_trajectories_to_draw = min(length(high_trajectories), 1); % AJUSTAR NUMERO DE LINEAS DE CRECIMIENTO
    for i = 1:num_trajectories_to_draw
        adjusted_trajectory = adjust_trajectory_high_values(high_trajectories{i}, mapa2D);
        if ~isempty(adjusted_trajectory) % Verificar que no esté vacío después del ajuste
            plot(adjusted_trajectory(:, 1), adjusted_trajectory(:, 2), 'm-', 'Linewidth', 3); %Color, estilo y tamaño de la trayectoria
            disp(['Promedio de Mg/Ca para la trayectoria ' num2str(i) ': ' num2str(high_averages(i))]);
        end
    end
end

```

Figura 25. Función para múltiples líneas de crecimiento.

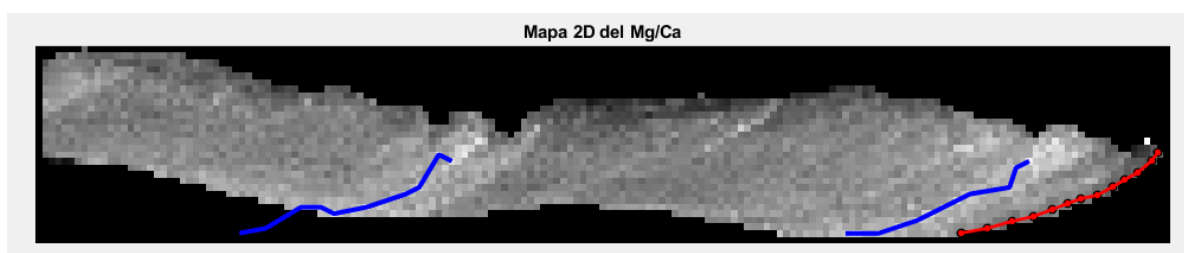


Figura 26. Dos mejores líneas de crecimiento sin ajuste.

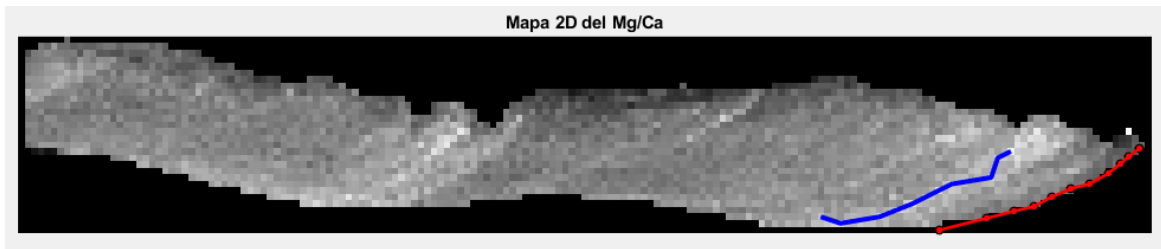


Figura 27. Línea de crecimiento tras un ajuste restrictivo.

En la figura 26 se observa como una de las líneas de crecimiento sobresale del mapa 2D, debido a no un ajuste incorrecto, por lo que se deduce que el programa solo replica, aunque lo hace en el lugar correcto, la línea de puntos del usuario. Por lo que nace la necesidad de hacer este ajuste, el cual será llevado a cabo en la siguiente función, tras una llamada de esta. En la figura 28 se aumenta una parte de la función para remarcar la importancia a la hora de hacer la llamada a la función de ajuste de las líneas de crecimiento, *adjusted_trajectory*, y la otra por la importancia en el resultado final a la hora de desplegar por la ventana de comandos los valores promediados de concentración de Mg/Ca, dato que es muy útil, además de ser un objetivo en el desarrollo de este proyecto.

```
for i = 1:num_trajectories_to_draw
    adjusted_trajectory = adjust_trajectory_high_values(high_trajectories{i}, mapa2D, threshold);
    plot(adjusted_trajectory(:, 1), adjusted_trajectory(:, 2), 'm-', 'LineWidth', 3); %Color, estilo y tamaño de la trayectoria
    disp(['Promedio de Mg/Ca para la trayectoria ' num2str(i) ': ' num2str(high_averages(i))]);
end
```

Figura 28. Llamada a la función de ajuste y promedio ventana de comandos.

3.6.4 Función *adjusted_trajectory*

La función de ajuste de las líneas de crecimiento se podría definir como la función con el propósito de refinar las líneas de crecimiento y depuración del programa. En la elaboración de esta función, como punto de partida, se buscó dar cierta flexibilidad para poder cambiar la forma de la trayectoria. Esta flexibilidad tampoco puede ser muy grande ya que, teóricamente, la formación de líneas de crecimiento es de carácter isócrono, por lo que debe parecerse a la de la estación de captura. Por ello, la idea que se llevó a cabo fue la de dibujar la trayectoria en el lugar que le tocase en el mapa 2D, pero ajustándose según los píxeles vecinos con mayor concentración. Esto quiere decir, que, si el siguiente píxel que tocarse pintar no es el de mayor concentración, según el número de píxeles “vecinos”, no será pintado, ya que hay otro píxel cercano con mayor concentración. De esta forma la trayectoria seguirá siendo de una forma similar a la principal, pero adaptada a la línea de crecimiento con los puntos con mayor promedio Mg/Ca de esa zona. La similitud, respecto a la trayectoria definida por el usuario, responderá según el ajuste que realice el usuario a la hora de establecer en cuantos píxeles “vecinos” quiere que se adapte la trayectoria. Como se ha comentado previamente en este punto si se establece la búsqueda en un número grande la línea de crecimiento podría dejar de ser asíncrona, por lo que un buen ajuste es importante.

En la *figura 29* vemos como se adapta la trayectoria en algunos puntos, ya que al principio la trayectoria forma una línea recta y luego se pueden ver algunos picos.

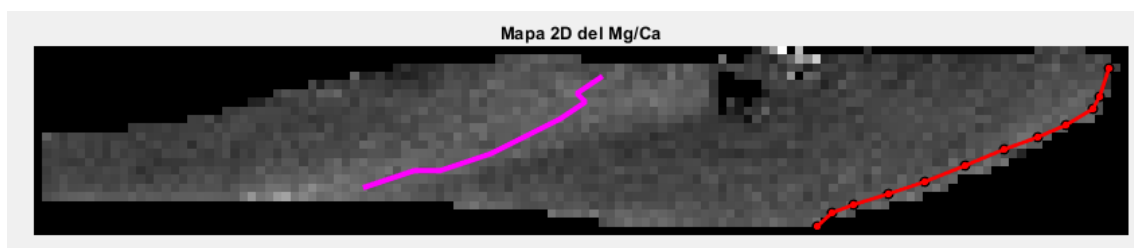


Figura 29. Ajuste de trayectoria buscando píxeles vecinos de mayor concentración.

En la figura anterior parece que está finalizada la aplicación, pero al utilizar otro tipo de mapas, las trayectorias se pintan en lugares donde la concentración de Mg/Ca es cero, es decir, espacios del mapa 2D de valores vacíos o “NaN”. Para ello se lleva a cabo otro ajuste en esta función que no es aquel que restringir que se pinte en punto “NaN” del mapa 2D. Al pasar la trayectoria como argumento se decide como primer ajuste eliminar aquellos valores vacíos o “NaN” del mapa 2D que pertenezcan a la trayectoria, de esta forma, aunque luego ajustase la trayectoria a píxeles “vecinos” no iba a tener problemas porque los valores de los “vecinos” siempre que se actualizasen serían mayores, por lo que si se encontrase un valor “NaN” no se actualizaría. Para llevar a cabo esta idea primero hay que asegurar que ningún punto este fuera de la imagen, para ello se realiza una comparación y seguido una comparación lógica para poder eliminar los puntos “NaN”. En ella, se utiliza “~isnan”, donde “isnan” marca como valores “true” aquellos en los que las posiciones son “NaN” y “false” donde no lo son, y el operador “~” es quien se encarga de negar esta operación. Finalmente, actualiza los valores comparados en primera instancia para así conseguir lo que se está buscando. En la *figura 31* se observa cómo se ajustan las trayectorias correctamente.

```

function adjusted_trajectory = adjust_trajectory_high_values(trajectoria, mapa2D)
    % Convertir la trayectoria a enteros redondeados
    rounded_trajectory = round(trajectoria);

    % Eliminar los puntos que están fuera de los límites
    valid_indices = rounded_trajectory(:, 1) > 0 & rounded_trajectory(:, 1) <= size(mapa2D, 2) & ...
        rounded_trajectory(:, 2) > 0 & rounded_trajectory(:, 2) <= size(mapa2D, 1);
    valid_trajectory = rounded_trajectory(valid_indices, :);

    % Eliminar puntos que corresponden a NaN en el mapa2D
    non_nan_indices = ~isnan(arrayfun(@(x, y) mapa2D(y, x), valid_trajectory(:, 1), valid_trajectory(:, 2)));
    valid_trajectory = valid_trajectory(non_nan_indices, :);

    % Ajustar la trayectoria válida para pasar por los puntos de valores más altos
    adjusted_trajectory = valid_trajectory;
    neighborhood_size = 3; % Tamaño del vecindario para buscar el valor más alto
    half_size = floor(neighborhood_size / 2);

    for i = 1:size(valid_trajectory, 1)
        x = valid_trajectory(i, 1);
        y = valid_trajectory(i, 2);

        % Definir el vecindario alrededor del punto actual
        x_min = max(x - half_size, 1);
        x_max = min(x + half_size, size(mapa2D, 2));
        y_min = max(y - half_size, 1);
        y_max = min(y + half_size, size(mapa2D, 1));

        neighborhood = mapa2D(y_min:y_max, x_min:x_max);

        % Encontrar el píxel con el valor más alto en el vecindario válido
        valid_indices = find(~isnan(neighborhood(:)));
        if ~isempty(valid_indices)
            [max_val, max_idx] = max(neighborhood(valid_indices));
            [y_offset, x_offset] = ind2sub(size(neighborhood), valid_indices(max_idx));
            new_x = x_min + x_offset - 1;
            new_y = y_min + y_offset - 1;

            % Ajustar solo si el nuevo valor es mayor que el valor original
            if max_val > mapa2D(y, x)
                adjusted_trajectory(i, 1) = new_x;
                adjusted_trajectory(i, 2) = new_y;
            end
        end
    end
end

```

Figura 30. Función de ajuste de líneas de crecimiento completa.

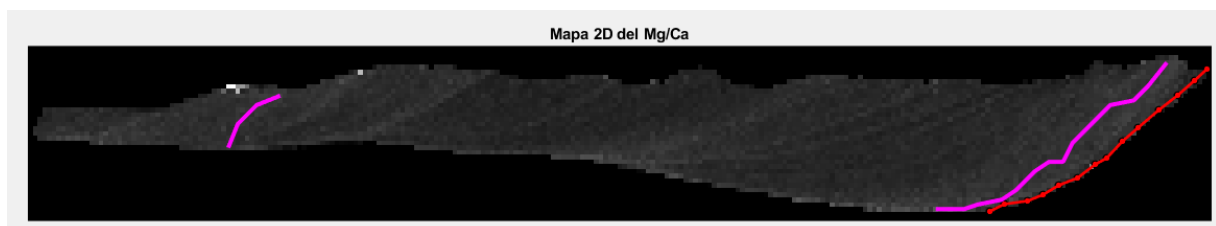


Figura 31. Líneas de crecimiento sin sobresalir del mapa 2D.

4. Resultados

A lo largo de la explicación del desarrollo se han podido observar diferentes resultados, pero para comprobar cuánto de buenos son, se llevarán a comparación los resultados con las figuras que muestran las concentraciones mediante intensidades de color. Todos los ejemplos de mapas 2D que se analizan son trabajo del Grupo de Ingeniería Fotónica de la Universidad de Cantabria.

4.1 Espécimen LAN178

El primer resultado que se va a comparar es del espécimen LAN178. En él se pueden observar dos líneas de crecimiento con alta concentración, las cuales coinciden con los resultados obtenidos, las líneas rosas de la *figura 33*. Los resultados del promedio de concentración Mg/Ca de las trayectorias, de derecha a izquierda son de 15.19 mmol/mol y de 14.12 mmol/mol, respectivamente. La estación de captura de este espécimen data de la fecha del 12/11/2011, perteneciente a la época del otoño, que al compararlo con los resultados coinciden con el mapa 2D, ya que comienzan a aparecer concentraciones de Mg/Ca de colores menos intensos, por lo que la concentración está disminuyendo, y con ello la temperatura. Además, al observar la *figura 33* la línea de crecimiento de mayor concentración, que es cercana a la estación de captura, es en la época de verano, por lo que los resultados son los esperados.

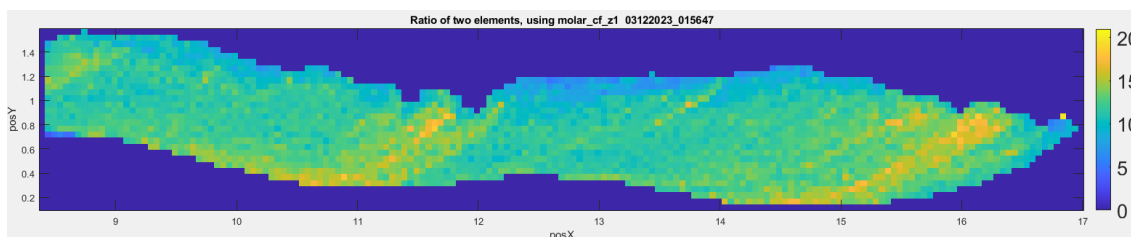


Figura 32. Mapa 2D LAN178.

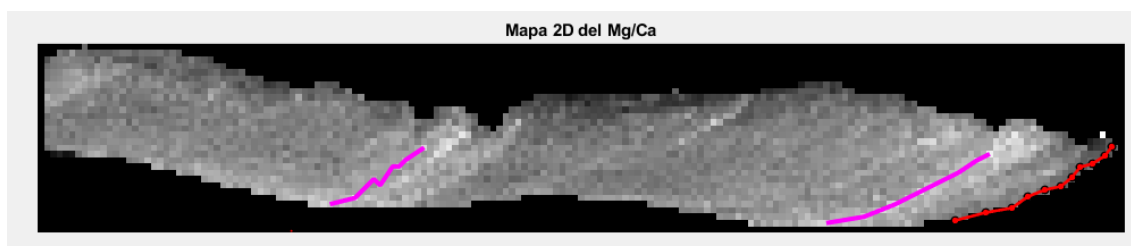


Figura 33. Líneas de crecimiento LAN178.

4.2 Espécimen LAN109

El siguiente espécimen que es comparado es el LAN109. Como en el anterior espécimen se observa que las líneas de crecimiento de mayor concentración coinciden con zonas de alta concentración en el mapa 2D. Los valores de concentraciones de las trayectorias son 14.03 mmol/mol y de 13.97 mmol/mol. Este espécimen fue recogido en el verano del año de 2012 el 5 de agosto, dato que tras observar la *figura 34* coincide con el mapa 2D por tener una línea de crecimiento de alta concentración cerca del borde. Al observar la *figura 35* la línea de crecimiento de mayor concentración no coincide exactamente con que la fecha de recolección del espécimen fuese la de mayor concentración, pero sí muy próxima, por lo que podríamos deducir que esta época de máxima concentración fue a finales del mes de junio o durante el mes de julio.

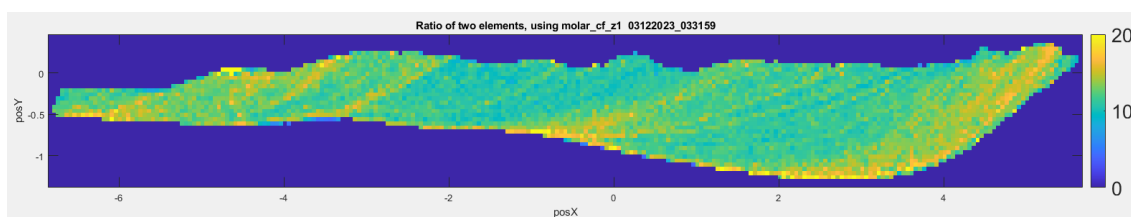


Figura 34. Mapa 2D LAN109.

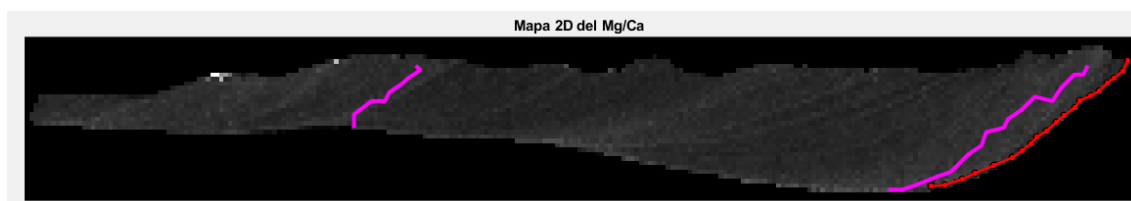


Figura 35. Líneas de crecimiento LAN109.

4.3 Espécimen LAN184

En este punto se analiza el espécimen LAN184. Con él, se confirma que el programa funciona correctamente, ya que la línea de crecimiento coincide con la del mapa 2D. La concentración de la trayectoria es de 13.50 mmol/mol. Al observar el mapa 2D en la zona donde se estudia la estación de captura comienzan a aparecer algunos puntos de concentración alta, sin ser estos de gran intensidad, por lo que se podría esperar que la estación de captura fuese durante la primavera, aunque con fechas próximas al verano, por la aparición de estos puntos de concentración más altos. Accediendo a la fecha de captura real, la estación de captura data del 03/06/2012, fecha perteneciente a la estación de la primavera y cercana a la estación del verano, corroborando lo comentado hasta ahora. En la *figura 37* se define la línea de crecimiento de mayor concentración de Mg/Ca en la época de verano, al principio de esta etapa, ya que la línea de crecimiento se define al principio de la zona de intensidades más claras, amarillas en el mapa 2D.

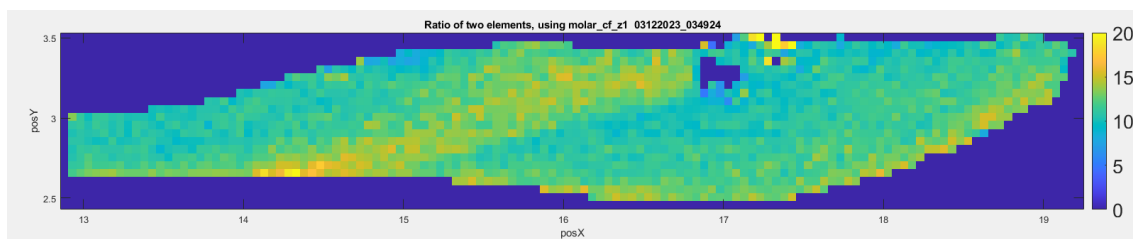


Figura 36. Mapa 2D LAN184.

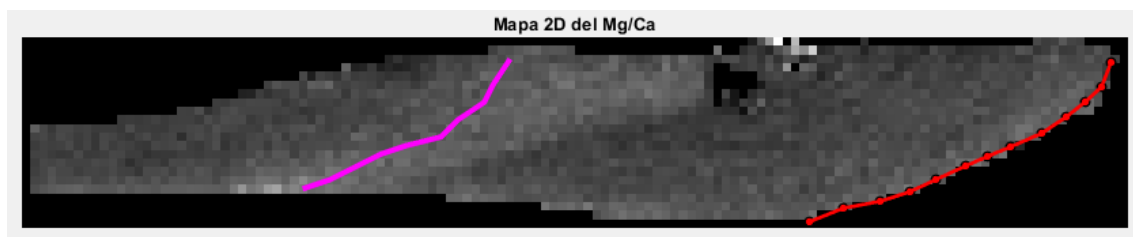


Figura 37. Línea de crecimiento LAN184.

4.4 Espécimen LAN235

En este punto se analiza el espécimen LAN235. En él se puede observar una línea de crecimiento con alta concentración. El resultado del promedio de concentración Mg/Ca de la trayectoria, es de 14.69 mmol/mol. Al observar la *figura 39* la línea de crecimiento de mayor concentración, que es en la época de verano, de forma aproximada, la época del verano más cálida es entorno a finales de julio y agosto, por lo que, si la línea de máxima concentración es sobre esta fecha y la estación de captura fue en otoño el día 12 de noviembre del año 2011, se puede asegurar que el mapa 2D y la línea de máxima concentración son correctos, ya que al observar la *figura 38*, los colores comienzan a ser menos claros, a partir de la línea de máxima concentración marcada en la *figura 39*, por lo que la concentración está disminuyendo, y con ello la temperatura.

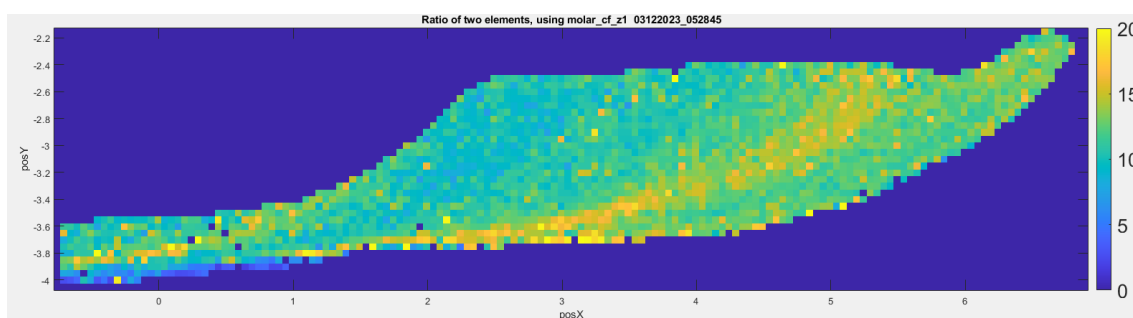


Figura 38. Mapa 2D LAN235.

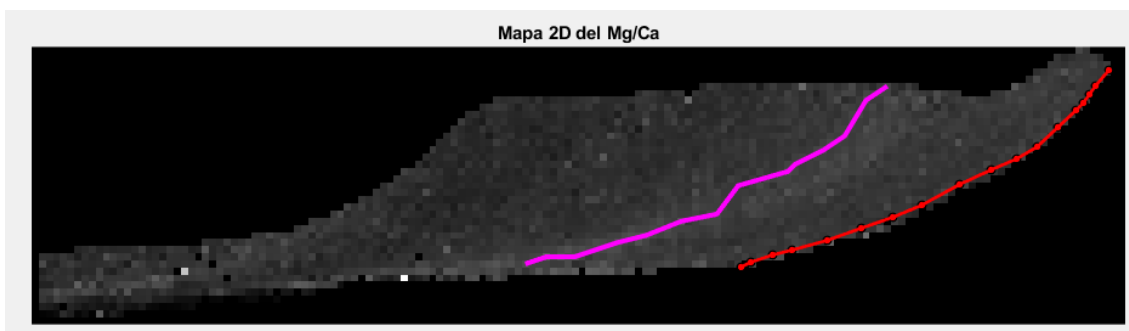


Figura 39. Línea de crecimiento LAN235.

4.5 Espécimen LAN256

El último espécimen es el LAN256. Este es el que más líneas de alta concentración presenta, siendo en su total cuatro líneas. Los resultados del promedio de concentración Mg/Ca de las trayectorias, de derecha a izquierda son de 14.08 mmol/mol, de 13.71 mmol/mol, de 12.47 mmol/mol y de 12.34 mmol/mol, respectivamente. La estación de captura de este espécimen data de la fecha 03/06/2012, perteneciente a la época de la primavera, que al observar la *figura 40* se corrobora este dato ya que, desde la última época del verano, línea de concentración de más a la derecha de la *figura 41*, se observa como descendiende la intensidad de color, para volver a crecer y llegados a la estación de captura comienzan a aparecer algunos puntos de mayor intensidad de color claro, que al tratarse del mes de junio, próximo al verano, donde comienzan a surgir estos puntos de mayor intensidad. Cada una de las líneas de la *figura 41* corresponden a la línea de crecimiento de mayor concentración para cada época del verano a lo largo de la concha de este espécimen.

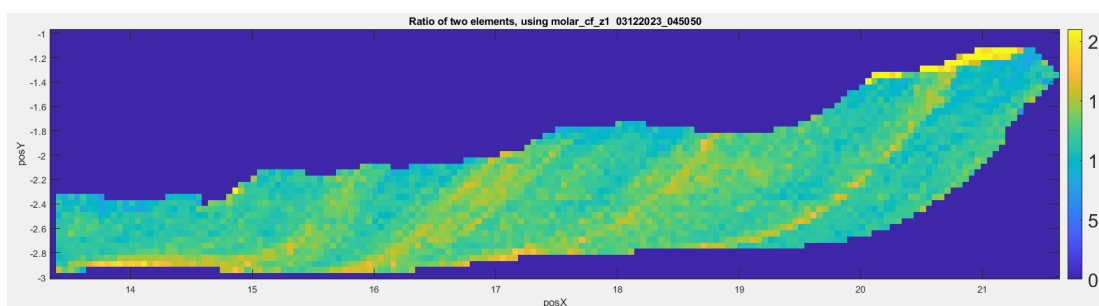


Figura 40. Mapa 2D LAN256.

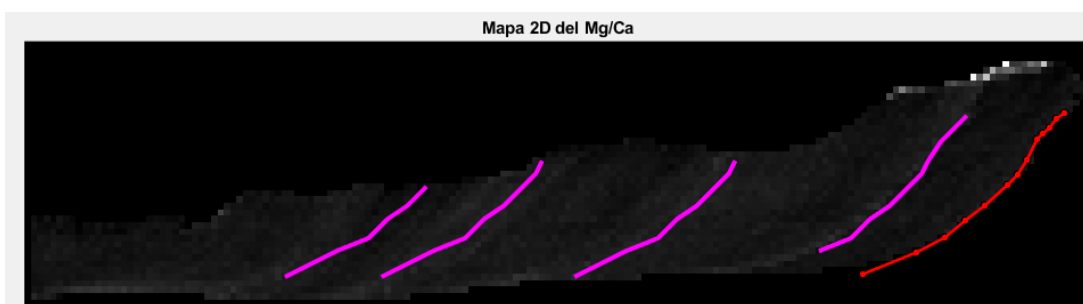


Figura 41. Líneas de crecimiento LAN256.

5. Conclusión y líneas futuras

5.1 Conclusión

En este Trabajo de Fin de Grado se concluye que la espectroscopía tiene innumerables aplicaciones en la vida humana y científica. En particular, la técnica LIBS (*Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*), utilizada en este trabajo, se ha revelado como una herramienta poderosa y versátil. Gracias a esta técnica es posible analizar una amplia variedad de muestras, desde medicamentos hasta artefactos arqueológicos y, en el caso específico de este documento, conchas de lapas. Este análisis permite determinar la estación de captura de las lapas hace miles de años y comprender mejor los comportamientos de nuestros antepasados.

La aplicación desarrollada en este trabajo ha demostrado ser una herramienta efectiva para el procesamiento de imágenes y la detección automática de líneas de crecimiento en conchas de lapas, utilizando mapas 2D obtenidos mediante la técnica LIBS por el Grupo de Ingeniería Fotónica de la Universidad de Cantabria. El uso de Matlab como plataforma principal de desarrollo ha permitido un análisis eficiente y preciso de los datos, facilitando la identificación automática de las líneas de crecimiento isócronas con un ratio constante de Mg/Ca y la extracción de los promedios de las líneas de crecimiento.

Esta capacidad de detectar y visualizar las líneas de alta concentración es significativa para interpretar los resultados del análisis de la distribución de los ratios de Mg/Ca a lo largo de la superficie de las lapas. Además, esta técnica podría ser útil en estudios geológicos y de ciencia de materiales, permitiendo una mejor estimación de la estación de captura de las lapas y proporcionando una herramienta robusta para investigaciones futuras en el campo de la distribución elemental y el análisis de materiales.

La realización de este documento ha generado un gran interés en las aplicaciones de la espectroscopía, específicamente en la técnica LIBS desarrollada en este trabajo. Resultó sorprendente cómo a partir de las conchas de las lapas se podía obtener información de épocas pasadas y enlazarlas con los comportamientos de nuestros antepasados. La selección del tema ha sido idónea, ya que resulta interesante y se adapta perfectamente a los objetivos del estudio. Aunque se encontraron numerosos problemas, especialmente en el desarrollo mediante Matlab para generar y ajustar varias líneas de crecimiento, lo cual ha sido una parte fundamental del Trabajo de Fin de Grado, así como en la redacción del documento, debido a la falta de experiencia en la elaboración de trabajos de esta envergadura, lo que ha llevado más tiempo del esperado.

Este trabajo no está exento de limitaciones. El análisis mediante Matlab, aunque efectivo, presentó retos significativos en términos de tiempo y precisión. Futuras investigaciones podrían beneficiarse de la implementación de algoritmos más avanzados o de la utilización de otras plataformas de desarrollo para mejorar la eficiencia del análisis.

En general, se valora la realización del Trabajo de Fin de Grado de forma positiva, por cumplir satisfactoriamente los objetivos marcados y obtener resultados útiles, por generar interés en el tema y por las facilidades ofrecidas por el tutor. Agradecer al Grupo de Ingeniería Fotónica de la Universidad de Cantabria por su apoyo y recursos, que han sido fundamentales para la realización de este proyecto.

5.2 Líneas futuras

Este documento sirve como punto de partida para otros posibles desarrollos. En este punto se explicarán algunos de estos nuevos posibles desarrollos o líneas futuras. Algunas de ellas son:

- Automatización de la selección de trayectoria

Una posible mejora a este desarrollo sería la implementación de una nueva idea de procesamiento de imagen que permita al usuario únicamente seleccionar la imagen. Esto implica que la trayectoria inicial, actualmente dibujada manualmente por el usuario, se genere de forma automática, aumentando la automatización y facilidad de uso de la aplicación.

- Integración de algoritmos de *Machine Learning*

El desarrollo e implementación de algoritmos de *Machine Learning* podría mejorar significativamente la precisión en la detección de líneas de crecimiento. Estos algoritmos pueden ajustarse automáticamente a los parámetros óptimos, mejorando la precisión y automatización del programa. Además, los algoritmos de aprendizaje automático podrían aprender y adaptarse a diferentes tipos de imágenes y condiciones, proporcionando resultados más robustos y fiables.

- Mejora de la interfaz de usuario

Mejorar la interfaz de usuario para el ajuste de parámetros evitaría que el usuario necesite conocimientos avanzados en el lenguaje de Matlab. Una interfaz gráfica de usuario intuitiva permitiría a los usuarios realizar ajustes de parámetros de manera sencilla y visual, facilitando el uso de la aplicación por parte de geólogos e historiadores sin experiencia técnica en Matlab

6. Código Matlab

```
function detect_growth_lines_v6
% Cargar archivo .fig
[filename, pathname] = uigetfile({'*.fig', 'Figuras (*.fig)'}); %Abre cuadro de
diálogo para seleccionar archivo .fig
if isequal(filename, 0)
    disp('El usuario canceló la selección del archivo');
    return;
end
file_path = fullfile(pathname, filename);
[~, ~, ext] = fileparts(file_path);

if strcmp(ext, '.fig')
    fig = openfig(file_path, 'invisible'); % Abrir el archivo .fig
    ax = get(fig, 'CurrentAxes'); % Obtiene los ejes
    img_obj = findobj(ax, 'Type', 'image'); % Dentro de los ejes anteriores busca
objetos tipo imagen
    if isempty(img_obj)
        disp('No se encontró ninguna imagen en el archivo .fig');
        return;
    end
    mapa2D = img_obj.CData; %Obtiene datos de la imagen (mapa 2D de concentraciones)
    close(fig); % Cerrar la figura
end

% Mostrar la imagen
hFig = figure;
mapa2D = flipud(mapa2D);
imshow(mapa2D, []); % Muestra la imagen del mapa 2D en la figura
title('Mapa 2D del Mg/Ca');

% Permitir al usuario dibujar una trayectoria de referencia (roja)
disp('Dibuje la trayectoria de referencia y presione "ENTER"');
hRef = drawpolyline('Color','r','Linewidth',2,'Markersize',5); % Línea dibujada por
el usuario

% Guardar la referencia a hRef y el mapa en guidata
data.hRef = hRef; % Guarda datos de línea dibujada
data.mapa2D = double(mapa2D); % Convertir a double para interp2
guidata(hFig, data); %Guarda hRef y mapa2D en la figura abierta hFig

% Configurar el callback para tecla ENTER
set(hFig, 'KeyPressFcn', @enter);
end

function enter(hFig, event)
if strcmp(event.Key, 'return')
    % Recuperar los datos de hFig y los almacena
    data = guidata(hFig);
    hRef = data.hRef;
    mapa2D = data.mapa2D;

    ref_trajectory = hRef.Position; % Matriz de coordenadas
    draw_trajectory(ref_trajectory, mapa2D);
end
```

```

        set(hFig, 'KeyPressFcn', ''); % Desactivar el callback de la tecla ENTER
    end
end

function draw_trajectory(ref_trajectory, mapa2D)
    hold on;
    % Mostrar la trayectoria de referencia en rojo
    plot(ref_trajectory(:, 1), ref_trajectory(:, 2), 'r-', 'Linewidth', 2);

    % Definir el umbral para considerar alta concentración
    threshold = 3;

    % Generar trayectorias similares moviéndose hacia la izquierda
    step_size = 10; % Tamaño del paso en píxeles
    max_steps = floor(size(mapa2D, 2) / step_size);

    high_trajectories = {}; % Almacenar trayectorias que superan el umbral
    high_averages = []; % Almacenar los promedios correspondientes

    for step = 1:max_steps
        % Desplazar la trayectoria de referencia hacia la izquierda
        offset = [-step * step_size, 0];
        new_trajectory = ref_trajectory + offset;

        % Asegurarse de que la trayectoria no se salga de los límites de la imagen
        if any(new_trajectory(:,1) <= 0 | new_trajectory(:,1) > size(mapa2D, 2))
            continue;
        end

        % Interpolar los valores de Mg/Ca a lo largo de la nueva trayectoria
        mg_ca_values = interp2(mapa2D, new_trajectory(:,1), new_trajectory(:,2),
            'cubic'); %Método más preciso y suave que el lineal, si hay problemas de ejecución cambiar
            'cubic' por 'lineal'

        % Calcular el promedio de Mg/Ca a lo largo de la trayectoria
        avg_mg_ca = mean(mg_ca_values, 'omitnan'); %Evita datos NaN

        % Almacenar la trayectoria si el promedio Mg/Ca es mayor que el umbral
        if avg_mg_ca > threshold
            high_trajectories{end+1} = new_trajectory;
            high_averages(end+1) = avg_mg_ca;
        end
    end

    % Ordenar trayectorias por el promedio de Mg/Ca de mayor a menor
    [~, sort_idx] = sort(high_averages, 'descend');
    high_trajectories = high_trajectories(sort_idx);
    high_averages = high_averages(sort_idx); % Ordenar también los promedios

    % Dibujar las mejores trayectorias
    num_trajectories_to_draw = min(length(high_trajectories), 1); % AJUSTAR NUMERO DE
    LINEAS DE CRECIMIENTO
    for i = 1:num_trajectories_to_draw
        adjusted_trajectory = adjust_trajectory_high_values(high_trajectories{i},
            mapa2D);
        if ~isempty(adjusted_trajectory) % Verificar que no esté vacío después del ajuste
            plot(adjusted_trajectory(:, 1), adjusted_trajectory(:, 2), 'm-', 'Linewidth',
                3); %Color, estilo y tamaño de la trayectoria
        end
    end
end

```

```

disp(['Promedio de Mg/Ca para la trayectoria ' num2str(i) ': '
num2str(high_averages(i))]);
end
end

hold off;
end
function adjusted_trajectory = adjust_trajectory_high_values(trajectoria, mapa2D)
% Convertir la trayectoria a enteros redondeados
rounded_trajectory = round(trajectoria);

% Eliminar los puntos que están fuera de los límites
valid_indices = rounded_trajectory(:, 1) > 0 & rounded_trajectory(:, 1) <=
size(mapa2D, 2) & ...
rounded_trajectory(:, 2) > 0 & rounded_trajectory(:, 2) <=
size(mapa2D, 1);
valid_trajectory = rounded_trajectory(valid_indices, :);

% Eliminar puntos que corresponden a NaN en el mapa2D
non_nan_indices = ~isnan(arrayfun(@(x, y) mapa2D(y, x), valid_trajectory(:, 1),
valid_trajectory(:, 2)));
valid_trajectory = valid_trajectory(non_nan_indices, :);

% Ajustar la trayectoria válida para pasar por los puntos de valores más altos
adjusted_trajectory = valid_trajectory;
neighborhood_size = 3; % Tamaño del vecindario para buscar el valor más alto
half_size = floor(neighborhood_size / 2);

for i = 1:size(valid_trajectory, 1)
x = valid_trajectory(i, 1);
y = valid_trajectory(i, 2);

% Definir el vecindario alrededor del punto actual
x_min = max(x - half_size, 1);
x_max = min(x + half_size, size(mapa2D, 2));
y_min = max(y - half_size, 1);
y_max = min(y + half_size, size(mapa2D, 1));

neighborhood = mapa2D(y_min:y_max, x_min:x_max);

% Encontrar el píxel con el valor más alto en el vecindario válido
valid_indices = find(~isnan(neighborhood(:)));
if ~isempty(valid_indices)
[max_val, max_idx] = max(neighborhood(valid_indices));
[y_offset, x_offset] = ind2sub(size(neighborhood), valid_indices(max_idx));
new_x = x_min + x_offset - 1;
new_y = y_min + y_offset - 1;

% Ajustar solo si el nuevo valor es mayor que el valor original
if max_val > mapa2D(y, x)
adjusted_trajectory(i, 1) = new_x;
adjusted_trajectory(i, 2) = new_y;
end
end
end
end
end

```

7. Bibliografía

- [1] R. a. Sommer, «Reconstructing paleotemperature and paleosalinity regimes with oxygen isotopes,» *Skeletal grow of acuatic organism*, vol. 1, nº 169-202, 1980.
- [2] Real Academia Española. "Espectroscopía." En *Diccionario de la lengua española*. Consultado el 12 de junio de 2023. <https://dle.rae.es/espectroscopía>
- [3] Real Academia Española. "Espectro." En *Diccionario de la lengua española*. Consultado el 12 de junio de 2023. <https://dle.rae.es/espectro>
- [4] Wikipedia, s.v. "Historia de la espectroscopia",
https://es.wikipedia.org/wiki/Historia_de_la_espectroscopia
- [5] Wikipedia, s.v., "Historia de la espectroscopia"
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dispersion_prism.jpg
- [6] Wikipedia, s.v. "Historia de la espectroscopia", "Inicios del siglo XIX (1800-1829)"
https://es.wikipedia.org/wiki/Historia_de_la_espectroscopia
- [7] Wikipedia, s.v. "Historia de la espectroscopia", "Inicios del siglo XIX (1800-1829)"
https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Fraunhofer_lines.svg
- [8] Ley de radiación de Kirchhoff, <https://www.academiatesto.com.ar/cms/ley-de-radiacion-de-kirchhoff>
- [9] Wikipedia, s.v. "Historia de la espectroscopia", "Mediados del siglo XIX (1830-1869)"
https://es.wikipedia.org/wiki/Historia_de_la_espectroscopia
- [10] Diego Cables, "Si el hidrógeno solo tiene un nivel de energía, ¿cómo es posible que libere fotones, si supuestamente los fotones se librea cuando el electrón pasa de un nivel superior a uno inferior?", Quora, <https://es.quora.com/Por-qu%C3%A9-el-espectro-de-emisi%C3%B3n-del-hidr%C3%B3geno-tiene-cuatro-l%C3%ADneas-si-el-hidr%C3%B3geno-solo-tiene-un-electr%C3%B3n>
- [11] Wikipedia, s.v., "Espectroscopia de plasma inducido por láser",
https://es.wikipedia.org/wiki/Espectroscopia_de_plasma_inducido_por_l%C3%A1ser
- [12] University of Münster, Institut für Planetologie, Wilhelm-Klemm-Str. 10, 48149 Münster, Germany, "Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS)", "How it works",
- [13] Anzano, Jesús & Lasheras, Roberto & Bello-Gálvez, Cristina. Espectroscopía de descomposición inducida por láser (LIBS): una técnica emergente en la química analítica.

- [14] MELESSANAKI K., PAPADAKIS V., BALASC., ANGLOS D. *Spectrochim Acta* B56(12): 2337-2346. 2001.
- [15] MELESSANAKI K., MATEO M., FERRENCE SC., BETANCOURT P.P., ANGLOS D. *Appl Surf Sci* 197: 156-163. 2002.
- [16] ANZANO J.M., VILLORIA M.A., GORNUSH-KIN I.B., SMITH, B.W., WINEFORDNER J.D. *Can J Anal Sci Spect* 47(5): 134-140, 2002.
- [17] OUJJA M., VILA A., REBOLLAR E., GARCIAJ.F., CASTILLEJO M. *Spectrochim Acta* B60(7-8): 1140-1148. 2005.
- [18] HARMON R.S., DE LUCIA F.C., MIZIOLEKA.W., MCNESBY K.L., WALTERS R.A., FRENCH P.D. *Geoch Explor Environ Anal* 5(1): 21-28. 2005.
- [19] ST-ONGE L., KWONG E., SABSABI M., VA-DAS E.H.B. *J Pharm Biomed Anal* 36(2):277-284. 2004.
- [20] SAMUELS A.C., DELUCIA JR F.C., MCNESBY K.L., MIZIOLEK A.W. *Appl Opt* 42(30): 6205-6209. 2003.
- [21] KNIGHT A.K., SCHERBARTH N.L., CREMERS D.A., FERRIS M.J. *Appl Spec-trosc* 54(3): 331-340. 2000.
- [22] Zilio, Leandro & Hammond, Heidi. (2017). El sitio Aguada del Barril: cambio en las prácticas mortuorias de cazadores recolectores y evidencias de interacción entre indígenas y europeos en la costa norte de Santa Cruz, Patagonia Argentina. *Intersecciones en Antropología*. 18.
- [23] Wang, Jing & Li, Liang & Yang, Ping & Chen, Ying & Zhu, Yining & Tong, Ming & Hao, Zhongqi & Li, Xiangyou. (2018). Identification of cervical cancer using laser-induced breakdown spectroscopy coupled with principal component analysis and support vector machine. *Lasers in Medical Science*. 33. 10.1007/s10103-018-2500-2.
- [24] Gázquez, Fernando & Rull, Fernando & Calaforra, José & Venegas, Giovanni & Manrique, José & Sanz Arranz, Aurelio & Medina, Jacsson & Catala-Espi, Alejandro & Sansano, Antonio & Navarro, Rafael & Forti, Paolo & De Waele, Jo & Martínez-Frías, Jesús. (2014). Caracterización mineralógica y geoquímica de minerales hidratados de ambientes subterráneos: implicaciones para la exploración planetaria. *Estudios Geológicos*. 70. e009. 10.3989/egeol.41688.314.
- [25] Palaeoshells, Nueva metodología para reconstruir las temperaturas durante la prehistoria a partir de moluscos marinos,
<https://www.palaeoshells.unican.es/es/nueva-metodologia-para-reconstruir-las-temperaturas-durante-la-prehistoria-a-partir-de-moluscos-marinos/>
- [26] MathWorks, Image Region Analyzer,

<https://es.mathworks.com/help/images/ref/imageregionanalyzer-app.html>

- [27] MathWorks, Color Thresholder,
https://es.mathworks.com/help/images/ref/colorthresholder-app.html?searchHighlight=color%20thresholder&s_tid=srchtitle_support_results_1_color%2520thresholder

- [28] García-Escárzaga, A., Cantillo-Duarte, J.J., Milano, S. et al. Marine resource exploitation and human settlement patterns during the Neolithic in SW Europe: stable oxygen isotope analyses ($\delta^{18}\text{O}$) on *Phorcus lineatus* (da Costa, 1778) from Campo de Hockey (San Fernando, Cádiz, Spain). *Archaeol Anthropol Sci* 16, 38 (2024). <https://doi.org/10.1007/s12520-024-01939-0>

- [29] Análisis automatizado de la composición elemental de conchas de moluscos mediante Espectroscopía Láser de Ruptura (LIBS), Repositorio Abierto de la Universidad de Cantabria (UCrea), <http://hdl.handle.net/10902/8048>

- [30] Wikipedia, s.v., "Espectroscopía de emisión atómica",
https://es.wikipedia.org/wiki/Espectroscop%C3%ADa_de_emisi%C3%B3n_at%C3%B3mica

- [31] Wikipedia, s.v., "Espectroscopía de absorción atómica",
https://es.wikipedia.org/wiki/Espectroscopia_de_absorci%C3%B3n_at%C3%B3mica